

6 Procedimentos e Resultados

Como foi descrito na Seção 0 o FPC é um método usado para calcular uma estimativa (λ) do ponto de máximo carregamento de um sistema de potência elétrico, ou ponto de colapso de tensão.

Usando o algoritmo *PSAT* [15], em Matlab, e que é utilizado na análise de sistemas de potência, foram feitos testes de FPC em vários sistemas de diferentes portes (6, 14, 30, 39, 57 e 118 barras). Desta forma, foram identificados parâmetros como tensões e ângulos das barras, e o fator de carregamento dos sistemas, em cada iteração do FPC. Com a aquisição destes dados, podem ser simulados vários pontos de operação dos sistemas, variando o nível de carregamento desde o caso-base (sistema original) até o carregamento de 100% (λ quando o FPC tem convergência).

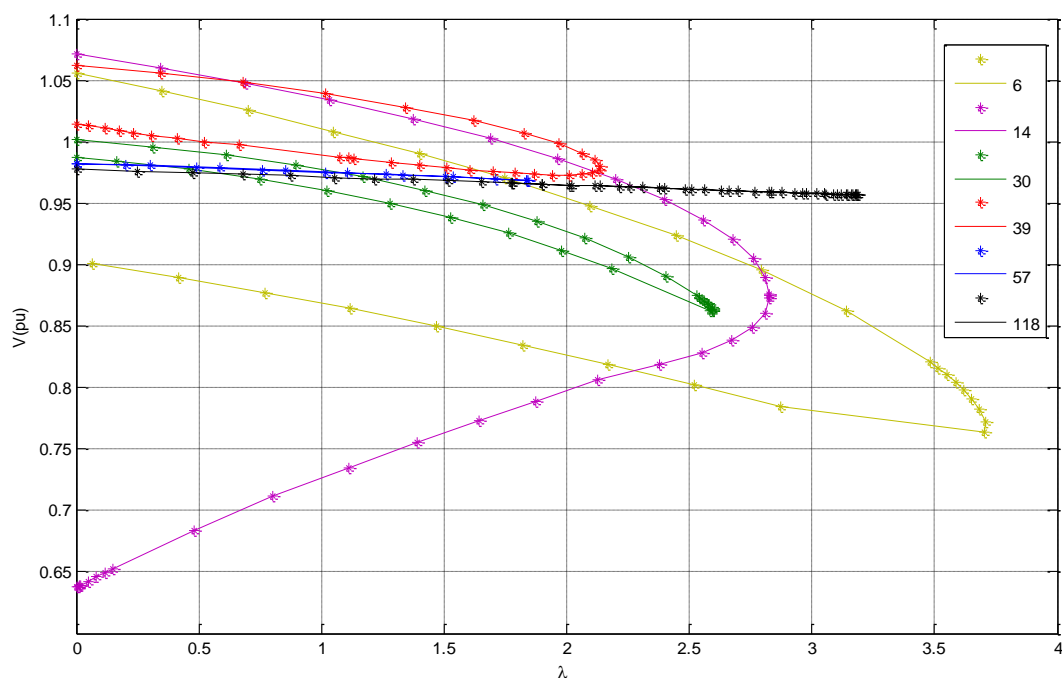


Figura 6.1: FPC de Todos os Sistemas Testados

Em cada uma das curvas no plano λV , uma para cada sistema, estão marcados os passos do algoritmo de FPC. Devido ao formato da curva, nota-se um maior ou menor número de passos na região do máximo carregamento (a ponta do “nariz”).

Nas tabelas e figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos apresentados na Seção 5 para avaliar as condições de estabilidade de tensão. Para cada método considerado, são apresentadas as barras que apresentam os maiores problemas. Nestas tabelas, as barras do tipo PV estão sinalizadas de azul. Vale salientar que, apenas o método da matriz D' (Seção 5.2) apresenta índices de estabilidade de tensão (IET) referentes a este tipo de barra e é uma das principais vantagens desse método. A razão para a necessidade de avaliação desse tipo de barra foi apresentada em [8]. As barras sinalizadas em vermelho são barras do tipo PQ que foram identificadas por mais de um método. As barras do tipo PQ que só foram identificadas por um método não estão coloridas.

6.1.

Sistema de 6 Barras

O sistema de 6 barras, Figura 6.2, é um sistema extraído de [3]. Este sistema é pequeno e muito malhado, formado por 3 barras do tipo PV e 3 barras PQ. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão, ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas nas 6.2 e 6.3, respectivamente. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [15].

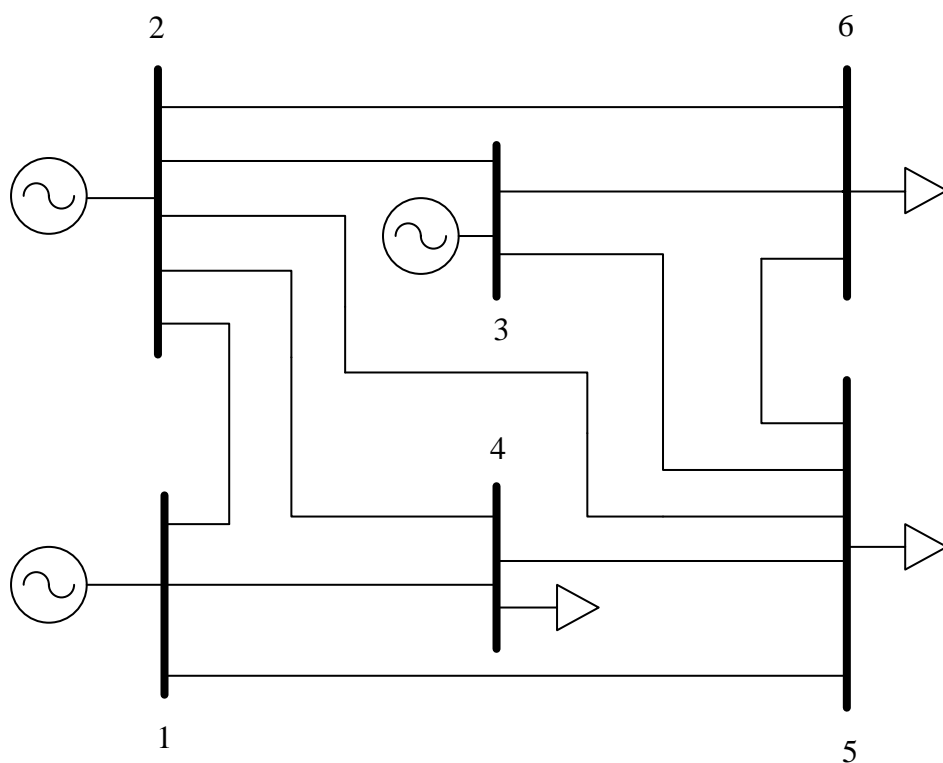


Figura 6.2: Diagrama Unifilar do Sistema de 6 Barras

Tabela 6.1: Dados de Rede do Sistema de 6 Barras

De	Para	R(pu)	X(pu)	B-Shunt(pu)	Tap
1	2	0	0,1	0,04	1
1	4	0	0,2	0,04	1
1	5	0	0,3	0,06	1
2	3	0	0,25	0,06	1
2	4	0	0,1	0,02	1
2	5	0	0,3	0,04	1
2	6	0	0,2	0,05	1
3	5	0	0,26	0,05	1
3	6	0	0,1	0,02	1
4	5	0	0,4	0,08	1
5	6	0	0,3	0,06	1

Tabela 6.2: Caso-Base do Sistema de 6 Barras

Barra	Tipo	Ref	V (pu)	Θ (graus)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	3	1	1,05	0	130,000	35,783	0	0
2	2	0	1,05	-2,202	90,000	72,767	0	0
3	2	0	1,05	-3,797	60,000	56,718	0	0
4	1	0	1,011	-4,996	-0,000	0,000	90	60
5	1	0	0,999	-6,801	0,000	0,000	100	70
6	1	0	1,010	-6,559	-0,000	0,000	90	60

Tabela 6.3: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede

Linha	Barra		Fluxo de Potência barra De		Fluxo de Potência barra Para		Perdas	
	De	Para	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Mw	Mvar
1	1	2	42,36	-1,391	-42,36	-1,391	0	-2,782
2	1	4	46,219	20,299	-46,219	-19,755	0	0,545
3	1	5	41,421	16,872	-41,421	-17,399	0	-0,527
4	2	3	12,275	-3,137	-12,275	-3,137	0	-6,273
5	2	4	51,739	41,135	-51,739	-39,214	0	1,922
6	2	5	28,046	16,639	-28,046	-17,735	0	-1,096
7	2	6	40,3	19,516	-40,3	-20,979	0	-1,463
8	3	5	21,151	18,242	-21,151	-21,401	0	-3,158
9	3	6	51,123	41,608	-51,123	-39,707	0	1,902
10	4	5	7,957	-1,032	-7,957	-6,767	0	-7,799
11	5	6	-1,424	-6,698	1,424	0,685	0	-6,012

Na Figura 6.3 e nas Tabelas 6.4 até 6.11 apresentam-se os resultados obtidos para esse sistema de 6 barras com diferentes carregamentos. A curva da Figura 6.3 é a mesma da Figura 6.1 mas em outra escala para maior clareza.

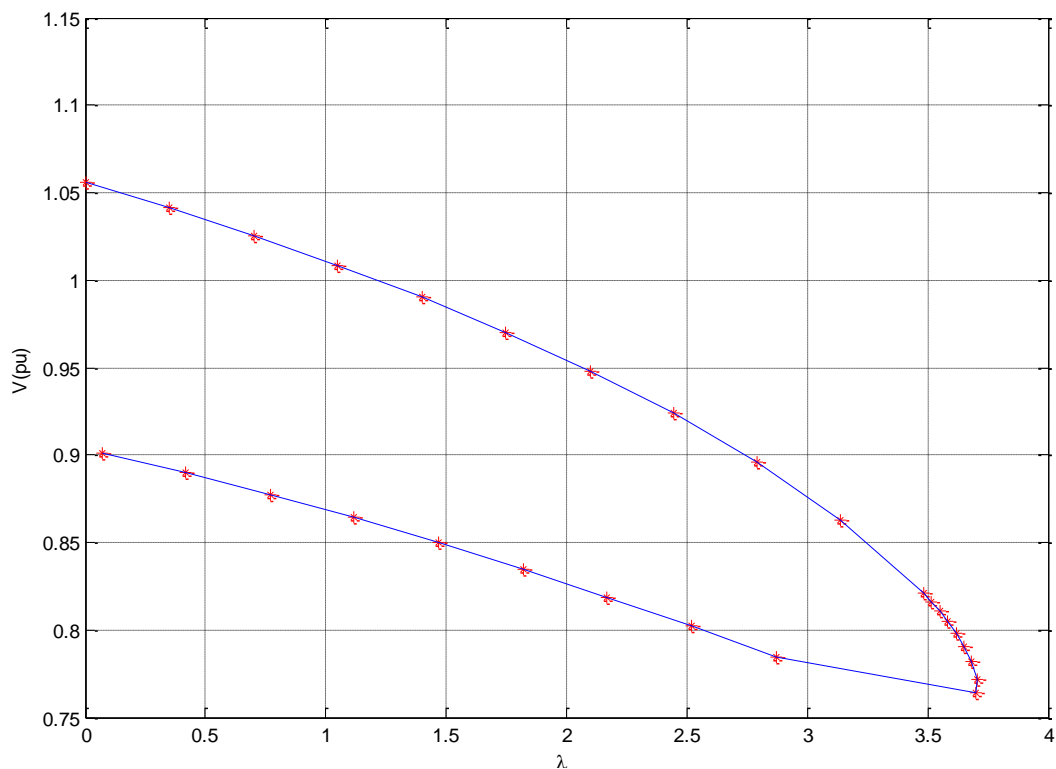


Figura 6.3: FPC Aplicado ao Sistema de 6 Barras

Tabela 6.4: IETs do Caso-Base do Sistema de 6 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	89,745	97,47	5	0,103	5	0,265	5	64,553	12,13
6	90,558	94,5	6	0,077	6	0,197	6	18,662	17,269
3	91,054	89,008	4	0,075	4	0,194	4	16,785	20,83
1	92,184	82,626							
4	92,440	95,755							

Observa-se na Tabela 6.4 que o carregamento do caso-base é considerado leve. O método da matriz D' calculou margens perto de 90% e ângulos perto de 90° (o ângulo mais favorável). O método do índice L calculou valores longe de 1 (o valor correspondente ao máximo carregamento). O método do vetor tangente não fornece a informação que a carga é leve. A análise dos autovalores e fatores de participação indicam o menor autovalor longe de zero (o valor correspondente ao máximo carregamento).

Tabela 6.5: IETs do Sistema de 6 Barras a 60% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	72,340	110,592	5	0,282	5	0,367	5	67,598	9,629
3	75,486	88,558	6	0,198	4	0,24	6	17,885	14,963
6	76,151	101,941	4	0,195	6	0,24	4	14,517	17,966
4	80,769	104,856							
1	81,566	73,19							

Na Tabela 6.5, com índices correspondentes a um aumento de carga de 60% em relação à carga do caso-base, observa-se, em relação aos valores da Tabela 6.4:

i) no método da matriz D', a margem diminui afastando-se de 100% (o maior valor possível) e o ângulo afasta-se de 90° na direção de $\pm 180^\circ$, o pior valor, correspondente ao máximo carregamento (em casos raríssimos, o pior valor é 0°).

ii) os índices L aumentam de valor na direção de 1.

iii) o menor autovalor diminui na direção de zero.

Nas Tabelas 6.4 e 6.5, assim como nas demais 6.6 a 6.9, a barra 5 sendo apontada por todos os métodos como a de maior participação no problema de estabilidade de tensão.

