6
Resultados

Este capítulo tem por objetivo principal apresentar:

1. Os pontos de operação obtidos nas diferentes situações de controle pelo algoritmo de fluxo de carga;
2. Os índices de estabilidade de tensão correspondentes, calculados pelos modelos de sistemas linearizados propostos neste trabalho.

Foram desenvolvidos programas computacionais de fluxo de potência considerando o sistema elétrico com modelagem de múltiplas *swing*, da regulação própria, da regulação primária e da regulação secundária. Também foram desenvolvidos programas computacionais para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão. Em ambos os casos, no ambiente de MatLab® (MATHWORKS, 2013).

Os cálculos foram feitos para:

- Teste 1: Sistema de 6 barras.
- Teste 2: Sistema *New England* de 39 barras.

O sistema de 6 barras foi inicialmente proposto em (ALMEIDA, 2004), onde três unidades geradoras, conectadas nas barras 1, 2 e 6 suprem as cargas conectadas nas barras 4 e 5.

O sistema *New England*, difundido em (ATHAY, 1979) é um sistema de 39 barras com dez geradores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.1
Sistema de 6 barras

O diagrama unifilar do sistema foi apresentado na Figura 4.1. As condições iniciais para cálculo do ponto de operação são dadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Estimativa Inicial do Ponto de Operação

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)
1	Geração	1,024	0	0	0	50
2	Geração	1,021	0	0	0	90
3	Carga	1,000	0	0	0	0
4	Carga	1,000	0	120	0	0
5	Carga	1,000	0	40	0	0
6	Geração	1,004	0	0	0	20

Considera-se a base do sistema como 100 MVA e uma frequência de 60 Hz. Posteriormente, os outros parâmetros serão apresentados conforme a necessidade.

6.1.1
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão- Modelagem com Múltiplas *Swing*

Uma consideração importante que influencia os resultados é que os três geradores do sistema são *swing*, e os fatores de proporcionalidade para divisão das perdas são:

$$\alpha_1 = \frac{50}{50+90+20} = 31.25\% \quad (6.1)$$

$$\alpha_1 = \frac{90}{50+90+20} = 56.25\% \quad (6.2)$$

$$\alpha_6 = \frac{20}{50+90+20} = 12.5\% \quad (6.3)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Os valores que aparecem em (6.1), (6.2) e (6.3) para cálculo dos fatores correspondem ao despacho proporcional sem perdas e foram apresentados na Tabela 6.1.

Usa-se como referência angular a barra 1 e os resultados do algoritmo de fluxo de potência após convergência são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2- Ponto de Operação no Despacho Proporcional

Barra	**Tipo**	**Tensão (p.u.)**	**Ângulo (o)**	**Geração ativa (MW)**	**Geração reativa (Mvar)**
1	*swing*	1,0240	0,00	52,8375	12,7452
2	*swing*	1,0210	-2,23	95,1075	15,1941
3	PQ	0,9939	-5,82	0,0000	0,0000
4	PQ	0,9440	-13,55	0,0000	0,0000
5	PQ	0,9862	-24,27	0,0000	0,0000
6	*swing*	1,0040	-21,87	21,1350	8,2983

Na Tabela 6.2 pode-se observar a mudança da geração ativa nas barras *swing* proporcionalmente às suas gerações mostradas na Tabela 6.1 e que correspondem ao despacho proporcional sem perdas. Essas mudanças refletem quanto cada barra *swing* contribuiu para compensar as perdas nas linhas. Na Tabela 6.3 pode-se comprovar que a potência ativa assumida por cada gerador confere com a proporcionalidade.

Tabela 6.3- Consistência entre a Contribuição em Barras *Swing* e sua Proporcionalidade de Geração sem Perdas

Barra	**Geração ativa (MW)**	**Geração ativa Sem perdas(MW)**	**Perda ativa assumida (MW)**	**Perda ativa assumida (%)**
1	52,8375	50	2,8375	31,25
2	95,1075	90	5,1075	56,25
3	0,0000	0	0,0000	0,00
4	0,0000	0	0,0000	0,00
5	0,0000	0	0,0000	0,00
6	21,1350	20	1,1350	12,50

No ponto de operação da Tabela 6.2 faz-se a análise de estabilidade de tensão. Para esta análise têm-se duas situações:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

1. O sistema não sofre nenhum impacto e não há necessidade da regulação primária, pois a frequência permanece em 60 Hz. Os índices são calculados com o sistema linearizado que inclui a modelagem de múltiplas *swing* apresentado em (5.19) e são apresentados na Tabela 6.4. Nesse caso, o estudo assume que os geradores respondem a variações (infinitesimais) de carga de acordo com o despacho proporcional.

Tabela 6.4- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz, Resposta de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barra	**Si (p.u.)**	**Sm (p.u.)**	**β (graus)**	**M (%)**
1	0,5435	3,9572	75,4566	86,2650
2	0,9631	4,5191	79,0240	78,6875
3	0,0000	17,4874	100,6124	100,0000
4	1,2000	6,4573	110,0791	81,4163
5	0,4000	2,3795	103,2651	83,1900
6	0,2271	0,7998	104,2392	71,6104

2. Supõe-se que nesse ponto de operação atuará a regulação primária, e os índices, calculados com o sistema linearizado que inclui a modelagem da regulação primária apresentado em (5.26), são apresentados na Tabela 6.5. Nesse caso, o estudo assume que os geradores respondem a variações (infinitesimais) de carga de acordo com suas energias de regulação.