Tabela 6.6: IETs do Sistema de 6 Barras a 80% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	55,446	124,136	5	0,463	5	0,427	5	71,408	7,257
3	62,226	89,804	6	0,303	6	0,25	6	16,685	13,031
6	64,448	108,921	4	0,297	4	0,247	4	11,907	15,529
4	71,050	112,774							
1	74,010	66,603							

Tabela 6.7: IETs do Sistema de 6 Barras a 90% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	41,753	135,875	5	0,617	5	0,488	5	74,932	5,407
3	51,821	92,7	6	0,378	6	0,248	6	15,403	11,743
6	56,593	114,489	4	0,369	4	0,239	4	9,665	13,868
4	64,436	118,469							
1	69,186	62,207							

Tabela 6.8: IETs do Sistema de 6 Barras a 95% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	31,066	145,733	5	0,743	5	0,498	5	77,824	3,994
3	42,046	97,772	6	0,428	6	0,247	6	14,221	10,921
6	51,262	119,063	4	0,416	4	0,237	4	7,955	12,776
4	60,016	122,551							
2	64,621	102,64							

Tabela 6.9: IETs do Sistema de 6 Barras a 97% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	24,864	151,726	5	0,819	5	0,539	5	79,421	3,196
3	33,640	104,231	6	0,454	6	0,239	6	13,542	10,522
6	48,361	122,029	4	0,44	4	0,222	4	7,036	12,232
4	57,688	124,88							
2	60,592	105,831							

Tabela 6.10: IETs do Sistema de 6 Barras a 98% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	20,862	155,808	5	0,869	5	0,539	5	80,456	2,676
3	24,676	113,985	6	0,469	6	0,239	6	13,077	10,292
6	46,443	124,265	4	0,453	4	0,222	4	6,466	11,911
4	56,212	126,47							
2	56,903	109,209							

Os valores observados nas Tabelas 6.6 a 6.10 correspondentes a diferentes aumentos de carga em relação ao caso-base, seguem a mesma tendência dos valores da Tabela 6.5 em relação aos valores da Tabela 6.4, o caso-base.

Na Tabela 6.10, correspondente a 98% do máximo aumento de carga, observa-se na barra 5 $M=20\%$, $\beta=155^\circ$ e valores positivos também para as outras barras; $L=0,8$ e $\sigma=2,6$ com $FP=80\%$.

Tabela 6.11: IETs do Sistema de 6 Barras a 100% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
5	-5,864	-171,414	5	1,242	5	0,633	5	86,424	-0,799
4	65,467	102,321	6	0,543	6	0,204	6	10,123	9,328
3	68,849	42,391	4	0,514	4	0,171	4	3,453	10,410
1	74,344	84,679							
2	76,807	72,709							

Na Tabela 6.11 encontram-se os índices para um aumento de carga de 100%. Entenda-se como a carga máxima que o algoritmo de FPC conseguiu encontrar. É possível que esteja ligeiramente aquém do verdadeiro máximo, ainda na parte superior da curva da Figura 6.3 ou ligeiramente além, na parte inferior da mesma curva. Na Tabela 6.11 observa-se:

i) o método da matriz D' indica valores negativos para a margem e ângulo da barra 5, isto é, operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV para essa barra, ou seja, a carga corresponde a um valor menor que o verdadeiro máximo na parte inferior da curva da Figura 6.3; os índices das outras barras não indicam qualquer problema.

ii) o método do índice L indica na barra 5 um valor maior que 1, o que significa o mesmo que índices negativos no método da matriz D'; os índices das outras barras não indicam qualquer problema.

iii) o método do vetor tangente aponta para a barra 5 a responsabilidade de 0,63 na limitação da carga máxima e responsabilidades bem menores para as outras barras de carga.

iv) o autovalor -0,799 indica operação na parte inferior da curva da Figura 6.3; o fator de participação da barra 5 é de 86% e bem menores nas outras barras.

Todos os métodos apontam para a barra 5 como a maior responsável por não ser possível aumentar ainda mais a carga do sistema.

As cargas das barras 4 e 6 são iguais, enquanto a da barra 5 é 10% maior. Já no caso-base observa-se que os fluxos de potência da barra 4 para a 5 e da 5 para a 6 são muito pequenos: a impedância do ramo entre as barras 4 e 5 é a maior da rede e entre as barras 5 e 6 a segunda maior. O fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3 é pequeno e não há fluxo de potência reativa. Assim, pode-se assumir que as três cargas estão em final de ramal e, portanto, são alimentadas independentemente.

A barra 4 é atendida pelos geradores nas barras 1 e 2 na razão de 50% cada um, aproximadamente. Entre as barras 2 e 4, o ramo tem a menor impedância da rede, e entre as barras 1 e 4, a segunda menor impedância. A barra 2 é de tensão controlada. Assim, a barra 4 deve ter pequena participação no problema.

A barra 6 é atendida pelos geradores nas barras 2 e 3 na razão de 50% cada um, aproximadamente. Entre as barras 3 e 6, o ramo tem a menor impedância da rede, e entre as barras 2 e 6, a segunda menor impedância. A barra 3 é de tensão controlada. Assim, a barra 6 deve ter pequena participação no problema.

A barra 5 é atendida pelos geradores nas barras 1, 2 e 3. Entre as barras 5 e 4, o ramo tem a maior impedância da rede, entre as barras 1 e 5, a segunda maior impedância, e entre as barras 2 e 5, a terceira maior impedância. Assim, a barra 5 deve ter participação no problema, como apontado por todos os métodos.

As observações dos últimos quatro parágrafos, relativas ao caso-base, se mantém para o ponto de operação relativo à máxima carga.

6.2.

Sistema de 14 Barras

O sistema *IEEE* 14 barras mostrado na Figura 6.4 é uma área do sistema interligado dos Estados Unidos (Midwestern *US*) em fevereiro de 1962. É formado por 5 barras PV, das quais duas têm geração e três possuem apenas compensadores síncronos. O restante das barras é do tipo PQ. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão, ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas nas Tabelas 6.12, 6.13 e 6.14. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [16].

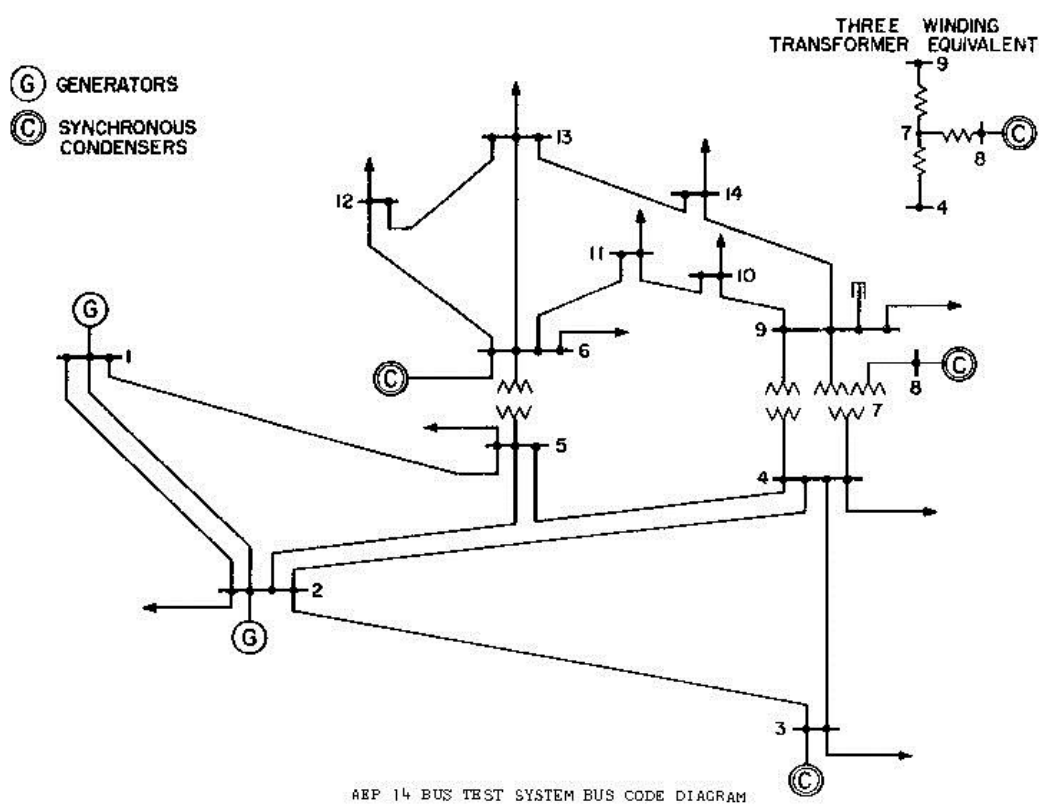


Figura 6.4: Diagrama Unifilar do Sistema de 14 Barras

Tabela 6.12: Dados de Rede do Sistema 14 Barras

De	Para	R(pu)	X(pu)	B-Shunt(pu)	Tap
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	1
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	1
3	2	0,04699	0,19797	0,0438	1
2	4	0,05811	0,17632	0,034	1
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	1
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	1
5	4	0,01335	0,04211	0	1
4	7	0	0,20912	0	0,978
4	9	0	0,55618	0	0,969
5	6	0	0,25202	0	0,932
6	11	0,09498	0,1989	0	1
6	12	0,12291	0,25581	0	1
6	13	0,06615	0,13027	0	1
8	7	0	0,17615	0	1
7	9	0	0,11001	0	1
9	10	0,03181	0,0845	0	1
9	14	0,12711	0,27038	0	1
11	10	0,08205	0,19207	0	1
12	13	0,22092	0,19988	0	1
14	13	0,17093	0,34802	0	1

Tabela 6.13: Caso-Base do Sistema de 14 Barras

Barra	Tipo	Ref	V (pu)	Θ (graus)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	3	1	1,060	0	352,03	-28,197	0	0
2	2	0	1,045	-10,489	40	94,86	30,38	17,78
3	2	0	1,010	-21,479	0	59,736	131,88	26,6
4	1	0	0,996	-17,307	0	0	66,92	5,6
5	1	0	1,001	-14,968	0	0	10,64	2,24
6	2	0	1,070	-23,218	0	44,433	15,68	10,5
7	1	0	1,035	-21,577	0	0	0	0
8	2	0	1,090	-21,577	0	33,402	0	0
9	1	0	1,012	-23,836	0	0	41,3	23,24
10	1	0	1,012	-24,132	0	0	12,6	8,12
11	1	0	1,035	-23,836	0	0	4,9	2,52
12	1	0	1,046	-24,429	0	0	8,54	2,24
13	1	0	1,036	-24,484	0	0	18,9	8,12
14	1	0	0,996	-25,614	0	0	20,86	7

Tabela 6.14: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede

Linha	Barra		Fluxo barra De		Fluxo barra Para		Perdas	
	De	Para	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	MW	MVAr
2	5	1	57,84	7	-56,05	-5,115	1,79	1,885
6	12	2	11,41	4,591	-11,24	-4,254	0,16	0,338
12	13	3	2,70	2,014	-2,68	-1,993	0,02	0,021
6	13	4	25,99	14,446	-25,48	-13,44	0,51	1,006
6	11	5	11,86	12,844	-11,61	-12,313	0,25	0,531
11	10	6	6,71	9,793	-6,60	-9,541	0,11	0,252
9	10	7	6,01	-1,389	-6,00	1,421	0,01	0,031
9	14	8	12,00	0,518	-11,82	-0,138	0,18	0,38
14	13	9	-9,04	-6,862	9,26	7,313	0,22	0,451
7	9	10	37,86	22,523	-37,86	-20,534	0,00	1,989
1	2	11	241,72	-38,062	-231,43	63,632	10,29	25,57
3	2	12	-100,22	13,952	104,97	1,423	4,75	15,375
3	4	13	-31,66	19,184	32,61	-20,255	0,95	-1,071
1	5	14	110,31	9,865	-104,38	9,366	5,93	19,231
5	4	15	84,86	-13,731	-83,88	15,536	0,98	1,805
2	4	16	78,25	5,026	-74,97	1,037	3,29	6,063
4	9	17	21,46	4,349	-21,46	-1,835	0,00	2,514
5	6	18	64,94	7,24	-64,94	2,051	0,00	9,291
4	7	19	37,86	-6,267	-37,86	9,225	0,00	2,958
8	7	20	0,00	33,402	0,00	-31,748	0,00	1,654

Na Figura 6.5 e nas Tabelas 6.15 até 6.22 apresentam-se os resultados obtidos para esse sistema de 14 barras. Estes resultados são obtidos a partir de testes realizados com diferentes carregamentos do sistema, como no caso do sistema analisado na seção anterior.

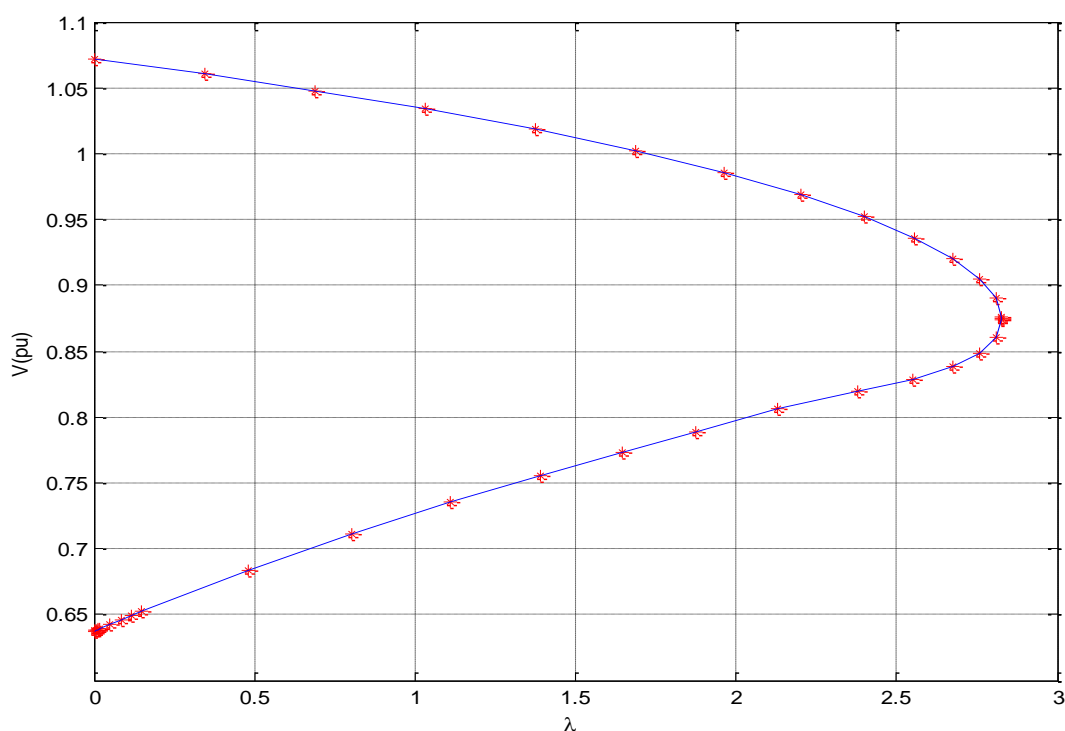


Figura 6.5: FPC Aplicado ao Sistema de 14 Barras

Tabela 6.15: IETs do Caso-Base do Sistema de 14 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	67,332	71,09	14	0,115	14	0,055	14	25,612	2,605
3	82,262	99,216	9	0,099	10	0,043	11	14,963	5,429
8	89,531	93,774	10	0,094	9	0,042	12	12,323	7,479
6	92,240	103,25	7	0,055	13	0,026	13	9,178	11,028
9	92,310	95,38	11	0,053	11	0,026	7	8,357	15,939

Na Tabela 6.15 os resultados são apresentados para as 5 “piores” barras de cada método. No método da matriz D', são as barras com menores margens. Observa-se a presença de quatro barras de tensão controlada (como dito, é o único método que avalia esse tipo de barra). Os resultados referentes ao índice L incluem as barras com maiores índices, assim como os resultados referentes ao vetor tangente. A análise referente ao menor autovalor da matriz inclui as barras com maiores fatores de participação.

Comparando-se os resultados da Tabela 6.15 com aqueles da Tabela 6.4, observa-se que o caso-base do sistema de 14 barras é mais carregado do que aquele

do sistema de 6 barras. De fato, observando-se as Figura 6.5 e Figura 6.3 verifica-se que foi possível aumentar a carga do sistema de 6 barras em 3,7 vezes enquanto que a do sistema de 14 barras em 2,8 vezes. A coerência entre a Tabela 6.15 com a Figura 6.5 comparativamente à Figura 6.3 e Tabela 6.4 nem sempre é verdadeira. Durante o crescimento da carga pode ocorrer a exaustão de disponibilidade do controle de tensão, como nas fontes de potência reativa e taps de transformadores. A perda do controle de tensão reduz a capacidade de transmissão. Em outras palavras, um sistema operando no caso-base com pouco carregamento pode logo encontrar o seu máximo carregamento devido à perda do controle de tensão em barras da rede. Neste capítulo, entretanto, não foram considerados limites de geração de potência reativa e de taps de transformadores.

Tabela 6.16: IETs do Sistema de 14 Barras a 60% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	55,318	67,457	14	0,219	14	0,067	14	24,055	2,32
3	67,401	108,277	9	0,187	9	0,061	11	14,349	5,139
6	79,013	114,876	10	0,178	10	0,058	12	11,87	7,148
8	81,292	97,854	7	0,102	5	0,051	13	9,377	10,413
9	84,991	105,176	11	0,097	4	0,051	7	9,087	14,823

Tabela 6.17: IETs do Sistema de 14 Barras a 80% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	30,216	68,042	14	0,34	5	0,068	10	32,611	1,953
3	51,352	117,605	9	0,288	14	0,067	11	13,218	4,783
6	58,692	130,708	10	0,273	9	0,067	12	10,299	6,811
8	69,611	104,797	7	0,153	4	0,064	5	1,339	9,479
9	75,082	119,122	11	0,143	10	0,062	4	0,012	13,127

Tabela 6.18: IETs do Sistema de 14 Barras a 90% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	22,716	71,101	14	0,429	5	0,073	11	12,034	1,653
3	40,322	125,771	9	0,363	9	0,068	7	11,785	4,511
6	40,486	145,729	10	0,341	4	0,067	12	8,201	6,603
8	59,331	113,301	7	0,189	14	0,066	9	1,275	8,527
9	65,821	131,973	11	0,173	10	0,062	4	-0,024	11,852

Tabela 6.19: IETs do Sistema de 14 Barras a 95% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	18,833	75,471	14	0,492	5	0,078	10	32,89	1,404
6	24,863	159,403	9	0,417	4	0,071	7	23,013	4,306
3	32,123	134,029	10	0,39	9	0,068	4	0,063	6,475
8	50,061	123,739	7	0,213	14	0,064	9	-0,072	7,559
2	52,137	154,509	11	0,194	10	0,062	13	-4,807	11,017

Tabela 6.20: IETs do Sistema de 14 Barras a 97% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
6	15,280	167,687	14	0,525	5	0,082	10	29,012	1,231
1	17,136	78,696	9	0,446	4	0,073	7	24,398	4,097
3	27,252	140,244	10	0,416	9	0,067	14	9,643	6,254
2	33,914	168,323	7	0,226	14	0,061	11	8,45	6,323
8	43,796	132,119	11	0,204	10	0,060	13	-5,072	9,744

Tabela 6.21: IETs do Sistema de 14 Barras a 98% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
2	4,393	179,055	14	0,545	5	0,082	10	29,077	0,967
6	8,891	173,005	9	0,464	4	0,073	7	23,277	3,993
1	16,211	80,994	10	0,431	9	0,067	14	11,871	5,651
3	23,919	145,08	7	0,233	14	0,061	11	7,776	6,211
8	39,177	138,685	11	0,21	10	0,060	13	-6,022	9,744

Na Tabela 6.21 observa-se que o método da matriz D' indica que o ponto de operação está muito próximo do máximo, já que $\beta = 179^\circ$. O índice L nada indica, já que nenhum valor é próximo de 1. O menor autovalor aproximou-se zero, mas não muito.

Tabela 6.22: IETs do Sistema de 14 Barras a 100% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
2	-279,8	-57,901	14	0,603	5	0,087	10	27,494	0,716
6	-11,64	-9,225	9	0,515	4	0,076	7	25,521	3,837
3	9,877	167,331	10	0,476	9	0,067	14	7,146	5,074
1	13,925	89,243	7	0,255	10	0,059	13	7,099	6,285
8	17,132	166,653	11	0,226	14	0,057	4	0,229	9,239

Na Tabela 6.22 apresentam-se os resultados para o ponto de operação referente ao maior carregamento que o FPC conseguiu encontrar. Como dito, não é exatamente o ponto de máximo. Os índices derivados da matriz D' passaram para valores negativos em duas barras de tensão controlada. Os índices L continuaram sem apontar problema em barras de carga. O menor autovalor aproximou-se de zero mas não se pode dizer que é quase nulo ou que adquiriu valor negativo. Esse autovalor é de uma matriz associada a barras de carga somente. O vetor tangente não apontou para nenhuma barra de carga.

6.3. Sistema de 30 Barras

O sistema *IEEE* 30 barras mostrado na Figura 6.6 é uma área do sistema interligado dos Estados Unidos (*Midwestern US*) em dezembro de 1961, formado por 6 barras do tipo PV, das quais duas possuem geração e as demais possuem compensadores síncronos. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão, ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas no Apêndice A1. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [16].

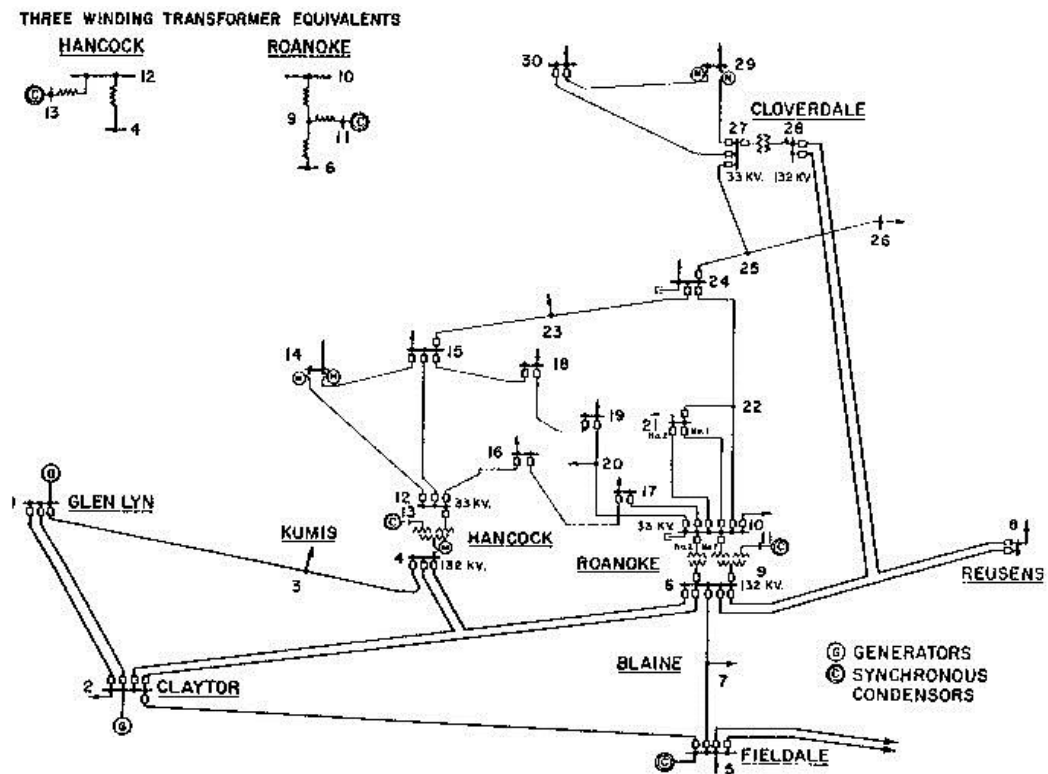


Figura 6.6: Diagrama unifilar do Sistema de 30 Barras

Na Figura 6.7 e nas Tabelas 6.23 até 6.30 apresentam-se os resultados obtidos para um sistema de 30 barras. Estes resultados são obtidos a partir de testes realizados com diferentes carregamentos do sistema.

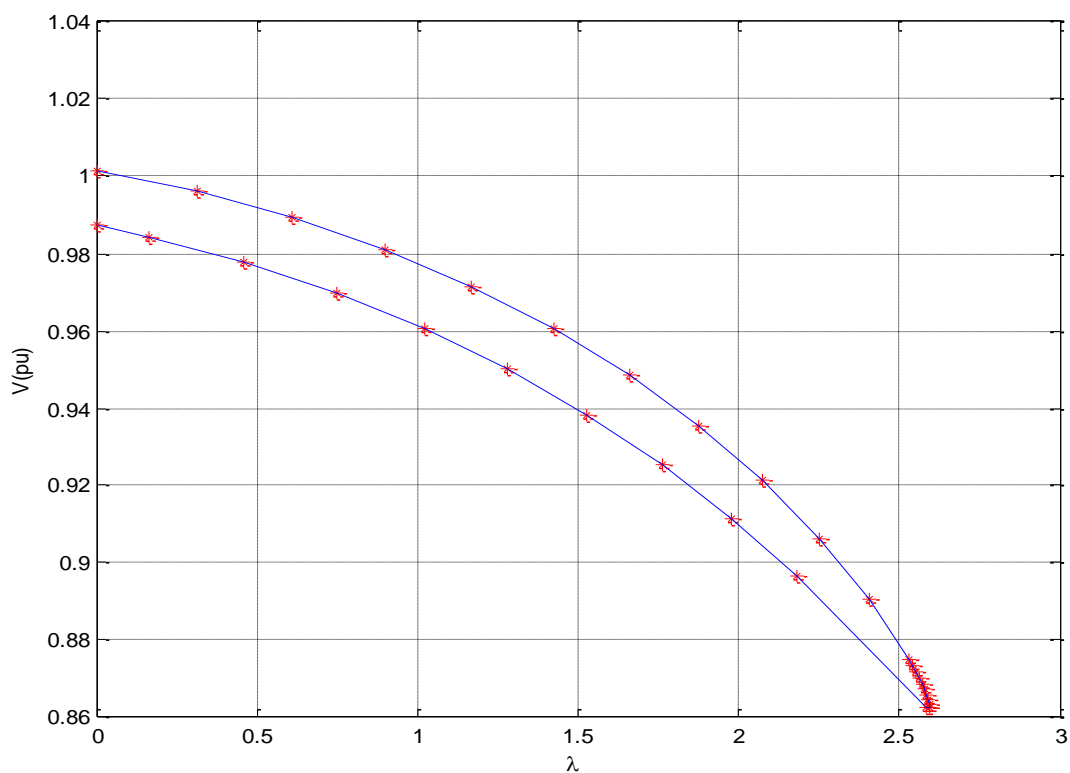


Figura 6.7: FPC Aplicado ao Sistema de 30 Barras

O formato da curva na Figura 6.7 indica dificuldades para o algoritmo de FPC achar o máximo carregamento.