Tabela 6.5- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz, Resposta de Acordo com as Energias de Regulação)

Barra	**Si (p.u.)**	**Sm (p.u.)**	**β (graus)**	**M (%)**
1	0,5435	3,9674	75,2300	86,3001
2	0,9631	4,6318	77,2625	79,2060
3	0,0000	18,3114	100,8997	100,0000
4	1,2000	6,6173	110,4037	81,8658
5	0,4000	2,4120	103,2575	83,4164
6	0,2271	0,8012	104,2821	71,6591

Os valores dos estatismos para a regulação primária utilizados neste teste são mostrados na Tabela 6.6 (em p.u., o estatismo é igual ao inverso da energia de regulação).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.6- Estatismos das Unidades Geradoras

Barra de geração	Base de Potência (MW)	Estatismo na base da máquina	Estatismo na base do sistema
1	100(4x25)	0,05	0,05
2	200(8x25)	0,05	0,025
6	50(2x25)	0,05	0,1

Os índices mostrados nas Tabelas 6.4 e 6.5 são incomparáveis, pois são calculados com premissas diferentes em cada caso. Podem até ser iguais se as proporções relativas ao despacho proporcional e às energias de regulação são numericamente iguais. Nesse caso particular, seria necessário que todos os geradores fossem dotados de regulação primária, já que todos participam do despacho proporcional. Na prática, isso não ocorre.

6.1.2
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária

Ao ocorrer um impacto normal, um aumento de 60 MW na carga conectada na barra 4 e 30 MW na carga conectada na barra 5, atua a regulação primária.

O ponto de operação calculado pelo algoritmo de fluxo de potência apresentado na Seção 4.5.2 é mostrado na Tabela 6.7.

O algoritmo de fluxo de carga também calcula a nova frequência após a atuação da regulação primária. Alternativamente poderia ser calculada por:

$$f_{Hz} = 60.\left(1 - \frac{0.9}{\frac{1}{0,05}+\frac{1}{0,025}+\frac{1}{0,1}}\right) = 59,2286\ Hz \qquad (6.4)$$

No caso do fluxo de carga do sistema com perdas, a frequência após a atuação da regulação primária é $f = 59,0047Hz$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.7- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Primária

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1,0240	0,00	83,18	31,67
2	1,0210	-3,59	156,36	53,30
3	0,9587	-9,38	0,00	0,00
4	0,8616	-22,97	0,00	0,00
5	0,9588	-44,99	0,00	0,00
6	1,0040	-40,76	36,59	22,17

De acordo com a Tabela 6.6, observa-se na Tabela 6.7 que a barra 2 assumiu 57,14%, a barra 1 assumiu 28,57% e a barra 6 assumiu 14,29% do aumento de carga.

Usa-se o ponto de operação da Tabela 6.7 para a análise de estabilidade de tensão. Calculam-se os índices de estabilidade de tensão para duas situações:

1. As variações (infinitesimais) de carga são assumidas pelos geradores de acordo com suas energias de regulação. Os resultados são mostrados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz, Resposta dos Geradores de Acordo com as Energias de Regulação)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,8900	3,9254	65,2652	77,3268
2	1,6519	4,3751	58,5067	62,2430
3	0,0000	16,4946	104,7901	100,0000
4	1,8000	5,3818	127,7513	66,5541
5	0,7000	2,1348	121,4174	67,2095
6	0,4278	0,7874	123,0617	45,6669

2. Supõe-se que nesse ponto de operação atua a regulação secundária. Os índices de estabilidade são calculados com o sistema linearizado que inclui a modelagem da regulação secundária mostrado em (5.31). O estudo assume que os geradores respondem as variações (infinitesimais) de carga, de acordo com seus fatores de participação, o qual é mostrado na Tabela 6.13. Os índices de estabilidade de tensão são apresentados na Tabela 6.9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.9- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz, Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,8900	3,9065	66,0843	77,2172
2	1,6519	4,1625	66,7891	60,3147
3	0,0000	15,1858	106,0691	100,0000
4	1,8000	5,1653	127,9065	65,1519
5	0,7000	2,0823	121,6482	66,3835
6	0,4278	0,7857	122,9908	45,5506

6.1.3
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária e Própria

Usam-se os mesmos valores de estatismo da Tabela 6.6 para as unidades geradoras. O coeficiente de amortecimento usado para todas as cargas no sistema é:

$$D = 1{,}5\ \% \qquad (6.5)$$

O ponto de operação resultante calculado pelo algoritmo de fluxo de potência apresentado na Seção 4.5.3 que considera a atuação da regulação primária e a existência da regulação própria é mostrado na Tabela 6.11.

Tabela 6.10- Ponto de Operação Após a Atuação da Regulação Primária e Própria

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Carga ativa (MW)	Geração ativa (MW)	Geração reativa (Mvar)
1	1,0240	0,0000	0	81,44	30,16
2	1,0210	-3,4955	0	152,89	50,02
3	0,9615	-9,1673	0	0	0
4	0,8680	-22,3706	177,64	0	0
5	0,9614	-43,1292	67,64	0	0
6	1,0040	-39,0086	0	35,72	20,82

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

A frequência do sistema é $f = 59.0567\ Hz$. Com este ponto de operação calculam-se os índices de estabilidade em duas situações:

1. As variações (infinitesimais) de carga são absorvidas pelos geradores de acordo com suas energias de regulação e considerando a regulação própria do sistema. Os resultados são apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz, Resposta dos Geradores de Acordo com as Regulações Primária e Própria)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,8685	3,9557	65,0946	78,0447
2	1,6086	4,5634	55,9950	64,7500
3	0,0000	17,0935	102,7025	100
4	1,7764	5,6112	125,9279	68,3417
5	0,6764	2,1903	119,3059	69,1170
6	0,4135	0,8020	120,1730	48,4438

2. Supõe-se que atua a regulação secundária. Os índices de estabilidade são calculados com o sistema linearizado que inclui a modelagem da regulação secundária mostrado em (5.31). Os fatores de participação dos geradores relativamente à regulação secundária são mostrados na Tabela 6.13. Os índices de estabilidade de tensão são apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz, Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,8685	3,9115	66,7471	77,7964
2	1,6086	4,1973	68,3939	61,6750
3	0,0000	15,3286	105,7653	100
4	1,7764	5,2576	126,6329	66,2121
5	0,6764	2,1095	119,6589	67,9344
6	0,4135	0,7894	120,5422	47,6230

Os índices mostrados nas Tabelas 6.8 e 6.11 são ligeiramente diferentes porque: i) foram calculados em dois pontos de operação ligeiramente diferentes (um deles foi calculado considerando a regulação própria e o outro não) e ii)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

foram calculados com os geradores respondendo de forma ligeiramente diferentes (uma delas considerando a regulação própria e a outra não).

Os índices mostrados nas Tabelas 6.9 e 6.12 são ligeiramente diferentes porque: i) foram calculados em dois pontos de operação ligeiramente diferentes (um deles foi calculado considerando a regulação própria e o outro não). Ambos foram calculados com os geradores respondendo da mesma forma.

6.1.4
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Secundária

6.1.4.1
Uma Única Área de Controle

Na Tabela 6.14 mostra-se o fator de participação para cada barra de geração.

Tabela 6.13- Fator de Participação das Máquinas em uma Única Área de Controle

Barra de geração	Potência Base (MW)	Fator de participação da máquina	Fator de participação da máquina(%)
1	100(4x25)	3	33,33
2	200(8x25)	5	55,56
6	50(2x25)	1	11,11

Na Seção 6.1.2 foi apresentado o ponto de operação após a atuação da regulação primária. Atuam as unidades geradoras com regulação secundária para a recuperação da frequência. O ponto de operação resultante após a convergência do algoritmo de fluxo de carga que inclui a modelagem da regulação secundária, apresentado na Seção 4.5.4.1 é mostrado na Tabela 6.14.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.14- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1,0240	0,00	89,17	33,64
2	1,0210	-4,39	155,28	57,83
3	0,9557	-10,10	0,00	0,00
4	0,8539	-24,07	0,00	0,00
5	0,9549	-48,89	0,00	0,00
6	1,0040	-45,08	33,06	24,05

A variação total de carga é $\Delta P_L = 90MW$ e as perdas ôhmicas nas linhas são $Perdas = 27.49MW$. Cada barra de geração assumiu a porcentagem definido pelo fator de participação:

$$\Delta P_{G1} = 90\ MW * (33{,}33\%) + 27.49\ MW * (33{,}33\%) = 39{,}17\ MW \quad (6.6)$$

$$\Delta P_{G2} = 90\ MW * (55{,}56\%) + 27.49\ MW * (55{,}56\%) = 65{,}28\ MW \quad (6.7)$$

$$\Delta P_{G6} = 90\ MW * (11{,}11\%) + 27.49\ MW * (11{,}11\%) = 13{,}06\ MW \quad (6.8)$$

O algoritmo de fluxo de potência que modela a atuação da regulação secundária recuperou o valor base da frequência, $f = 60\ Hz$, e redespachou a geração, mas mantendo o equilíbrio geração/carga.

O cálculo dos índices de estabilidade de tensão no ponto de operação da Tabela 6.14 leva em conta duas situações:

1. As variações (infinitesimais) de carga são absorvidas pelos geradores de acordo com a regulação secundária. Os índices, calculados a partir do sistema linearizado (5.31), são mostrados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz. Respostas dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,9530	3,8993	63,9418	75,5592
2	1,6570	4,1055	65,6028	59,6405
3	0,0000	15,0177	106,7186	100,0000

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
4	1,8000	5,0418	129,3932	64,2986
5	0,7000	2,0216	125,7668	65,3745
6	0,4088	0,7558	129,4445	45,9166

2. Supõe-se que a operação volta ao normal e as unidades geradoras voltarão a ser despachadas de acordo com o critério proporcional. Então os índices calculados no ponto de operação da Tabela 6.14 com o sistema linearizado (5.19) (que modela o sistema com múltiplas *swing* usando fatores de participação de acordo com o despacho proporcional) são mostrados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz, Respostas dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barra	*Si*	*Sm*	*β (graus)*	*M (%)*
1	0,9530	2,8919	52,8323	67,0447
2	1,6570	4,1989	61,6258	60,5381
3	0,0000	15,5511	106,0262	100,0000
4	1,8000	5,1296	129,2167	64,9092
5	0,7000	2,0433	125,6254	65,7410
6	0,4088	0,7566	129,4445	45,9707

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.1.4.2 Duas Áreas de Controle

Na Seção 4.5.4.2 se modelou o problema da regulação secundária para um sistema com duas áreas de controle. Os fatores de proporcionalidade para cada área de controle são apresentados na Tabela 6.17. Como definido naquela seção, os geradores 1 e 2 pertencem à área 1 e o gerador 6 é o único na área 2.

Tabela 6.17- Fator de Participação dos Geradores nas Duas Áreas de Controle

Barra de geração	Área	Base de Potência (MW)	Fator de participação da maquina (%)
1	1	100(4x25)	37,5
2	1	200(8x25)	62,5
6	2	50(2x25)	100

Com a regulação primária não é possível a recuperação da frequência e o intercâmbio entre áreas. O algoritmo de fluxo de carga apresentado na Seção 4.5.4.2 que inclui a modelagem da regulação secundária das duas áreas de controle é utilizado para atingir a frequência e o intercâmbio base. O novo ponto de operação é mostrado na Tabela 6.18.

Tabela 6.18- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária em Duas Áreas de Controle

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1,0240	0,00	80,28	26,03
2	1,0210	-3,78	140,47	40,96
3	0,9694	-9,00	0,00	0,00
4	0,8867	-21,23	0,00	0,00
5	0,9690	-33,51	0,00	0,00
6	1,0040	-27,65	50,51	17,60

As variações das cargas foram: $\Delta P_{L4} = 60MW$ e $\Delta P_{L5} = 30MW$. As perdas ôhmicas foram: $Perdas_{Área1} = 20{,}75MW$ e $Perdas_{Área2} = 0{,}51MW$.

Baseado no fator de participação em cada gerador calculou-se a contribuição de cada gerador.

Para a área 1:

$$\Delta P_{G1} = 60\ MW * (37{,}5\%) + 20{,}75\ MW * (37{,}5\%) = 30{,}28\ MW \quad (6.9)$$

$$\Delta P_{G2} = 60\ MW * (62{,}5\%) + 20{,}75\ MW * (62{,}5\%) = 50{,}47\ MW \quad (6.10)$$

Para a área 2:

$$\Delta P_{G3} = 30\ MW * (100\%) + 0{,}51\ MW * (100\%) = 30{,}51\ MW \quad (6.11)$$

A regulação secundária recuperou o valor da frequência $f = 60\ Hz$ e o intercâmbio entre áreas $P_{45} = 20\ MW$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

No novo ponto de operação calculam-se os índices de estabilidade de tensão levando em conta duas situações:

1. As variações (infinitesimais) de carga são absorvidas pelos geradores de acordo com a regulação secundária. Os índices, calculados a partir do sistema linearizado (5.38), são mostrados na Tabela 6.19.