Tabela 6.23: IETs do Caso-Base do Sistema de 30 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	78,076	70,643	30	0,168	26	0,047	30	21,921	0,467
5	86,460	94,349	29	0,144	30	0,046	20	10,613	0,946
30	90,267	96,68	26	0,143	24	0,042	10	7,47	1,634
21	95,157	91,551	24	0,124	29	0,039	19	4,286	3,277
13	95,503	94,937	19	0,121	19	0,038	24	3,608	3,693

Tabela 6.24: IETs do Sistema de 30 Barras a 60% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	65,423	65,265	30	0,304	30	0,072	30	21,369	0,408
5	76,340	98,201	29	0,257	26	0,068	20	10,253	0,863
30	82,092	104,479	26	0,256	29	0,063	19	4,161	1,491
13	85,062	98,656	24	0,217	24	0,057	24	3,859	3,068
8	86,572	93,073	25	0,212	25	0,055	26	2,959	3,499

Tabela 6.25: IETs do Sistema de 30 Barras a 80% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	53,253	59,588	30	0,505	30	0,087	30	21,068	0,322
5	68,044	104,609	29	0,417	26	0,078	10	15,212	0,751
30	69,521	117,762	26	0,417	29	0,076	20	9,66	1,302
13	78,733	105,347	24	0,341	25	0,064	9	5,116	2,806
8	81,429	99,05	25	0,336	24	0,063	24	4,161	3,257

Tabela 6.26: IETs do Sistema de 30 Barras a 90% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	46,888	56,351	30	0,683	30	0,119	27	21,559	0,25
30	57,403	131,374	29	0,554	29	0,104	25	19,118	0,668
5	61,207	106,359	26	0,55	26	0,098	17	7,872	1,161
13	68,698	110,419	24	0,435	25	0,081	23	7,681	2,629
8	71,758	103,038	25	0,433	27	0,077	4	4,246	3,094

Tabela 6.27: IETs do Sistema de 30 Barras a 95% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
1	43,533	54,547	30	0,835	30	0,166	27	22,117	0,192
30	45,820	143,718	29	0,665	29	0,142	26	10,847	0,61
5	59,412	109,463	26	0,654	26	0,122	23	7,715	1,061
13	66,394	116,263	25	0,507	27	0,103	29	4,761	2,514
8	70,372	108,837	24	0,501	25	0,101	22	3,58	2,991

Tabela 6.28: IETs do Sistema de 30 Barras a 97% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
30	37,860	151,298	30	0,93	30	0,166	22	7,465	0,157
1	42,120	53,765	29	0,732	29	0,142	20	6,289	0,579
5	58,038	110,422	26	0,714	26	0,122	28	3,907	1,008
13	63,600	119,863	25	0,548	27	0,103	21	2,808	2,459
8	67,673	112,803	24	0,535	25	0,101	23	2,728	2,941

Tabela 6.29: IETs do Sistema de 30 Barras a 98% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
30	34,613	156,921	30	0,995	30	0,174	26	10,982	0,131
1	41,400	53,317	29	0,777	29	0,149	23	7,674	0,558
5	57,275	111,113	26	0,752	26	0,126	4	5,004	0,972
13	61,699	123,028	25	0,573	27	0,107	20	4,054	2,423
8	65,629	116,775	24	0,556	25	0,104	22	3,16	2,91

Na Tabela 6.29 observa-se valores positivos para M e β não muito próximos dos valores correspondentes ao máximo carregamento, mesmo para a barra 30. Já o índice L para a barra 30 tem um valor muito próximo de 1. O vetor tangente aponta para a barra 30 mas sem grande ênfase. O menor autovalor, próximo de zero, não inclui a barra 30 entre as cinco mais influentes.

Tabela 6.30: IETs do Sistema de 30 Barras a 100% do Carregamento Máximo

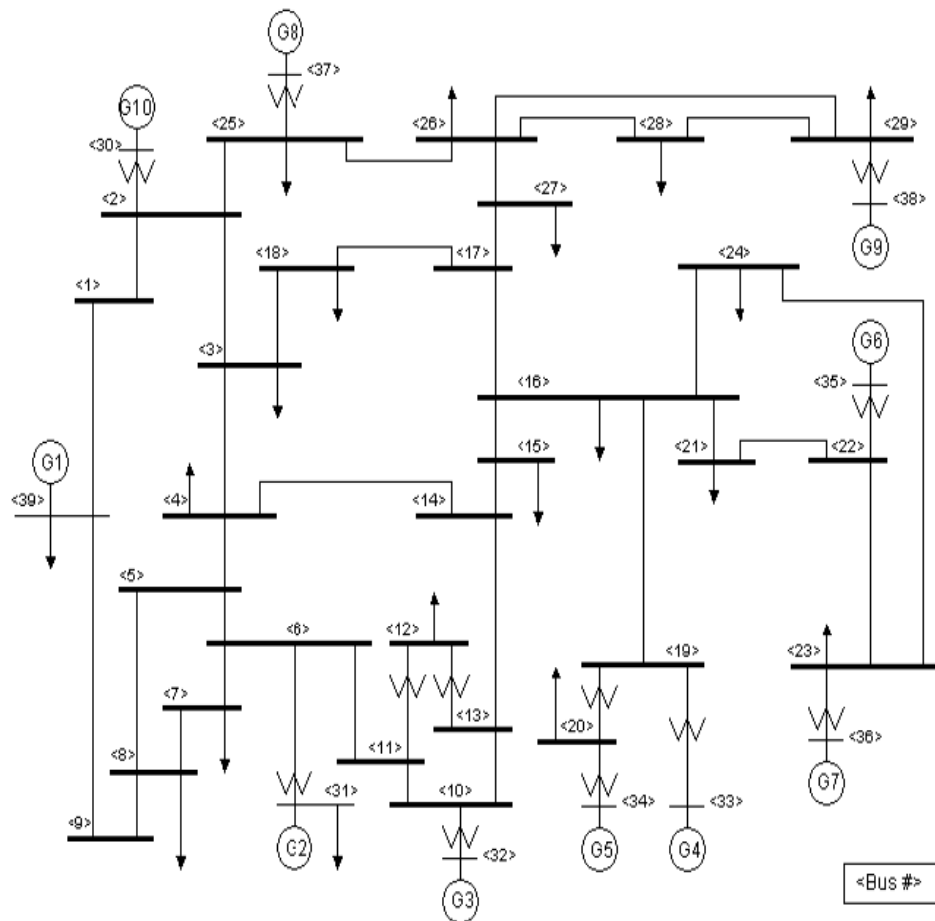
Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
22	#####	-21,403	30	1,419	30	0,361	27	12,045	-0,026
28	#####	-19,753	29	1,045	29	0,298	18	1,91	0,475
25	#####	-42,318	26	0,947	26	0,199	14	1,881	0,823
27	#####	-15,57	25	0,699	27	0,198	23	1,312	2,31
10	-7.694.6	-5,123	24	0,638	25	0,169	15	1,062	2,814

Na Tabela 6.30 verifica-se que o método da matriz D' aponta operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV nas cinco barras de carga listadas.

O índice L aponta o mesmo para duas barras de carga 30 e 29. O vetor tangente também aponta, principalmente, para as barras 30 e 29. O menor autovalor negativo aponta operação na parte inferior e para a barra 27. As barras apontadas por mais de um método são 25, 26, 27, 29 e 30. Todas essas barras encontram-se no final do mesmo caminho de transmissão, como pode ser observado no diagrama unifilar da Figura 6.6.

6.4. Sistema de 39 Barras

O sistema *IEEE 39 barras* é comumente conhecido como *10-machine New-England Power System*. Possui 10 barras PV, todas com geração ativa, e o restante das barras do tipo PQ. Esse sistema possui diversas áreas com vários ramais, sendo que algumas áreas possuem uma maior concentração de geração e outras de carga. Isto faz com que alguns troncos de linhas de transmissão fiquem muito sobrecarregados, já que uma boa quantidade de potência reativa é demandada pelas cargas. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão, ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas no Apêndice A2. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [17].



Na Figura 6.9 e nas Tabelas 6.31 até 6.39 apresentam-se os resultados obtidos para um sistema de 39 barras. Estes resultados são obtidos a partir de testes realizados com diferentes carregamentos do sistema.

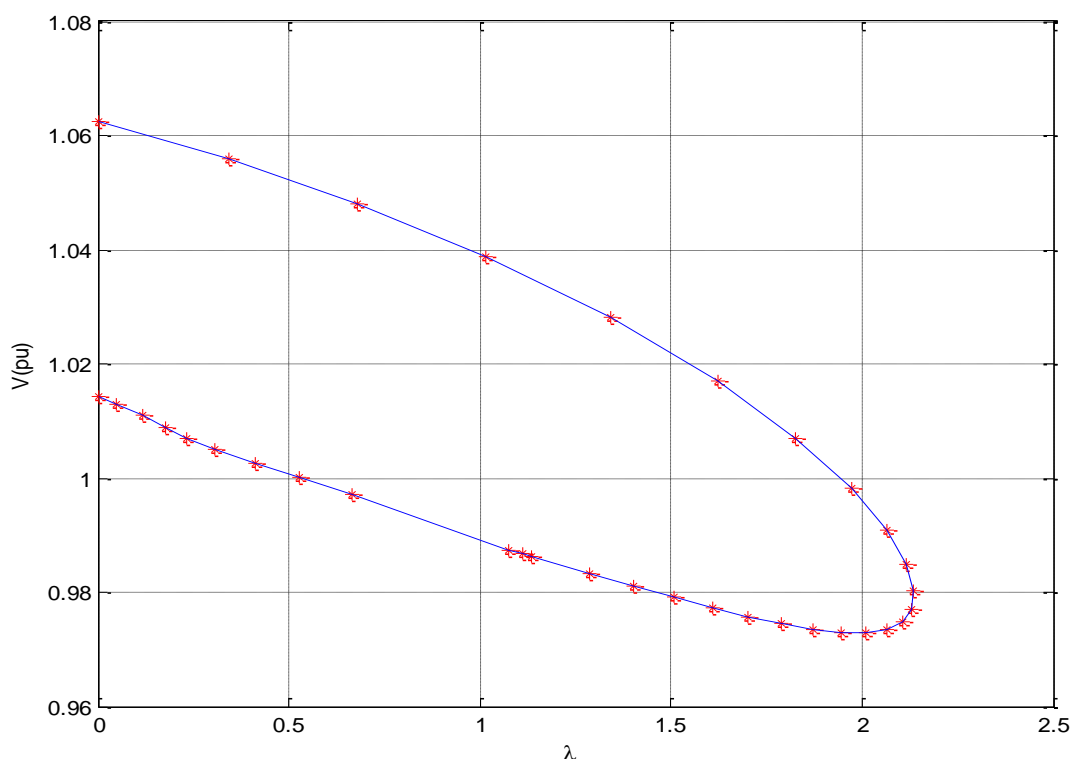


Figura 6.9: FPC Aplicado ao Sistema de 39 Barras

Tabela 6.31: IETs do Caso-Base do Sistema de 39 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	37,394	55,459	15	0,201	12	0,0711	6	17,017	9,646
31	61,546	68,740	4	0,198	4	0,0688	12	10,947	19,625
36	67,077	70,469	27	0,195	8	0,0668	7	9,821	32,436
34	67,751	76,274	18	0,189	7	0,0657	27	7,402	39,304
35	68,246	72,114	8	0,188	15	0,0647	10	7,181	50,006
33	69,412	73,100	17	0,186	14	0,0603	15	5,776	62,019
32	69,680	72,879	7	0,185	5	0,0583	18	5,370	65,460
37	71,480	72,156	24	0,180	27	0,0546	24	4,840	76,373
20	79,681	87,351	16	0,179	6	0,0541	5	2,079	80,496
30	86,980	83,100	14	0,173	18	0,0537	20	1,904	86,378

Na Tabela 6.31 observa-se que todos os métodos indicam operação normal no caso-base. O método da matriz D' lista nove barras, entre as dez com menor margem, como barras de tensão controlada.

Tabela 6.32: IETs do Sistema de 39 Barras a 60% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	25,552	45,671	15	0,273	12	0,0923	6	16,244	8,865
31	49,568	61,521	4	0,270	7	0,0905	7	10,953	18,678
36	57,711	65,007	27	0,263	8	0,0900	12	10,078	31,166
35	58,715	67,144	8	0,257	4	0,0899	10	6,968	37,673
34	58,900	73,023	18	0,254	5	0,0853	15	5,646	48,681
32	60,210	68,182	7	0,253	15	0,0846	18	5,114	60,852
33	60,688	68,983	17	0,251	14	0,0844	24	4,346	63,921
37	63,655	68,309	24	0,242	6	0,0824	11	3,200	74,598
20	73,337	87,816	16	0,241	13	0,0768	28	3,068	78,617
30	82,078	81,894	14	0,235	11	0,0765	5	2,289	84,014

Tabela 6.33: IETs do Sistema de 39 Barras a 80% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	11,255	29,185	4	0,416	7	0,0949	17	8,702	7,022
31	29,755	46,142	15	0,414	8	0,0938	6	7,679	16,606
36	42,725	56,135	8	0,399	12	0,0928	15	7,119	28,415
35	42,912	59,041	7	0,393	5	0,0903	16	6,089	34,086
32	43,446	60,910	27	0,392	4	0,0899	9	1,292	45,768
34	45,228	68,293	18	0,380	6	0,0882	10	1,227	58,518
33	46,639	62,985	17	0,375	14	0,0851	27	1,226	60,239
37	50,859	63,155	24	0,361	11	0,0807	11	1,12	70,925
20	62,433	89,497	14	0,360	13	0,0797	29	1,097	74,741
30	72,405	81,297	16	0,360	15	0,0793	8	0,889	79,025

Tabela 6.34: IETs do Sistema de 39 Barras a 90% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	5,446	19,332	4	0,527	7	0,0947	3	35,086	5,45
31	17,515	32,214	15	0,516	8	0,0933	7	11,13	15,052
32	31,801	57,641	8	0,51	12	0,0903	15	7,392	26,44
35	33,573	55,429	7	0,502	5	0,0901	21	6,899	31,259
36	34,285	51,791	27	0,48	6	0,0884	5	6,809	43,609
34	37,77	66,722	18	0,468	4	0,0870	24	6,554	56,869
33	38,536	61,204	17	0,461	14	0,0822	16	5,61	57,193
37	43,237	62,216	14	0,454	11	0,0800	18	4,952	68,372
20	55,562	92,052	5	0,443	13	0,0782	19	3,267	71,983
8	63,022	140,064	16	0,442	10	0,0740	6	1,898	75,382

Tabela 6.35: IETs do Sistema de 39 Barras a 95% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	2,706	13,145	4	0,61	7	0,0932	3	35,04	4,183
31	8,359	17,613	8	0,596	8	0,0917	7	12,694	13,969
32	22,039	56,678	7	0,587	5	0,0885	17	8,861	25,144
35	27,604	55,501	15	0,587	6	0,0872	16	5,241	29,137
36	29,107	50,624	27	0,537	12	0,0864	27	3,328	42,141
34	33,165	67,289	18	0,527	4	0,0826	19	1,739	54,671
33	33,298	62,604	14	0,523	11	0,0779	11	0,907	55,95
37	38,037	64,259	17	0,518	14	0,0777	12	0,099	66,687
20	50,838	95,727	5	0,516	13	0,0752	18	0,096	70,103
8	53,88	150,211	16	0,497	10	0,0716	4	0,047	72,848

Tabela 6.36: IETs do Sistema de 39 Barras a 97% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
38	1,573	9,839	4	0,656	7	0,0907	13	15,292	3,433
31	2,229	5,135	8	0,646	8	0,0891	15	6,676	13,407
32	14,695	55,594	7	0,637	5	0,0858	17	5,408	24,507
35	24,392	57,766	15	0,625	6	0,0849	22	5,116	27,954
36	26,403	51,391	27	0,566	12	0,0814	27	4,799	41,399
33	30,375	65,453	14	0,561	4	0,0772	7	4,361	53,307
34	30,668	68,78	5	0,557	11	0,0746	11	3,585	55,439
37	34,956	67,377	18	0,557	14	0,0721	5	2,343	65,836
8	47,942	156,051	17	0,547	13	0,0710	12	2,242	69,134
20	48,088	99,26	16	0,525	10	0,0680	18	1,459	71,512

Na Tabela 6.36 com aumento de carga correspondente a 97% do máximo encontrado pelo FPC, observam-se as barras 4, 7 e 8 apontadas por dois métodos no topo da lista. Essas barras foram apontadas para todos os níveis de carregamento desde o caso-base.