Tabela 6.19- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz. Respostas dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	**Si (p.u.)**	**Sm (p.u.)**	**β (graus)**	**M (%)**
1	0,8439	3,8316	70,9563	77,9742
2	1,4632	3,7776	90,2095	61,2666
3	0,0000	14,5887	109,7548	100,0000
4	1,8000	5,2081	125,1462	65,4386
5	0,7000	5,1733	100,6134	86,4690
6	0,5349	0,8870	99,0984	39,6973

2. Supõe-se que a operação volta ao normal e as unidades geradoras voltarão a ser despachadas de acordo com o critério proporcional. Então o cálculo dos índices no ponto de operação da Tabela 6.18 com o sistema linearizado (5.19) que modela o sistema com múltiplas *swing* e os fatores de participação de acordo com o despacho proporcional. Os índices são mostrados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20- Índices de Estabilidade (f=60Hz, Respostas dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barra	**Si (p.u.)**	**Sm (p.u.)**	**β (graus)**	**M (%)**
1	0,8439	4,6873	66,8068	81,9950
2	1,4632	6,1778	70,2445	76,3156
3	0,0000	16,2567	105,9208	100,0000
4	1,8000	5,6580	123,9664	68,1864
5	0,7000	2,2768	107,5414	69,2550
6	0,5349	0,9390	98,4868	43,0338

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.2
Sistema *New England* de 39 Barras

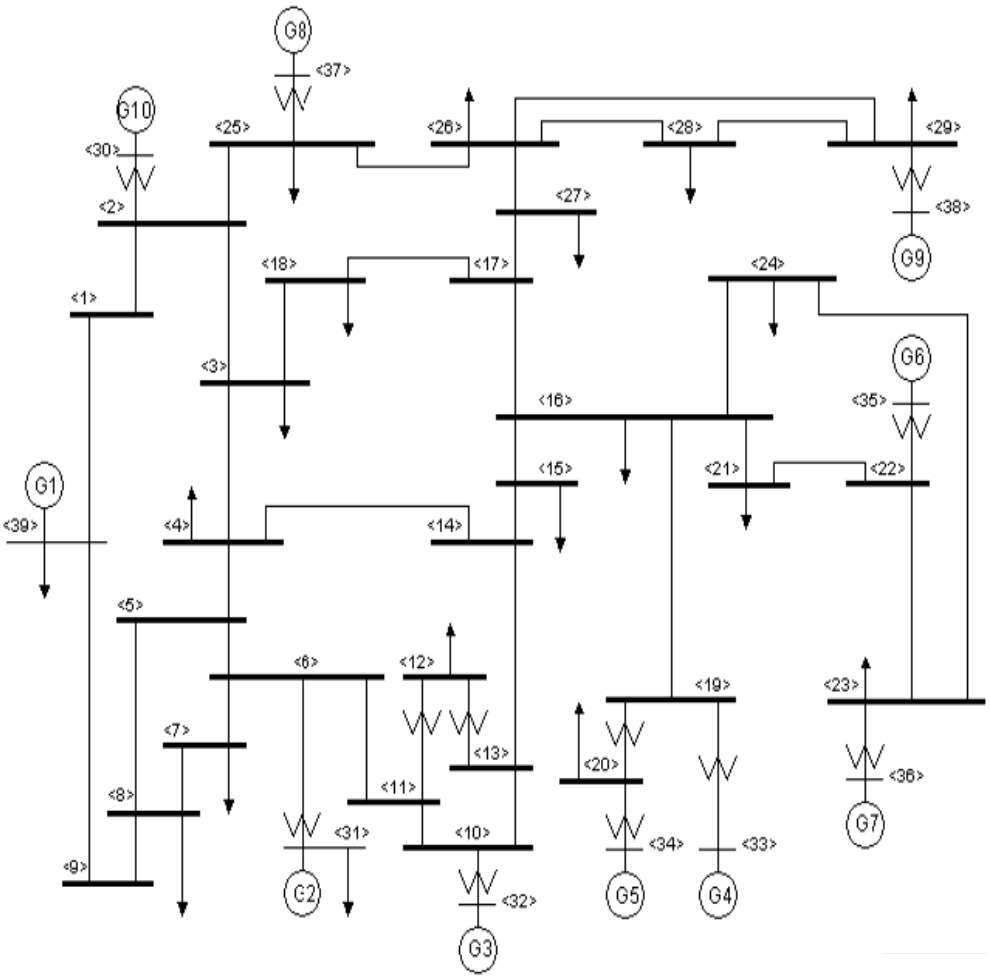

Figura 6.1- Diagrama Unifilar do Sistema *New England* de 39 Barras

O exercício numérico da Seção 6.1 é repetido nesta seção para o sistema *New England* de 39 barras mostrado na Figura 6.2. Possui 10 barras de geração todas com reguladores de velocidade com ganho de 5%. A base de 100 MVA se aplica em todo o sistema.

As condições iniciais para o cálculo do ponto de operação são dadas nas Tabelas 6.21 e 6.22.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.21- Tensão e Geração de Potência Ativa no Caso Base do Sistema *New England*de 39 Barras

Barra	***Tensão (p.u.)***	***Geração Ativa (MW)***
30	1,0470	250
31	0,9784	573
32	0,9795	650
33	0,9945	632
34	1,0054	508
35	1,0466	650
36	1,0618	560
37	1,0261	540
38	1,0253	830
39	1,0295	1000

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.22- Cargas do Sistema *New England* de 39 Barras

Barra	**Carga ativa (MW)**	**Carga Reativa (Mvar)**
3	322	2,4
4	500	184
7	233,8	84
8	522	176
12	8,5	88
15	320	153
16	329,4	32,3
18	158	30
20	680	103
21	274	115
23	247,5	84,6
24	308,6	-92,2
25	224	47,2
26	139	17
27	281	75,5
28	206	27,6
29	283,5	26,9
31	9,2	4,6
39	1104	250

6.2.1
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Múltiplas *Swing*

Considera-se para o resultado do ponto de operação que: i) todas as barras de geração são *swing*, ii) os fatores de proporcionalidade correspondem ao despacho proporcional sem perdas, iii) a barra de geração 39 é a de referência angular. Com estas considerações apresentam-se os resultados do algoritmo do fluxo de potência após a convergência, na Tabela 6.23.

Tabela 6.23- Ponto de Operação no Despacho Proporcional

Barra	***Tensão (p.u.)***	***Ângulo (o)***	***Geração Ativa (MW)***	***Geração Reativa (Mvar)***
1	1,0353	1,6092	0,00	0,00
2	1,0180	4,4120	0,00	0,00
3	0,9893	1,4136	0,00	0,00
4	0,9521	0,5853	0,00	0,00
5	0,9509	1,9264	0,00	0,00
6	0,9520	2,7182	0,00	0,00
7	0,9441	0,2495	0,00	0,00
8	0,9449	-0,3196	0,00	0,00
9	1,0068	-0,1847	0,00	0,00
10	0,9587	5,4071	0,00	0,00
11	0,9551	4,4879	0,00	0,00
12	0,9355	4,4672	0,00	0,00
13	0,9570	4,5931	0,00	0,00
14	0,9579	2,6983	0,00	0,00
15	0,9663	2,1977	0,00	0,00
16	0,9857	3,7243	0,00	0,00
17	0,9901	2,6140	0,00	0,00
18	0,9883	1,6902	0,00	0,00
19	0,9862	8,9764	0,00	0,00
20	0,9816	7,5632	0,00	0,00
21	0,9926	6,3133	0,00	0,00
22	1,0189	11,0482	0,00	0,00
23	1,0178	10,8196	0,00	0,00
24	0,9940	3,8507	0,00	0,00
25	1,0266	5,8781	0,00	0,00
26	1,0157	4,5817	0,00	0,00
27	0,9976	2,4371	0,00	0,00
28	1,0174	8,3237	0,00	0,00
29	1,0190	11,2512	0,00	0,00
30	1,0470	6,8468	250,16	173,03
31	0,9784	11,4275	573,38	150,76
32	0,9795	13,3700	650,43	147,20
33	0,9945	14,2070	632,42	55,44

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	*Tensão (p.u.)*	*Ângulo (o)*	*Geração Ativa (MW)*	*Geração Reativa (Mvar)*
34	1,0054	12,8144	508,33	130,30
35	1,0466	16,0518	650,43	230,86
36	1,0618	18,8738	560,37	200,68
37	1,0261	12,7079	540,36	16,24
38	1,0253	18,3526	830,55	49,95
39	1,0295	0,0000	1000,66	222,08

Pode-se observar a mudança na geração ativa nas barras *swing*, e essas mudanças refletem quanto cada barra *swing* contribuiu para compensar as perdas nas linhas.

Os índices de estabilidade calculados no ponto de operação da Tabela 6.23 são mostrados nas Tabelas 6.24 e 6.25.

Tabela 6.24- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz. Resposta de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barra	**Si (p.u.)**	**Sm (p.u.)**	**β (graus)**	**M (%)**
1	0,0000	79,7776	95,8536	100
2	0,0000	106,2899	85,3177	100
3	3,2201	82,2466	95,6479	96,0848
4	5,3278	73,3850	96,1083	92,7399
5	0,0000	78,0426	89,3117	100
6	0,0000	81,0524	86,4069	100
7	2,4843	61,6854	94,8241	95,9726
8	5,5087	65,9569	97,4560	91,6480
9	0,0000	72,4062	94,8579	100
10	0,0000	72,5086	79,9396	100
11	0,0000	69,9834	82,7121	100
12	0,8841	26,0243	87,7678	96,6028
13	0,0000	66,3402	83,3309	100
14	0,0000	69,0012	89,5256	100
15	3,5470	60,2425	92,8349	94,1122
16	3,3098	83,0369	87,3033	96,0141
17	0,0000	74,6546	91,4942	100
18	1,6082	66,2371	94,0459	97,5720
19	0,0000	62,8041	77,2703	100
20	6,8776	45,5550	86,1572	84,9027
21	2,9715	54,1684	83,7771	94,5142
22	0,0000	64,1149	74,4478	100
23	2,6156	55,9719	76,8258	95,3269
24	3,2208	61,1908	88,3451	94,7365
25	2,2892	80,3159	75,1919	97,1498

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
26	1,4004	51,4186	86,1469	97,2766
27	2,9097	49,3834	92,8706	94,1080
28	2,0784	30,7602	81,3325	93,2432
29	2,8477	40,5159	73,3809	92,9713
30	3,0418	35,4607	82,6611	91,4222
31	5,8280	24,1489	65,3689	75,8663
32	6,6688	25,1372	62,4922	73,4705
33	6,3484	25,9332	69,5573	75,5201
34	5,2477	19,6427	74,4546	73,2843
35	6,9018	27,3831	67,5261	74,7953
36	5,9522	21,6884	66,6669	72,5559
37	5,4060	26,0439	68,2908	79,2427
38	8,3205	14,8959	48,2120	44,1426
39	1,0705	25,9918	99,3697	95,8816

Tabela 6.25- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz Resposta de Acordo com as Energias de Regulação)

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	β (graus)	*M (%)*
1	0,0000	47,2120	90,5395	100
2	0,0000	108,3963	87,6617	100
3	3,2201	94,5123	98,2172	96,5929
4	5,3278	83,2277	98,7499	93,5985
5	0,0000	82,1320	93,8472	100
6	0,0000	85,6858	92,1915	100
7	2,4843	63,6312	96,4334	96,0957
8	5,5087	65,0713	97,6559	91,5343
9	0,0000	45,0678	90,6759	100
10	0,0000	83,5592	87,1920	100
11	0,0000	79,3261	89,0937	100
12	0,8841	32,3837	90,2804	97,2699
13	0,0000	77,9005	89,3068	100
14	0,0000	83,0225	94,3631	100
15	3,5470	83,1790	98,6496	95,7358
16	3,3098	125,1763	96,8170	97,3559
17	0,0000	102,5292	98,4768	100
18	1,6082	84,4922	98,6144	98,0966
19	0,0000	92,7998	83,5704	100
20	6,8776	64,3341	88,4732	89,3096
21	2,9715	76,3174	90,0456	96,1063
22	0,0000	87,6182	81,4464	100
23	2,6156	76,0867	83,0418	96,5623
24	3,2208	87,8580	95,1859	96,3341
25	2,2892	89,7713	84,3337	97,4500