Tabela 6.37: IETs do Sistema de 39 Barras a 98% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
31	-2,573	-6,491	4	0,685	7	0,0907	13	15,457	2,939
38	0,962	7,5	8	0,678	8	0,0891	15	6,563	13,071
32	8,115	49,465	7	0,668	5	0,0858	17	5,503	24,141
35	22,279	60,888	15	0,647	6	0,0849	22	4,971	27,21
36	24,653	52,853	14	0,584	12	0,0814	7	4,299	40,962
33	28,38	68,762	5	0,583	4	0,0772	11	3,951	52,441
34	28,987	70,514	27	0,582	11	0,0746	26	3,906	55,144
37	32,763	70,747	18	0,574	14	0,0721	5	2,251	65,331
8	43,572	159,792	17	0,564	13	0,0710	29	1,515	68,555
20	46,156	102,544	12	0,544	10	0,0680	20	1,455	70,699

Na Tabela 6.37 com aumento de carga correspondente a 98% do máximo encontrado pelo FPC, observa-se índices M e β negativos em barra de tensão controlada. Os outros índices, todos para barras de carga, continuam positivos e afastados dos valores críticos.

Tabela 6.38: IETs do Sistema de 39 Barras a 99% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
31	-10,137	-30,416	4	0,722	7	0,091	16	13,253	2,283
32	-5,942	-55,757	8	0,72	8	0,089	24	10,86	12,667
38	0,26	3,073	7	0,71	5	0,086	15	6,669	23,715
35	19,256	68,824	15	0,674	6	0,085	3	5,504	26,265
36	22,178	56,864	5	0,618	12	0,081	22	4,953	40,445
33	25,411	76,374	14	0,614	4	0,077	7	3,496	51,332
34	26,506	74,406	27	0,602	11	0,075	9	2,818	54,798
37	29,383	78,11	18	0,596	14	0,072	25	2,586	64,721
8	36,788	164,618	17	0,584	13	0,071	5	2,247	67,856
4	41,373	161,317	12	0,577	10	0,068	29	1,574	69,696

Tabela 6.39: IETs do Sistema de 39 Barras a 100% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
22	-9668	230,737	8	0,935	7	0,0877	24	9,982	-1,297
19	-8689	214,185	7	0,925	8	0,0860	16	8,785	11,228
13	-7690	226,326	4	0,894	5	0,0824	18	6,159	21,567
11	-7453	223,79	5	0,788	6	0,0818	6	5,604	22,839
2	-6539	199,767	15	0,776	12	0,0757	15	4,919	38,673
17	-5230	199,34	14	0,747	4	0,0711	21	2,783	46,229
14	-4903	200,407	12	0,732	11	0,0706	12	2,202	53,674
10	-3102	245,465	6	0,727	13	0,0660	27	2,026	62,29
6	-2391	196,5	18	0,67	14	0,0656	25	1,915	65,255
5	-1816	193,075	27	0,662	10	0,0637	4	1,57	65,659

Na Tabela 6.39 com aumento de carga correspondente a 100% do máximo encontrado pelo FPC, observa-se índices M e β negativos em todas as barras listadas e todas as outras do sistema não mostradas na tabela. Isso indica, certamente, operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV. Os índices L e o vetor tangente diluem a responsabilidade entre as dez barras listadas. O menor autovalor é negativo e aponta para a barra 24 mas com pouca ênfase, diluindo a responsabilidade entre outras barras listadas e todas as outras do sistema.

O método IL e VT para todos os níveis de carregamento identificam constantemente as barras 4, 5, 7, 8, 15 como as barras mais críticas, sendo estas localizadas no ramal onde predominam as barras de carga.

O método da matriz D' identifica barras de tensão controlada como barras mais críticas do sistema, ou seja, indica barras da área com predominância de geração. Este fato não pode ser capturado pelos demais índices que, como já mencionado, só classificam barras do tipo PQ.

Outro ponto a ser observado é a discrepância entre o conjunto de barras identificado pelos autovalores e autovetores e os conjuntos de barras apontados pelos métodos IL e VT, como já notado na Seção 6.3.

6.5.

Sistema de 57 Barras

O sistema *IEEE 57* barras é uma área do sistema interligado dos Estados Unidos (Midwestern US) no início da década dos 1960's. Este sistema é formado por 7 barras do tipo PV, com geração ativa, e as demais barras do tipo PQ. Possui cargas em quase todos os barramentos e uma forte ligação entre todas as suas barras, o que permite caracterizá-lo como uma grande malha. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão, ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas no Apêndice A3. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [16].

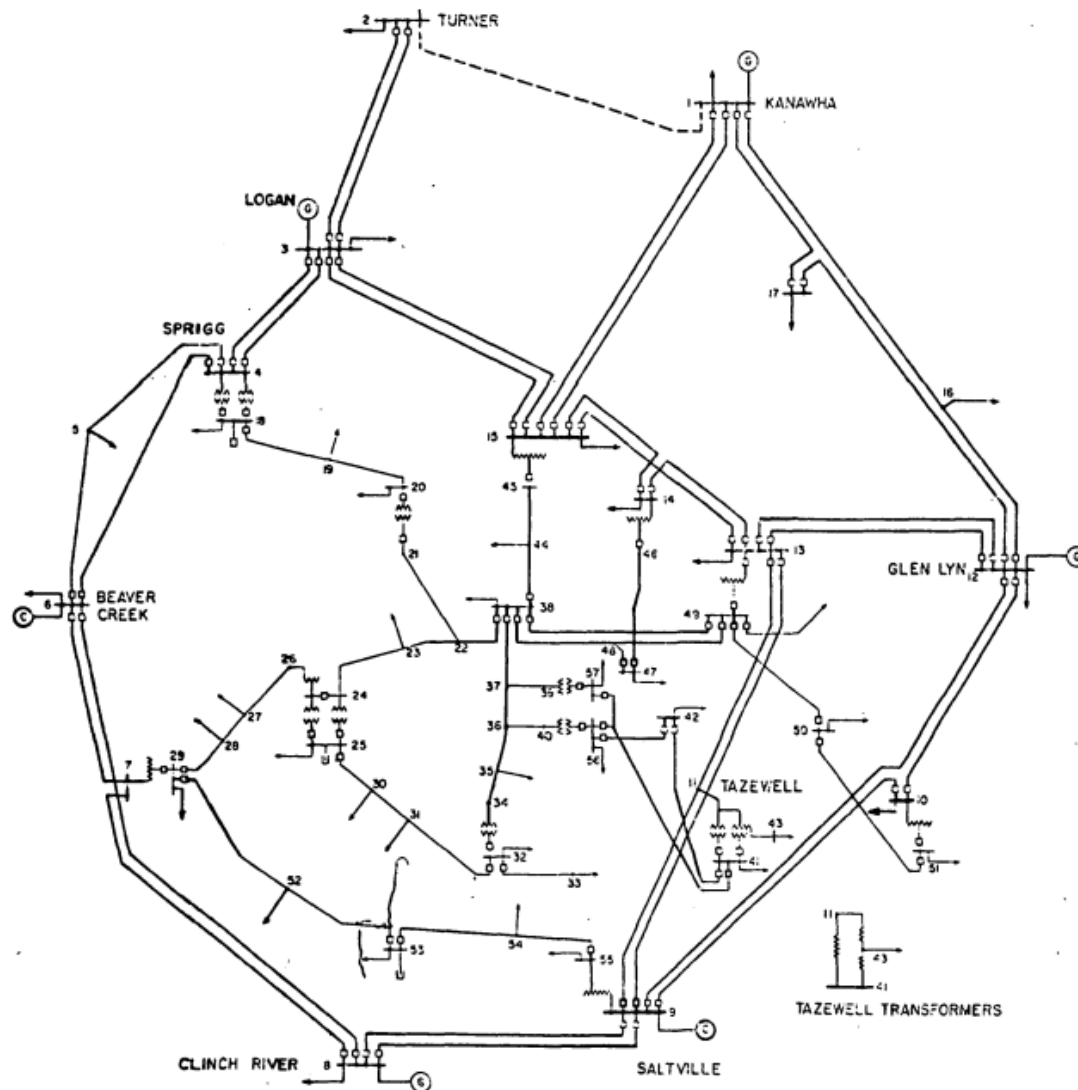


Figura 6.10: Diagrama Unifilar do Sistema de 57 Barras

Na Figura 6.11 e as Tabelas 6.40 até 6.48 apresentam resultados obtidos para um sistema de 57 barras. Estes resultados são obtidos a partir de testes realizados com diferentes carregamentos do sistema.

Observado o comportamento do FPC na Figura 6.11, nota-se que a faixa entre a parte superior e inferior da curva no plano λV é muito estreita, com uma diferença de aproximadamente 0,002 pu no eixo da tensão e, além disso, a diferença entre a tensão no ponto de carregamento base e a tensão no ponto de máximo carregamento, está na ordem de 0,02 pu. Além disso, o formato da curva indica que pode ser difícil para o método do fluxo de potência continuado chegar ao verdadeiro ponto de máximo carregamento.

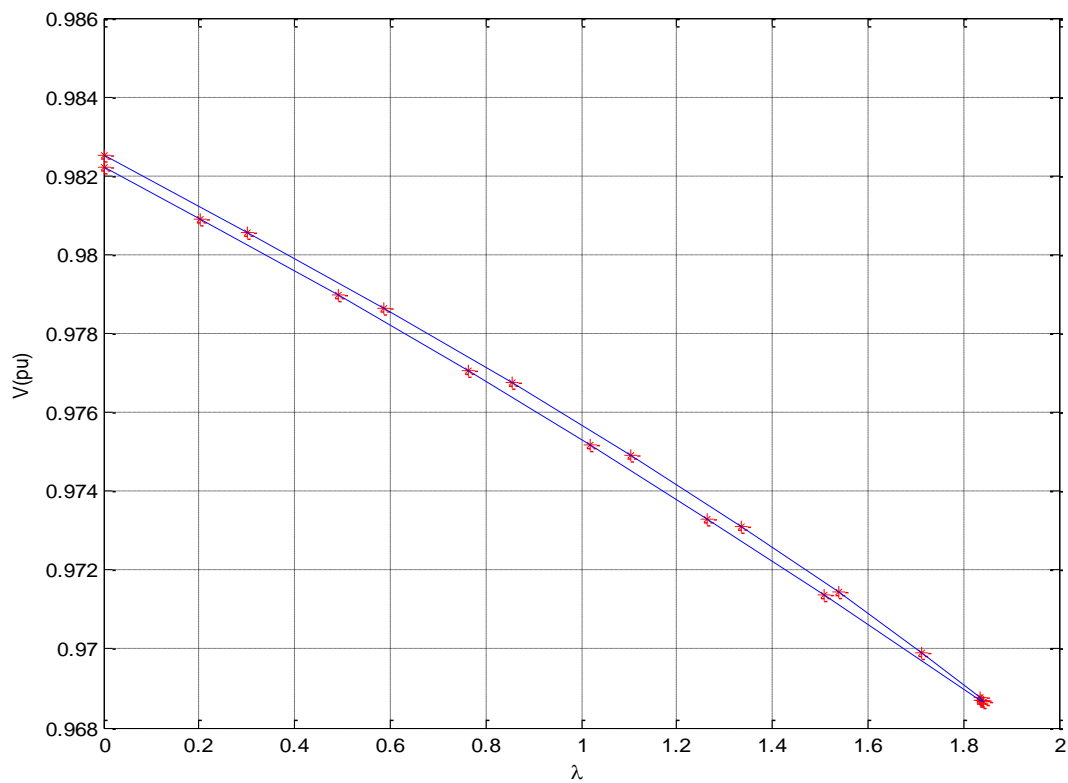


Figura 6.11: FPC Aplicado ao Sistema de 57 Barras

Tabela 6.40: IETs do Caso-Base do Sistema de 57 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
8	82,165	74,756	31	0,322	31	0,0974	23	26,145	0,234
1	90,67	82,974	33	0,291	33	0,0888	36	9,499	0,615
18	91,836	97,038	32	0,289	32	0,0876	35	9,202	0,869
31	91,968	102,865	30	0,288	30	0,085	32	5,867	1,024
53	92,5	89,61	25	0,263	25	0,0751	41	5,741	1,219
12	93,237	91,414	57	0,201	34	0,0665	31	5,146	1,574
9	93,473	82,397	34	0,186	57	0,0633	42	4,956	2,434
6	93,919	84,047	56	0,185	35	0,0626	33	1,48	3,144
25	94,193	102,4	35	0,176	56	0,0587	47	0,918	3,449
33	94,248	100,93	42	0,171	40	0,0577	7	0,66	3,796

Tabela 6.41: IETs do Sistema de 57 Barras a 60 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
8	80,33	74,254	31	0,375	31	0,128	39	11,495	0,223
1	89,668	82,568	33	0,338	33	0,1156	36	9,423	0,6
31	90,494	104,845	32	0,334	32	0,1141	35	8,963	0,856
18	90,875	97,949	30	0,334	30	0,1125	40	5,375	0,996
53	91,52	90,341	25	0,303	25	0,1001	38	2,924	1,198
12	92,397	92,264	57	0,229	34	0,0814	47	0,907	1,549
33	92,693	102,561	34	0,213	35	0,076	7	0,646	2,395
9	92,843	82,556	56	0,211	57	0,075	49	0,599	3,098
6	93,225	84,307	35	0,201	40	0,0697	44	0,553	3,396
25	93,237	104,36	42	0,195	56	0,0696	11	0,513	3,694

Tabela 6.42: IETs do Sistema de 57 Barras a 80 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
32	-2154	112,427	31	0,632	31	0,1641	23	26,659	0,171
33	-840	111,505	33	0,557	33	0,1456	35	8,647	0,536
8	73,936	72,631	32	0,55	32	0,1437	41	5,535	0,8
31	82,233	115,813	30	0,549	30	0,1434	42	4,791	0,878
1	85,95	81,105	25	0,488	25	0,1271	31	4,389	1,113
18	87,323	101,367	57	0,348	34	0,0936	34	3,371	1,451
53	87,705	93,275	34	0,327	35	0,086	38	2,91	2,235
25	88,224	114,455	56	0,318	57	0,0818	44	2,304	2,876
12	89,082	95,554	35	0,305	40	0,078	52	2,083	3,172
9	90,059	83,365	42	0,291	36	0,0778	15	1,819	3,294

Nas Tabelas 6.40 e 6.41 não se observa indicações de problemas. Entretanto, na Tabela 6.42 aparecem margens negativas para as barras 32 e 33 e β s positivos, o que é uma impossibilidade teórica, como será comentado e mostrado posteriormente. Os outros índices nada indicam.