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	β (graus)	*M (%)*
26	1,4004	63,3303	91,1442	97,7888
27	2,9097	62,9170	97,1088	95,3754
28	2,0784	36,6214	84,6325	94,3246
29	2,8477	47,7132	78,0544	94,0316
30	3,1882	33,9106	84,6462	90,5982
31	6,4043	22,7256	68,2522	71,8191
32	7,9677	23,3770	63,9661	65,9164
33	12,8886	25,4525	67,2849	49,3620
34	6,7717	20,8127	75,2853	67,4639
35	6,8574	30,5024	68,9893	77,5186
36	5,4894	24,4020	67,9809	77,5043
37	5,9379	26,3301	73,1736	77,4484
38	8,9071	13,1358	37,3900	32,1926
39	3,3887	23,6993	98,9328	85,7015

Os índices mostrados nas Tabelas 6.24 e 6.25 são incomparáveis, pois são calculados com premissas diferentes em cada caso. Podem até ser iguais se as proporções relativas ao despacho proporcional e às energias de regulação são numericamente iguais. Nesse caso particular, seria necessário que todos os geradores fossem dotados de regulação primária, já que todos participam do despacho proporcional. Na prática, isso não ocorre.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.2.2
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária

Mostra-se na Tabela 6.26 o ponto de operação após a regulação primária. O desequilíbrio entre carga/geração deve-se a um aumento de 100% nas cargas das barras 4, 8, 20 e 39.

Tabela 6.26- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Primária

Barra	*Tensão (p.u.)*	*Ângulo (o)*	*Geração Ativa (MW)*	*Geração Reativa (Mvar)*
1	0,9997	9,4935	0,00	0,00
2	0,9977	25,9934	0,00	0,00
3	0,9576	21,7362	0,00	0,00
4	0,9022	15,5143	0,00	0,00
5	0,9100	15,5625	0,00	0,00
6	0,9172	16,8532	0,00	0,00

Barra	*Tensão (p.u.)*	*Ângulo (o)*	*Geração Ativa (MW)*	*Geração Reativa (Mvar)*
7	0,8948	11,7349	0,00	0,00
8	0,8900	9,8618	0,00	0,00
9	0,9798	3,5934	0,00	0,00
10	0,9444	22,4605	0,00	0,00
11	0,9330	20,6058	0,00	0,00
12	0,9196	21,1108	0,00	0,00
13	0,9374	21,7665	0,00	0,00
14	0,9260	20,2399	0,00	0,00
15	0,9461	24,5467	0,00	0,00
16	0,9740	28,1134	0,00	0,00
17	0,9728	26,3446	0,00	0,00
18	0,9648	24,1157	0,00	0,00
19	1,0142	31,9003	0,00	0,00
20	0,9520	26,9751	0,00	0,00
21	0,9810	33,5095	0,00	0,00
22	1,0165	41,0491	0,00	0,00
23	1,0092	41,1096	0,00	0,00
24	0,9804	29,0848	0,00	0,00
25	1,0318	29,6353	0,00	0,00
26	1,0077	30,9318	0,00	0,00
27	0,9844	27,5797	0,00	0,00
28	1,0170	38,4704	0,00	0,00
29	1,0245	42,5592	0,00	0,00
30	1,0470	31,5303	543,26	452,29
31	0,9784	31,6550	866,26	590,26
32	0,9795	35,0642	943,26	578,50
33	0,9945	39,7650	925,26	343,78
34	1,0054	35,5201	801,26	364,16
35	1,0466	48,5165	943,26	463,58
36	1,0618	53,5412	853,26	282,11
37	1,0261	40,3738	833,26	142,45
38	1,0253	52,3105	1123,26	206,72
39	1,0295	0,0000	1293,26	824,95

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Os índices de estabilidade são mostrados nas Tabelas 6.27 e 6.28.

Tabela 6.27- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com as Energias de Regulação)

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	*β (graus)*	*M (%)*
1	0,0000	76,8897	108,8298	100
2	0,0000	105,8756	68,7209	100
3	3,2201	80,5050	89,7522	96,0001
4	10,6556	66,8708	103,0901	84,0654
5	0,0000	68,8709	90,8370	100
6	0,0000	71,3574	84,6416	100
7	2,4843	54,0222	101,1605	95,4013
8	11,0174	58,2514	108,8846	81,0864

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	*β (graus)*	*M (%)*
9	0,0000	69,6494	106,5532	100
10	0,0000	66,3169	71,6817	100
11	0,0000	63,8259	76,4250	100
12	0,8841	24,6033	85,0789	96,4066
13	0,0000	61,4287	77,3975	100
14	0,0000	64,1960	87,1371	100
15	3,5470	58,3743	85,0125	93,9238
16	3,3098	81,0229	73,9856	95,9150
17	0,0000	73,4134	81,4771	100
18	1,6082	64,8826	86,7217	97,5213
19	0,0000	62,0682	74,0380	100
20	13,7551	45,3240	91,3663	69,6515
21	2,9715	52,4687	71,4181	94,3365
22	0,0000	61,6651	59,8304	100
23	2,6156	53,9379	63,1751	95,1507
24	3,2208	59,7250	77,4442	94,6073
25	2,2892	80,3254	63,6525	97,1501
26	1,4004	50,0165	74,9816	97,2002
27	2,9097	48,2992	84,6831	93,9758
28	2,0784	29,5885	71,1393	92,9756
29	2,8477	38,5362	60,9520	92,6102
30	7,0689	36,4505	65,6647	80,6068
31	10,3805	25,2301	48,5423	58,8567
32	11,0652	26,6523	46,6436	58,4831
33	9,8706	27,9983	61,0230	64,7458
34	8,8013	20,9405	69,6054	57,9702
35	10,5102	28,1423	51,4954	62,6534
36	8,9869	21,6700	50,9486	58,5286
37	8,4534	26,5596	52,2082	68,1717
38	11,4212	16,0280	27,6444	28,7422
39	9,7075	24,5801	137,4846	60,5068