Tabela 6.43: IETs do Sistema de 57 Barras a 90 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
32	-3401	122,328	31	0,861	31	0,205	39	11,036	0,13
33	-1347	121,208	33	0,742	33	0,178	35	7,399	0,494
8	70,723	71,987	32	0,731	30	0,177	42	3,979	0,753
31	72,34	127,542	30	0,73	32	0,176	31	3,501	0,804
25	82,592	124,364	25	0,638	25	0,156	44	3,114	1,059
1	83,929	80,361	57	0,427	34	0,104	38	2,481	1,391
18	85,385	103,271	34	0,407	35	0,093	15	1,667	2,126
53	85,452	95,093	56	0,389	24	0,084	32	1,034	2,666
30	85,767	125,637	35	0,377	57	0,084	46	0,757	3,011
12	87,092	97,556	42	0,354	40	0,084	24	0,644	3,094

Tabela 6.44: IETs do Sistema de 57 Barras a 95 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
32	-2741	132,529	31	1,057	31	0,315	40	13,996	0,097
33	-1084	131,452	33	0,89	30	0,265	37	10,644	0,466
31	62,383	139,318	32	0,876	33	0,259	23	7,864	0,703
8	69,094	71,827	30	0,876	32	0,256	36	6,289	0,77
25	77,615	134,095	25	0,754	25	0,229	42	6,038	1,024
30	80,751	136,247	57	0,477	34	0,117	41	2,625	1,354
1	82,854	80,004	34	0,461	35	0,100	33	2,369	2,048
53	84,228	96,208	56	0,433	24	0,100	10	2,125	2,478
18	84,358	104,328	35	0,425	26	0,089	56	1,084	2,907
12	85,937	98,899	42	0,393	36	0,086	53	0,582	2,997

Na Tabela 6.44, o índice L maior que 1 indica problemas na barra 31. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 40 e 37 mas sem ênfase.

Tabela 6.45: IETs do Sistema de 57 Barras a 97 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
31	57,329	147,677	31	1,178	31	0,334	34	13,41	0,077
33	58,009	139,206	33	0,978	30	0,280	40	12,476	0,452
8	68,424	71,909	30	0,963	33	0,272	23	6,668	0,668
25	75,828	141,189	32	0,962	32	0,269	36	5,319	0,757
32	79,546	140,217	25	0,821	25	0,240	24	4,229	1,007
30	80,588	143,905	57	0,501	34	0,117	57	4,148	1,337
1	82,4	79,89	34	0,489	24	0,101	39	3,155	2
53	83,713	96,779	56	0,453	35	0,099	41	2,332	2,364
18	83,928	104,805	35	0,448	26	0,090	10	1,877	2,859
12	85,406	99,716	42	0,411	36	0,084	44	1,328	2,952

Na Tabela 6.45, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter o mesmo sinal (e positivo). O índice L maior que 1 indica problemas na barra 31. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 34 e 40 mas sem ênfase.

Tabela 6.46: IETs do Sistema de 57 Barras a 98 % do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
32	-2447	144,763	31	1,261	31	0,342	34	13,253	0,065
33	-983	143,844	33	1,036	30	0,252	40	12,227	0,445
31	48,084	152,318	30	1,02	33	0,259	32	6,272	0,649
8	68,082	72,022	32	1,018	32	0,282	57	5,118	0,751
25	69,99	145,417	25	0,864	25	0,227	36	5,065	0,998
30	71,213	148,352	57	0,514	34	0,168	39	3,128	1,328
1	82,163	79,85	34	0,506	24	0,103	31	2,939	1,972
53	83,401	97,122	56	0,465	35	0,094	15	2,739	2,306
18	83,706	105,065	35	0,462	26	0,098	33	2,388	2,835
12	85,111	100,257	42	0,421	36	0,082	41	2,282	2,93

Na Tabela 6.46, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter sinais opostos. O índice L maior que 1 indica problemas nas barras 30, 31, 32 e 33. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 34 e 40 mas sem ênfase.

Tabela 6.47: IETs do Sistema de 57 Barras a 99% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
31	42,860	160,519	31	1,377	31	0,334	37	9,781	0,046
33	60,437	152,662	33	1,116	30	0,2802	56	5,865	0,434
8	67,706	72,466	30	1,099	33	0,2727	57	5,532	0,619
25	68,165	153,455	32	1,095	32	0,269	36	4,817	0,743
30	73,443	156,546	25	0,923	25	0,2409	15	2,778	0,985
1	81,907	79,885	57	0,53	34	0,1177	41	2,279	1,315
32	82,658	153,365	34	0,526	24	0,1017	44	1,496	1,921
53	83,117	97,709	35	0,479	35	0,0996	35	0,714	2,218
18	83,472	105,421	56	0,478	26	0,0907	48	0,685	2,803
12	84,737	101,401	40	0,433	36	0,0849	38	0,339	2,901

Na Tabela 6.47, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter sinais iguais (e positivos). Os valores não indicam proximidade do máximo carregamento. O índice L maior que 1 indica problemas nas barras 30, 31, 32 e 33. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 37 mas sem ênfase.

Tabela 6.48: IETs do Sistema de 57 Barras a 100% do Carregamento Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
45	#####	-35,422	31	1,709	31	0,3542	40	12,92	-0,003
48	-2E+10	-131,324	33	1,324	30	0,2952	37	10,989	0,415
46	-2E+10	-57,283	30	1,309	33	0,2859	32	6,113	0,547
21	-5E+09	-119,443	32	1,296	32	0,282	36	4,421	0,73
39	-2E+09	-156,751	25	1,072	25	0,2527	39	3,549	0,961
40	-4E+08	-159,261	34	0,569	34	0,1168	42	2,864	1,292
34	-2E+06	-168,567	57	0,555	24	0,1023	41	2,404	1,753
13	-25834	-3,788	35	0,513	35	0,0974	43	1,424	2,065
41	-17675	-1,37	56	0,5	26	0,0908	35	0,822	2,745
14	-13231	-21,084	40	0,46	36	0,0822	48	0,763	2,851

Na Tabela 6.48 os índices M e β todos negativos indicam que esse ponto de operação encontra-se na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV. Os índices L maiores que 1 nas barras 25, 30, 31, 32 e 33 indicam ultrapassagem ao ponto de máximo carregamento. Um autovalor próximo de 0 e negativo indica o mesmo e

aponta, sem ênfase, para as barras 37 e 40. O vetor tangente aponta, basicamente, para as mesmas barras apontadas pelo índice L.

Nas Tabelas 6.42, 6.43, 6.44 e 6.46 referentes, respectivamente a 80, 90, 95 e 98% do carregamento máximo, observa-se para as barras 32 e 33 índices $M < 0$ e $\beta > 0$ (já nas Tabelas 6.45 e 6.47 referentes, respectivamente a 97 e 99% do carregamento máximo, observa-se $M > 0$ e $\beta > 0$).

Teoricamente, não existe a possibilidade de ter-se M e β com sinais diferentes. Por exemplo, quando $\det[D']V_i > 0$ então $M > 0$ e $\beta > 0$. Isto por que:

$$\det[D']V_i = (|\dot{V}P| |\dot{V}Q| \sin\beta) V_i \quad (6.1)$$

Logo, β tem o mesmo sinal de $\det[D']$. Por outro lado:

$$\det[D']V_i = S_m^2 - S_i^2 \quad (6.2)$$

Logo, $S_m^2 > S_i^2$. Como M é definida a partir de $S_m^2 - S_i^2$, então M tem o mesmo sinal de $\det[D']$.

Conclui-se, então que a ocorrência de índices M e β com sinais opostos deve-se a fatores numéricos associados aos cálculos.

Tome-se como exemplo, a barra 32 no ponto de operação referente a 95% do carregamento máximo. Na Tabela 6.44 observa-se $M = -2741\%$ e $\beta = 132,529^\circ$. As grandezas e respectivos valores utilizados para chegar a esses índices são:

$$S_i = 0,031323960772629;$$

$$S_i^2 = 0,0009811905184852103;$$

$$\det[D] = 128,9891086966479;$$

$$\det[D'] = 0,249127640656503 \text{ a partir da matriz } D';$$

$$S_{io}^2 = 85,608905822528627 \text{ onde } S_{io}^2 = V_i^4 Y_{ii}^2;$$

$$\Delta\det = 128,7399810559914 \text{ onde } \Delta\det = \det[D] - \det[D'];$$

$$\Delta\det V_i = 86,293395780809831;$$

$S_m^2 = 0,684489958281205$ onde $S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det V_i$;
 $S_m = -0,827339083013250$ onde $S_m = \text{senal}(S_{io}^2 - \Delta \det V_i) * \sqrt{|S_{io}^2 - \Delta \det V_i|}$;
 $M = -2741,23393991517101\%$ onde $M = (S_m - S_i)/S_i$;
 $\beta = 132,5295819293579^\circ$ a partir da matriz D' .

Com as grandezas e valores, calcula-se:

$$S_{io}^2 - \det[D]V_i - S_i^2 = -0.852459445044358$$

Teoricamente esse valor deveria ser nulo. Isto por que:

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

$$\det[D'] = S_{io}^2 - (\det[D]V_i - \det[D']V_i) - S_i^2$$

$$0 = S_{io}^2 - \det[D]V_i - S_i^2$$

Como S_i é um valor dado o erro S_i^2 é muito pequeno. Já o valor de $\det[D]$ é calculado a partir dos quatro elementos da matriz Jacobiana. Por outro lado, S_{io}^2 é calculado utilizando V_i^4 , onde V_i é resultado da convergência do algoritmo de fluxo de carga, que envolve certas tolerâncias, e utilizando Y_{ii}^2 , resultado da soma das admitâncias das linhas conectadas à barra i .

Assumindo, a título de ilustração, que o erro de $-0,852459445044358$ deve-se à parcela S_{io}^2 , atualiza-se:

$$\begin{aligned}
 S_{io}^2 &= 85,608905822528627 + 0,852459445044358 \\
 &= 86,461365267572987
 \end{aligned}$$

agora $S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det V_i$, fica

$$\begin{aligned}
 S_m^2 &= 86,461365267572987 - 128,7399810559914(0,670292127379444) \\
 &= 0,167969486763198
 \end{aligned}$$

$$S_m = 0,409840806610564$$

$$\begin{aligned}
 M &= 0,409890280097982 - 0,031323960772629/0,409890280097982 \\
 &= 0.923579644862178 * 100 \\
 &= 92,36\%
 \end{aligned}$$

A margem mudou de -2741 para $+92\%$.

No caso analisado, tem-se os valores de S_{io}^2 e $\det[D]V_i$ muito parecidos (aprox. 86) e muito maiores que o valor de S_i^2 (aprox. 0,001). O valor de S_m^2 fica próximo de zero e de S_i^2 . Um erro de arredondamento pode fazer com que S_m^2 seja positivo ou negativo. E ainda, como $S_m - S_i$ é dividido por S_m (se $\det[D'] > 0$) ou S_i (se $\det[D'] < 0$), ambos muito pequenos, o valor da margem M pode variar em uma grande faixa.

Assim, mostrou-se que os erros derivados dos cálculos numéricos podem introduzir resultados errados, do ponto de vista teórico, e podem fazer com que os valores dos índices, principalmente M , sejam muito sensíveis.

Obviamente, os outros métodos podem apresentar o mesmo problema, dependendo dos cálculos numéricos necessários em cada um deles.

6.6.

Sistema de 118 Barras

O sistema *IEEE* 118 barras mostrado na Figura 6.12 é uma área do sistema interligado dos Estados Unidos (Midwestern US) em dezembro de 1962, formado por 54 barras PV, das quais 14 possuem compensação estática, 19 possuem geração de potência ativa e 30 possuem compensação síncrona. O sistema *IEEE* 118 é um sistema que contém uma estrutura variada, desde áreas muito malhadas, até ramais formados só por uma linha de transmissão. As informações de circuitos, das barras (com valores de tensão em módulo e ângulo) e fluxos de potência convergidos para o caso-base podem ser vistas no Apêndice A4. Maiores informações sobre este sistema podem ser encontradas em [16].