Tabela 6.28- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	*β (graus)*	*M (%)*
1	0,0000	73,0983	104,1451	100
2	0,0000	94,2185	66,7807	100
3	3,2201	72,6370	86,4788	95,5669
4	10,6556	61,8394	99,4929	82,7689
5	0,0000	64,0452	88,0594	100
6	0,0000	66,4198	82,3785	100
7	2,4843	51,0529	98,4765	95,1338
8	11,0174	54,9448	105,5434	79,9482
9	0,0000	67,6112	104,5289	100
10	0,0000	62,5757	70,9965	100
11	0,0000	60,1485	75,3606	100
12	0,8841	23,9767	84,7218	96,3127
13	0,0000	57,9218	76,4310	100

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	*Si (p.u.)*	*Sm (p.u.)*	*β (graus)*	*M (%)*
14	0,0000	59,7830	85,1656	100
15	3,5470	54,6262	83,7125	93,5069
16	3,3098	74,7662	73,2485	95,5731
17	0,0000	67,6786	80,2102	100
18	1,6082	59,9955	85,0041	97,3194
19	0,0000	59,3243	74,1214	100
20	13,7551	43,9235	91,3096	68,6839
21	2,9715	49,9408	71,4172	94,0499
22	0,0000	59,1802	60,0778	100
23	2,6156	51,8261	63,3918	94,9531
24	3,2208	56,1920	76,9844	94,2682
25	2,2892	74,9272	62,4816	96,9448
26	1,4004	47,9873	75,0426	97,0818
27	2,9097	45,9994	84,2192	93,6746
28	2,0784	29,2308	71,3907	92,8897
29	2,8477	38,1654	61,1939	92,5384
30	7,0689	35,1741	65,4700	79,9030
31	10,3805	24,7453	48,8074	58,0507
32	11,0652	26,0437	47,0384	57,5129
33	9,8706	27,2281	61,3821	63,7485
34	8,8013	20,6342	69,7429	57,3463
35	10,5102	27,4174	52,0126	61,6660
36	8,9869	21,3250	51,3829	57,8577
37	8,4534	25,8595	52,5280	67,3101
38	11,4212	15,8711	28,1952	28,0379
39	9,7075	24,4415	137,3353	60,2828

6.2.3
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária e Própria

Usa-se como estatismo 5% para todas as unidades geradoras, e o coeficiente de amortecimento 1.5 p.u. para todas as cargas. O algoritmo de fluxo de potência também calcula a nova frequência após a atuação da regulação primaria: $f = 59.1328\ Hz$. O ponto de operação é mostrado na Tabela 6.29.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.29- Ponto de Operação Após a Atuação da Regulação Primária e Própria

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Carga Ativa (MW)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	0,9998	9,4961	0,00	0,00	0,00
2	0,9979	25,9961	0,00	0,00	0,00
3	0,9581	21,7756	319,83	0,00	0,00
4	0,9027	15,5692	997,83	0,00	0,00
5	0,9104	15,6125	0,00	0,00	0,00
6	0,9176	16,8994	0,00	0,00	0,00
7	0,8952	11,7971	231,63	0,00	0,00
8	0,8904	9,9244	1041,83	0,00	0,00
9	0,9800	3,6180	0,00	0,00	0,00
10	0,9449	22,4889	0,00	0,00	0,00
11	0,9334	20,6421	0,00	0,00	0,00
12	0,9201	21,1778	6,33	0,00	0,00
13	0,9379	21,8008	0,00	0,00	0,00
14	0,9265	20,2812	0,00	0,00	0,00
15	0,9466	24,5809	317,83	0,00	0,00
16	0,9746	28,1301	327,23	0,00	0,00
17	0,9733	26,3805	0,00	0,00	0,00
18	0,9652	24,1602	155,83	0,00	0,00
19	1,0144	31,8461	0,00	0,00	0,00
20	0,9522	26,9063	1357,83	0,00	0,00
21	0,9815	33,5064	271,83	0,00	0,00
22	1,0168	41,0076	0,00	0,00	0,00
23	1,0096	41,0691	245,33	0,00	0,00
24	0,9810	29,1005	306,43	0,00	0,00
25	1,0321	29,6398	221,83	0,00	0,00
26	1,0081	30,9823	136,83	0,00	0,00
27	0,9848	27,6348	278,83	0,00	0,00
28	1,0174	38,5262	203,83	0,00	0,00
29	1,0248	42,5978	281,33	0,00	0,00
30	1,0470	31,4889	0,00	539,07	450,55
31	0,9784	31,6584	7,03	862,07	588,09
32	0,9795	35,0301	0,00	939,07	575,60
33	0,9945	39,6732	0,00	921,07	341,67
34	1,0054	35,4043	0,00	797,07	362,65
35	1,0466	48,4390	0,00	939,07	460,40
36	1,0618	53,4340	0,00	849,07	279,66
37	1,0261	40,3213	0,00	829,07	140,62
38	1,0253	52,3105	0,00	1119,07	204,49
39	1,0295	0,0000	2205,83	1289,07	824,32