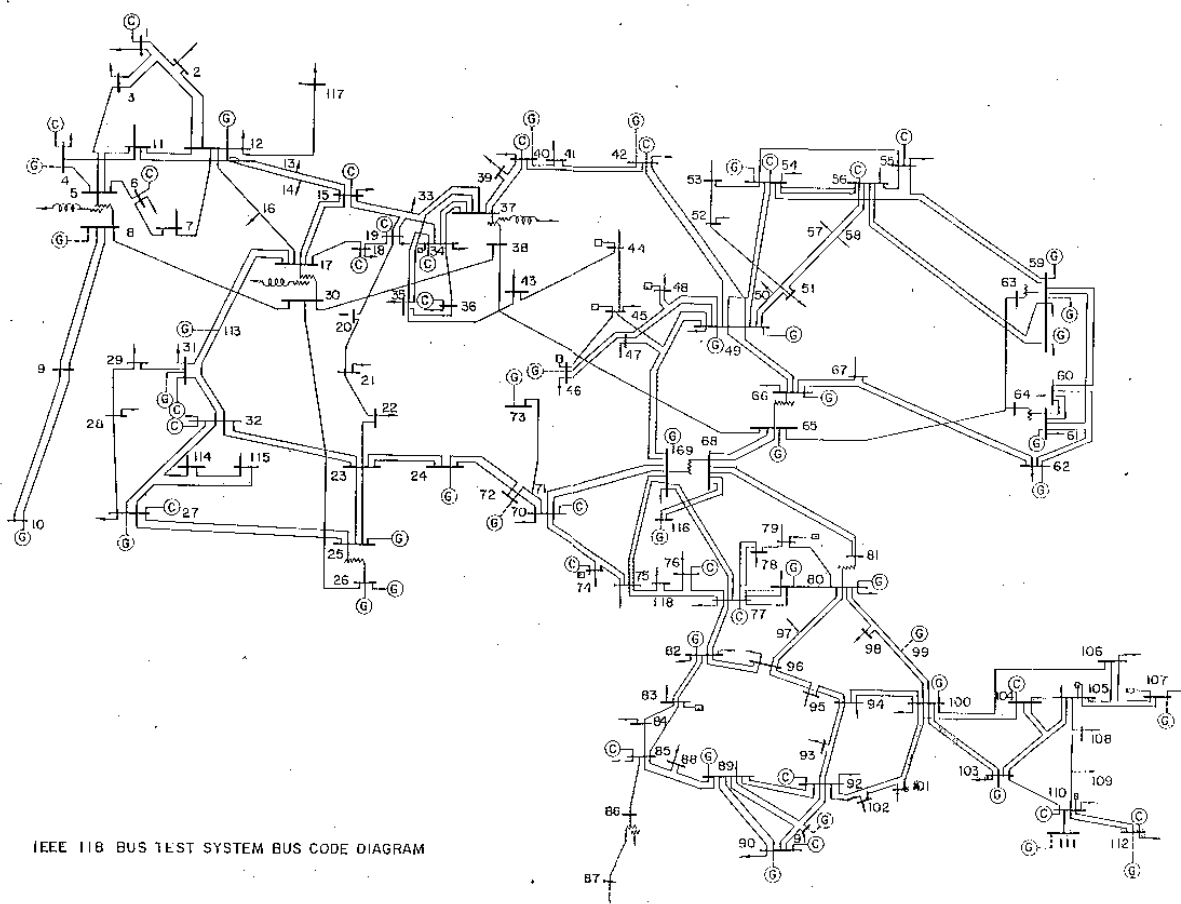


Figura 6.12: Diagrama Unifilar do Sistema de 118 Barras

A Figura 6.13 e as Tabelas 6.49 até 6.57 apresentam resultados obtidos para o sistema de 118 barras. Estes resultados são obtidos a partir de testes realizados com diferentes carregamentos do sistema.

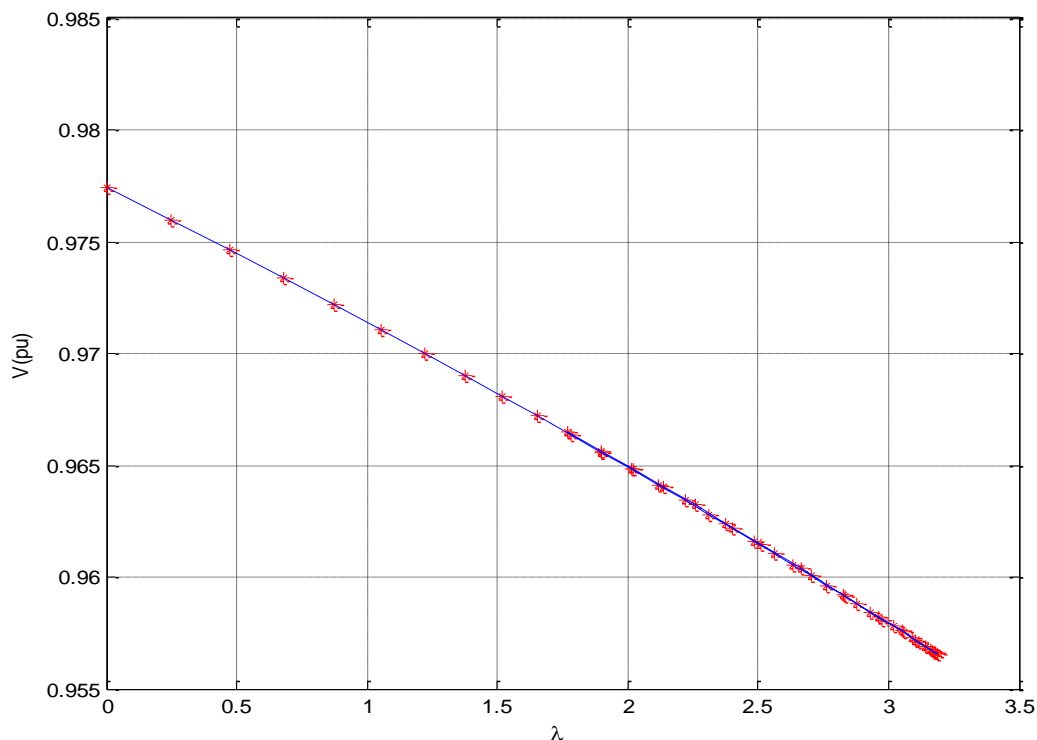


Figura 6.13: FPC Aplicado ao Sistema de 118 Barras

O formato da curva na Figura 6.13 indica dificuldades para o algoritmo de FPC achar o máximo carregamento. Além disso, a parte inferior da curva é praticamente coincidente com a parte superior.

Tabela 6.49: IETs do Caso-Base do Sistema de 118 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
89	70,360	75,142	44	0,075	44	0,033	64	42,457	4,232
46	76,653	86,525	43	0,062	45	0,0240	44	36,347	5,934
8	77,363	82,900	45	0,061	43	0,021	22	19,47	6,334
24	79,324	84,229	95	0,059	96	0,017	52	8,512	7,506
25	82,203	77,370	21	0,058	94	0,016	21	5,225	9,28
62	84,087	82,881	20	0,052	95	0,015	20	3,351	12,31
66	85,272	83,832	96	0,049	83	0,015	61	1,218	18,41
10	87,086	68,599	22	0,048	52	0,015	23	0,833	19,78
80	88,358	80,244	82	0,047	82	0,011	38	0,015	20,63
100	88,457	77,108	52	0,046	53	0,09	33	0,009	22,73

Na Tabela 6.49 observa-se que todos os métodos indicam operação normal no caso-base. O método da matriz D' lista as dez barras com menor margem como barras de tensão controlada.

Tabela 6.50: IETs do Sistema de 118 Barras a 60% do Carregamento
Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	25,37	52,179	44	0,149	44	0,018	64	34,527	3,677
69	43,721	77,884	45	0,125	45	0,016	23	31,257	4,438
89	48,886	74,165	95	0,109	22	0,014	44	0,483	5,056
26	63,97	72,213	43	0,103	21	0,014	41	0,151	6,616
90	73,421	87,39	52	0,095	38	0,012	47	0,104	8,668
25	75,642	74,444	21	0,094	43	0,012	71	0,072	11,018
112	77,536	71,81	96	0,093	95	0,011	43	0,068	11,043
42	79,134	100,162	82	0,091	20	0,009	52	0,066	11,239
66	80,851	82,203	53	0,082	52	0,009	81	0,043	12,369
107	81,313	87,779	83	0,08	9	0,009	51	0,042	13,087

Tabela 6.51: IETs do Sistema de 118 Barras a 80% do Carregamento
Máximo

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	12,244	39,29	44	0,224	44	0,018	45	16,701	3,385
69	26,446	81,786	45	0,186	38	0,017	63	12,191	4,024
89	37,418	74,644	95	0,155	45	0,015	64	10,593	4,831
26	51,85	69,756	43	0,15	22	0,015	51	0,67	6,438
8	63,861	91,452	21	0,139	21	0,014	23	0,511	8,241
90	64,528	90,988	52	0,133	43	0,012	93	0,124	10,296
25	66,311	73,703	96	0,13	30	0,010	52	0,111	10,763
42	66,705	111,294	82	0,128	9	0,009	75	0,065	11,094
112	69,282	71,055	22	0,116	20	0,009	68	0,015	12,173
107	73,927	90,066	53	0,114	95	0,008	50	0,009	13,023

Tabela 6.52: IETs do Sistema de 118 Barras a 90% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	6,822	32,276	44	0,277	44	0,020	45	37,248	3,171
69	19,183	85,701	45	0,227	38	0,020	68	6,591	3,705
89	32,598	75,365	43	0,181	45	0,016	43	2,667	4,707
26	44,569	72,147	95	0,18	22	0,014	53	0,852	6,344
8	50,359	102,051	21	0,168	21	0,013	23	0,522	8,006
42	55,692	122,655	52	0,155	43	0,012	51	0,071	9,716
90	60,091	92,967	96	0,151	30	0,011	63	0,05	10,625
25	60,142	75,696	82	0,148	20	0,009	81	0,043	11,017
112	64,975	70,488	22	0,14	9	0,008	67	0,027	12,071
107	69,938	91,188	53	0,132	47	0,007	37	0,02	12,827

Tabela 6.53: IETs do Sistema de 118 Barras a 95% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	4,221	29,679	44	0,315	38	0,022	45	57,516	3,011
69	15,762	88,639	45	0,255	44	0,021	58	5,585	3,45
89	30,366	75,912	43	0,2	45	0,016	68	0,972	4,645
26	39,331	79,087	95	0,194	22	0,014	30	0,812	6,296
8	40,615	114,756	21	0,186	43	0,013	79	0,126	7,882
42	45,49	135,004	52	0,166	21	0,013	78	0,064	9,275
25	55,444	80,237	96	0,162	30	0,011	81	0,049	10,554
90	57,858	94,003	82	0,159	20	0,008	20	0,038	10,98
112	62,758	70,129	22	0,156	47	0,007	53	0,016	12,019
49	65,077	115,78	53	0,141	9	0,007	64	0,012	12,723

Tabela 6.54: IETs do Sistema de 118 Barras a 97% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	3,139	30,248	44	0,335	38	0,023	45	70,031	2,906
69	14,36	90,07	45	0,27	44	0,022	75	2,127	3,294
89	29,496	76,183	43	0,21	45	0,017	30	0,58	4,621
8	34,955	124,64	95	0,199	43	0,014	64	0,305	6,276
26	36,007	87,379	21	0,194	22	0,013	71	0,14	7,831
42	38,266	144,356	52	0,17	21	0,012	20	0,019	9,023
25	52,364	85,287	96	0,166	30	0,011	37	0,014	10,524
90	56,956	94,425	22	0,164	20	0,008	78	0,008	10,967
49	60,86	123,69	82	0,163	47	0,007	50	0,007	11,998
112	61,854	69,964	53	0,145	9	0,006	21	0,003	12,683

Tabela 6.55: IETs do Sistema de 118 Barras a 98% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	2,552	32,219	44	0,348	38	0,024	45	79,46	2,818
69	13,624	90,829	45	0,279	44	0,023	30	0,462	3,192
89	29,063	76,335	43	0,216	45	0,017	71	0,199	4,609
8	31,047	132,353	95	0,202	43	0,015	23	0,098	6,266
42	32,636	151,503	21	0,199	22	0,013	44	0,063	7,805
26	33,485	95,995	52	0,172	21	0,012	39	0,031	8,86
25	49,968	90,431	96	0,168	30	0,011	50	0,009	10,51
90	56,501	94,636	22	0,168	20	0,008	35	0,006	10,961
49	57,701	130,508	82	0,165	47	0,007	53	0,005	11,987
40	60,728	86,674	20	0,148	23	0,005	22	0,001	12,664

Tabela 6.56: IETs do Sistema de 118 Barras a 99% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
10	1,873	38,992	44	0,365	38	0,0259	43	65,882	2,632
69	12,796	91,554	45	0,29	44	0,0249	45	3,168	3,07
42	23,293	162,098	43	0,224	45	0,0181	23	1,234	4,599
8	25,258	144,199	21	0,205	43	0,0162	63	0,468	6,256
89	28,628	76,503	95	0,205	22	0,0116	44	0,351	7,779
26	29,285	113,656	52	0,175	21	0,0106	35	0,072	8,647
25	45,839	101,459	22	0,173	30	0,0105	52	0,041	10,495
49	52,147	142,579	96	0,17	47	0,007	28	0,035	10,956
40	55,221	86,37	82	0,168	20	0,0068	68	0,016	11,977
34	55,292	159,313	20	0,151	37	0,0049	33	0,015	12,645

Nas Tabelas 6.50 a 6.56, o método da matriz D' só aponta para barras de tensão controlada, com destaque para a barra 10, uma barra de geração remota. Na Tabela 6.57 o método indica a completa deterioração do sistema. Todas as barras têm índices negativos. Um autovalor negativo indica a mesma situação e aponta para a barra 44, uma barra de carga em fim de ramal. Os índices L e VT nada indicam.

Tabela 6.57: IETs do Sistema de 118 Barras a 100% do Carregamento**Máximo**

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
9	-2E+16	-3,891	44	0,407	38	0,028	44	83,179	-0,468
5	-1E+13	-4,168	45	0,317	44	0,0276	57	3,883	2,877
71	-2E+11	-48,758	43	0,241	45	0,0192	43	0,274	4,594
30	-4E+10	-1,014	21	0,215	43	0,0183	35	0,014	6,246
37	-1E+10	-0,564	95	0,208	30	0,0102	23	0,007	7,446
38	-9E+08	-0,64	22	0,182	22	0,01	37	0,006	7,753
75	-6922	-29,963	52	0,176	21	0,0091	84	0,006	7,821
73	-2657	-65,933	96	0,173	47	0,0065	17	0,001	10,48
74	-1424	-37,912	82	0,17	20	0,0059	14	0	10,964
23	-1373	-2,935	20	0,157	37	0,0052	97	0	11,966

Os métodos IL e VT nos testes para todos os níveis de carregamento identificam as barras 44, 45 e 43 como as barras mais críticas do sistema, mas com pouca ênfase. Essas três barras são barras de carga e interligadas ao sistema apenas por uma linha de transmissão (circuito simples), enquanto a maioria dos ramos do sistema é formada por circuitos duplos. Outras barras de iguais características não são apontadas, pois possuem compensação reativa, como é o caso das barras 87 e 88 por exemplo. O método dos autovalores também identifica como barras críticas as barras 44 e 45 na maioria dos casos, porém não aponta a barra 43 em nenhum deles.

O método da matriz D' identifica barras tipo PV, para todos os níveis de carregamento, e mostra a barra 10 como a barra mais crítica do sistema para quase todos os níveis. Esta barra encontra-se no extremo final de um ramal muito longo. As barras 69 e 89, que aparecem na segunda e terceira posições de criticidade, estão numa condição totalmente diferente, encontrando-se no centro de duas áreas bem malhadas, com mais de oito circuitos em cada barra.

6.7. Testes com Limites de Geração no Sistema de 118 Barras

Consideram-se agora os limites de geração de potência reativa. Nas Tabelas 6.58 a 6.61 apresentam-se os resultados. A cor azul, usada para identificar as barras tipo PV nas colunas referentes aos índices do método da matriz D' , vai continuar sendo usada. Entretanto, algumas barras tipo PV vão virar barras tipo PQ devido à inclusão dos limites de geração. Optou-se por usar a cor azul para essas barras nas colunas associadas aos outros métodos que só calculam índices para barras tipo PQ.

Tabela 6.58: IETs com Limites de Geração no Caso-Base do Sistema de 118 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
89	70,360	75,142	44	0,075	44	0,033	64	42,457	4,232
46	76,653	86,525	43	0,062	45	0,0240	44	36,347	5,934
8	77,363	82,900	45	0,061	43	0,021	22	19,47	6,334
24	79,324	84,229	95	0,059	96	0,017	52	8,512	7,506
25	82,203	77,370	21	0,058	94	0,016	21	5,225	9,28
62	84,087	82,881	20	0,052	95	0,015	20	3,351	12,31
66	85,272	83,832	96	0,049	83	0,015	61	1,218	18,41
10	87,086	68,599	22	0,048	52	0,015	23	0,833	19,78
80	88,358	80,244	82	0,047	82	0,011	38	0,015	20,63
100	88,457	77,108	52	0,046	53	0,09	33	0,009	22,73

No caso-base, Tabela 6.58, os resultados são idênticos ao teste sem limites de geração, já que nenhum limite foi violado.

Tabela 6.59: IETs com Limites de Geração a 60% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
89	48.058	70.577	76	0.381	76	0,501	30	42,457	4,232
8	52.530	85.445	118	0.346	117	0,244	96	36,347	5,934
46	54.813	86.659	74	0.296	45	0,234	45	19,47	6,334
24	59.170	85.184	43	0.294	44	0,213	23	8,512	7,506
66	63.196	81.644	20	0.281	74	0,090	51	5,225	9,28
25	64.790	74.410	44	0.278	43	0,078	21	3,351	12,31
62	68.389	84.661	75	0.259	21	0,054	50	1,218	18,41
1	70.494	90.976	21	0.259	1	0,0045	22	0,833	19,78
6	75.474	83.377	1	0.255	20	0,0019	38	0,015	20,63
80	76.666	77.35	33	0.253	37	0,0012	53	0,009	22,73

A 60% do máximo carregamento, nas barras 1, 6, 8, 12, 15, 18, 19, 32, 34, 36, 46, 49, 55, 56, 59, 62, 65, 70, 74, 76, 77, 80, 85, 92, 100, 103, 104, 105 e 110 a geração de potência reativa atingiu o limite superior e, assim, viraram barras tipo PQ. Na Tabela 6.60, nota-se como algumas barras PV que viraram PQ foram identificadas pelos métodos IL e VT.

Aqui, entenda-se como máximo carregamento aquele do caso anterior, sem limites de geração.

Tabela 6.60: IETs com Limites de Geração a 65% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
89	44,268	69,262	1	0,626	2	0,745	50	32,344	6,635
8	44,299	88,310	117	0,579	118	0,432	23	31,243	6,932
46	48,103	87,209	3	0,576	1	0,343	12	22,432	7,877
1	50,553	93,175	2	0,565	3	0,211	41	7,324	7,943
24	54,742	85,556	13	0,519	14	0,043	51	6,234	10,358
66	56,729	81,009	7	0,496	5	0,065	9	3,456	15,751
25	60,836	74,101	12	0,491	17	0,054	96	1,974	19,476
62	65,525	85,045	6	0,489	7	0,0035	5	0,065	20,574
107	73,111	79,655	11	0,487	11	0,0029	3	0,032	24,647
100	73,829	85,129	14	0,476	15	0,0022	8	0,021	25,746

A 65% do máximo carregamento, Tabela 6.60, nas barras 4, 99, 54 e 107 a geração de potência reativa atingiu o limite superior e, assim, viraram barras tipo PQ.

Tabela 6.61: IETs com Limites de Geração a 66% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras

Matriz D'			Índice L		Vetor Tangente		Autovalor/vetor/Fator de Participação		
Barra	M (%)	β (graus)	Barra	L	Barra	VT	Barra	FP (%)	Λ
89	43,430	68,868	10	0,500	9	0,138	56	4,179	1,432
46	47,513	87,271	76	0,490	10	0,096	44	2,883	3,764
8	51,572	87,529	53	0,475	55	0,032	60	0,344	5,834
24	54,425	85,473	118	0,440	76	0,012	94	0,054	8,029
66	56,185	80,865	52	0,435	30	0,011	68	0,051	10,927
1	58,685	90,839	55	0,431	44	0,01	52	0,050	10,374
25	61,291	74,294	56	0,422	118	0,0081	108	0,023	12,125
62	65,001	85,137	58	0,415	56	0,005	101	0,012	13,048
107	70,509	78,428	54	0,415	117	0,004	115	0,001	11,938
112	72,605	59,301	44	0,414	109	0,002	117	0,001	11,991

A 66% do máximo carregamento, Tabela 6.61, as barras 10 e 73 também viraram barras tipo PQ.

Pode-se observar que, para todos os pontos de operação do caso-base e a 60%, 65% e 66% do máximo carregamento, o método da matriz D' só identifica barras tipo PV (no caso-base). Com 66% da máxima carga, a pior margem M é igual a 43,430% e o ângulo β é igual 68,868 graus, indicando que o ponto de operação está longe do ponto de máximo carregamento.

Os métodos IL e VT identificam frequentemente as mesmas barras críticas. A 66% do máximo carregamento, o maior IL é igual a 0,5, também longe do máximo valor. Os fatores de participação identificam quatro barras tipo PQ que também foram identificadas pelos métodos IL e VT, mas sem nenhuma ênfase.

A 67% do máximo carregamento o algoritmo de Newton Rhapson é interrompido quando todos os geradores atingem seus limites superiores de geração de potência reativa. Conclui-se, então, que o limite de carregamento corresponde ao ponto de operação associado à Tabela 6.61. Nessa tabela nenhum índice indica a proximidade do máximo carregamento. Essa situação ocorre quando o máximo carregamento é atingido quando há perda do controle de tensão em uma ou mais barras causando a perda da convexidade da curva ϕ constante no plano SV. Isto é, um ponto de operação com duas derivadas diferentes, uma imediatamente antes da perda do controle de tensão e outra logo após. Por isso, na prática, recomenda-se incluir a perda do controle de tensão na lista de contingências.

6.8. Resumo dos Testes

A. Sistema de 6 Barras

Até 98% do máximo aumento de carga, nenhum método acusou problemas: observa-se na barra 5 $M=20\%$, $\beta=155^\circ$ e valores positivos também para as outras barras; $L=0,8$ e $\sigma=2,6$ com $FP=80\%$.

Para um aumento de carga de 100%, observa-se:

i) o método da matriz D' indica valores negativos para a margem e ângulo da barra 5, isto é, operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV para essa barra; os índices das outras barras não indicam qualquer problema.

ii) o método do índice L indica na barra 5 um valor maior que 1, o que significa o mesmo que índices negativos no método da matriz D' ; os índices das outras barras não indicam qualquer problema.

iii) o método do vetor tangente aponta para a barra 5 a responsabilidade de 0,63 na limitação da carga máxima e responsabilidades bem menores para as outras barras de carga.

iv) o autovalor -0,799 indica operação na parte inferior da curva da Figura 6.3; o fator de participação da barra 5 é de 86% e bem menores nas outras barras.

Todos os métodos apontam para a barra 5 como a maior responsável por não ser possível aumentar ainda mais a carga do sistema.

Pode-se concluir que todos os métodos funcionaram como deveriam.

B. Sistema de 14 Barras

Com 98% do máximo carregamento, o método da matriz D' indica que ponto de operação está muito próximo do máximo, já que $\beta = 179^\circ$. O índice L nada indica, já que nenhum valor é próximo de 1. O menor autovalor aproximou-se zero.

Para o ponto de operação referente ao maior carregamento que o FPC conseguiu encontrar, os índices derivados da matriz D' passaram para valores negativos em duas barras de tensão controlada. Os índices L continuaram sem apontar problema em barras de carga. O menor autovalor aproximou-se de zero, mas não se pode dizer que é quase nulo ou que adquiriu valor negativo. Esse autovalor é de uma matriz associada a barras de carga somente. O vetor tangente não apontou para nenhuma barra de carga.

Para esse sistema, pode-se dizer que somente o método da matriz D' apresentou resultados indicando o máximo carregamento.

C. Sistema de 30 barras

Com 98% do máximo carregamento, observam-se valores positivos para M e β não muito próximos dos valores correspondentes ao máximo carregamento, mesmo para a barra 30. Já o índice L para a barra 30 tem um valor muito próximo de 1. O vetor tangente aponta para a barra 30, mas sem grande ênfase. O menor autovalor, próximo de zero, não inclui a barra 30 entre as cinco mais influentes.

No máximo carregamento, o método da matriz D' aponta operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV nas cinco barras de carga listadas. O índice L aponta o mesmo para duas barras de carga 30 e 29. O vetor tangente também aponta, principalmente, para as barras 30 e 29. O menor autovalor negativo aponta operação na parte inferior e para a barra 27. As barras apontadas por mais de um método são 25, 26, 27, 29 e 30. Todas essas barras encontram-se no final do mesmo caminho de transmissão.

Pode-se dizer que todos os métodos tiveram resultados coerentes, indicando a situação de máximo carregamento e apontando para a mesma região.

D. Sistema de 39 Barras

Com 98% do máximo carregamento, observam-se índices M e β negativos em barra de tensão controlada. Os outros índices, todos para barras de carga, continuam positivos e afastados dos valores críticos.

Com aumento de carga correspondente a 100% do máximo, observam-se índices M e β negativos em todas as barras listadas e todas as outras do sistema não mostradas na tabela. Isso indica a completa deterioração do sistema. Os índices L e o vetor tangente diluem a responsabilidade entre as dez barras listadas. O menor autovalor é negativo e aponta para a barra 24, mas com pouca ênfase, diluindo a responsabilidade entre outras barras listadas e todas as outras do sistema.

São discrepantes o conjunto de barras identificado pelos autovalores e autovetores e os conjuntos de barras apontados pelos métodos IL e VT .

Pode-se dizer que o método da matriz D' e o menor autovalor indicaram o máximo carregamento. A comparação da localização das barras

entre esses dois métodos fica comprometida, pois todo o sistema está deteriorado com esse carregamento.

E. Sistema de 57 Barras

Com 80% da máxima carga, aparecem margens negativas para as barras 32 e 33 e β s positivos, o que é uma impossibilidade teórica, mas possível devido a erros numéricos. Os outros índices nada indicam.

Com 95% do máximo, o índice L maior que 1 indica problemas na barra 31. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 40 e 37 mas sem ênfase.

Com 97% do máximo, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter o mesmo sinal (e positivo). O índice L maior que 1 indica problemas na barra 31. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 34 e 40 mas sem ênfase.

Com 98% do máximo, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter sinais opostos. O índice L maior que 1 indica problemas nas barras 30, 31, 32 e 33. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 34 e 40 mas sem ênfase.

Com 99% do máximo, os índices M e β das barras 32 e 33 voltam a ter sinais iguais (e positivos). Os valores não indicam proximidade do máximo carregamento. O índice L maior que 1 indica problemas nas barras 30, 31, 32 e 33. Um autovalor já bem próximo de 0 associa o problema às barras 37 mas sem ênfase.

Com 100% do máximo, os índices M e β todos negativos indicam que esse ponto de operação encontra-se na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV. Os índices L maiores que 1 nas barras 25, 30, 31, 32 e 33 indicam ultrapassagem ao ponto de máximo carregamento. Um autovalor próximo de 0 e negativo indica o mesmo e aponta, sem ênfase, para as barras 37 e 40. O vetor tangente aponta para as mesmas barras apontadas pelo índice L.

Pode-se dizer que todos os métodos funcionaram com 100% do carregamento. Entretanto, durante o crescimento da carga, o método da matriz D'apresentou problemas numéricos.

F. Sistema de 118 Barras

Todos os métodos indicam operação normal no caso-base. O método da matriz D' lista as dez barras com menor margem como barras de tensão controlada.

Durante todo o crescimento da carga, o método da matriz D' aponta para barras de tensão controlada, com destaque para a barra 10, uma barra de geração remota. Com 100% da carga, o método indica a completa deterioração do sistema. Todas as barras têm índices negativos. Um autovalor negativo indica a mesma situação e aponta para a barra 44, uma barra de carga em fim de ramal. Os índices L e VT nada indicam.

Pode-se dizer que o método da matriz D' e os autovalores/autovetores apresentaram resultados coerentes com o máximo carregamento. Quanto à localização dos problemas, o método da matriz D' enfatiza barras de tensão controlada, mas aponta para a completa deterioração do sistema. Já os fatores de participação, de um único autovalor pequeno e negativo, apontam enfaticamente para uma única barra de carga.

No teste do sistema 118 barras com limites de geração de potência reativa obtiveram-se resultados muito diferentes quando comparados com os dos testes sem limites de geração, já que, enquanto os níveis de carregamento iam aumentando, alguns geradores iam atingindo seus limites superiores de geração de potência reativa, fazendo com que algumas barras PV virassem PQ. A perda do controle de tensão influencia na capacidade de transmissão de potência e, conseqüentemente, nos IETs. O máximo carregamento foi atingido quando houve perda do controle de tensão em uma ou mais barras.