Os índices de estabilidade de tensão são mostrados nas Tabelas 6.30 e 6.31.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.30- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com as Regulações Primária e Própria)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	76,9075	108,8081	100
2	0,0000	105,9710	68,7054	100
3	3,1984	80,6909	89,6211	96,0362
4	10,6353	67,0553	102,9517	84,1395
5	0,0000	69,0783	90,7058	100
6	0,0000	71,5704	84,5207	100
7	2,4639	54,1739	101,0187	95,4518
8	10,9969	58,4120	108,7500	81,1736
9	0,0000	69,7284	106,5453	100
10	0,0000	66,4602	71,6431	100
11	0,0000	63,9714	76,3558	100
12	0,8823	24,6452	84,9692	96,4201
13	0,0000	61,5618	77,3355	100
14	0,0000	64,3515	87,0316	100
15	3,5274	58,4966	84,9161	93,9699
16	3,2882	81,1897	73,9290	95,9499
17	0,0000	73,5722	81,3688	100
18	1,5869	65,0240	86,5961	97,5595
19	0,0000	62,0913	74,1598	100
20	13,7337	45,3261	91,4450	69,7002
21	2,9516	52,5452	71,4299	94,3828
22	0,0000	61,7255	59,9293	100
23	2,5951	53,9934	63,2600	95,1937
24	3,2000	59,8283	77,4028	94,6513
25	2,2680	80,3979	63,6463	97,1791
26	1,3788	50,0924	74,8872	97,2474
27	2,8887	48,3843	84,5693	94,0296
28	2,0569	29,6188	71,0941	93,0554
29	2,8262	38,5710	60,9486	92,6729
30	7,0256	36,4653	65,7689	80,7334
31	10,3515	25,2509	48,5975	59,0053
32	11,0144	26,6664	46,7759	58,6956
33	9,8240	28,0005	61,1814	64,9149
34	8,7569	20,9354	69,7733	58,1719
35	10,4586	28,1524	51,6396	62,8501
36	8,9394	21,6726	51,1148	58,7526
37	8,4091	26,5673	52,3320	68,3479
38	11,3760	16,0149	27,7416	28,9660
39	9,7244	24,6045	137,5214	60,4771

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.31- Índices de Estabilidade de Tensão (f≠60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	73,1078	104,1379	100
2	0,0000	94,2767	66,8138	100
3	3,1984	72,7115	86,4131	95,6012
4	10,6353	61,9202	99,3882	82,8242
5	0,0000	64,1489	87,9745	100
6	0,0000	66,5322	82,3116	100
7	2,4639	51,1269	98,3532	95,1808
8	10,9969	55,0160	105,4092	80,0114
9	0,0000	67,6367	104,5132	100
10	0,0000	62,6670	71,0083	100
11	0,0000	60,2331	75,3441	100
12	0,8823	24,0040	84,6367	96,3245
13	0,0000	58,0014	76,4212	100
14	0,0000	59,8646	85,1200	100
15	3,5274	54,6989	83,6789	93,5512
16	3,2882	74,8757	73,2671	95,6084
17	0,0000	67,7596	80,1740	100
18	1,5869	60,0622	84,9399	97,3578
19	0,0000	59,3735	74,2568	100
20	13,7337	43,9427	91,3963	68,7464
21	2,9516	50,0081	71,4696	94,0978
22	0,0000	59,2540	60,1948	100
23	2,5951	51,8921	63,4964	94,9991
24	3,2000	56,2669	76,9994	94,3128
25	2,2680	74,9753	62,5077	96,9750
26	1,3788	48,0257	74,9829	97,1290
27	2,8887	46,0422	84,1453	93,7259
28	2,0569	29,2507	71,3595	92,9680
29	2,8262	38,1903	61,2014	92,5998
30	7,0256	35,1760	65,6014	80,0272
31	10,3515	24,7471	48,8963	58,1707
32	11,0144	26,0438	47,2036	57,7082
33	9,8240	27,2246	61,5554	63,9150
34	8,7569	20,6246	69,9229	57,5415
35	10,4586	27,4191	52,1788	61,8566
36	8,9394	21,3224	51,5625	58,0751
37	8,4091	25,8579	52,6735	67,4796
38	11,3760	15,8516	28,3162	28,2343
39	9,7244	24,4479	137,3830	60,2239

Os índices mostrados nas Tabelas 6.27 e 6.30 são ligeiramente diferentes porque: i) foram calculados em dois pontos de operação ligeiramente diferentes

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

(um deles foi calculado considerando a regulação própria e o outro não) e ii) foram calculados com os geradores respondendo de forma ligeiramente diferentes (uma delas considerando a regulação própria e a outra não).

Os índices mostrados nas Tabelas 6.28 e 6.31 são ligeiramente diferentes porque: i) foram calculados em dois pontos de operação ligeiramente diferentes (um deles foi calculado considerando a regulação própria e o outro não). Ambos foram calculados com os geradores respondendo da mesma forma.

6.2.4
Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Secundária

6.2.4.1
Uma Única Área de Controle

O algoritmo de fluxo de potência que modela a atuação da regulação secundária recuperou o valor base da frequência $f = 60Hz$ e redespachou a geração, mas mantendo o equilíbrio entre geração/carga. O ponto de operação é apresentado na Tabela 6.32. Mostra-se na Tabela 6.33 o fator de participação para cada barra de geração.

Tabela 6.32- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1,0074	7,8568	0,00	0,00
2	0,9949	21,5438	0,00	0,00
3	0,9559	17,6887	0,00	0,00
4	0,9046	11,9999	0,00	0,00
5	0,9148	12,3891	0,00	0,00
6	0,9222	13,6641	0,00	0,00
7	0,9006	8,8112	0,00	0,00
8	0,8960	7,0676	0,00	0,00
9	0,9845	2,5663	0,00	0,00
10	0,9479	19,1363	0,00	0,00
11	0,9370	17,3217	0,00	0,00
12	0,9231	17,7764	0,00	0,00
13	0,9403	18,3815	0,00	0,00
14	0,9274	16,6942	0,00	0,00

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
15	0,9428	20,6316	0,00	0,00
16	0,9684	24,0766	0,00	0,00
17	0,9671	22,4613	0,00	0,00
18	0,9605	20,1613	0,00	0,00
19	1,0146	27,3178	0,00	0,00
20	0,9555	21,9474	0,00	0,00
21	0,9724	29,5418	0,00	0,00
22	1,0054	37,2217	0,00	0,00
23	0,9880	37,2258	0,00	0,00
24	0,9726	25,0281	0,00	0,00
25	1,0229	25,6276	0,00	0,00
26	0,9973	27,9269	0,00	0,00
27	0,9756	24,1486	0,00	0,00
28	1,0080	36,9154	0,00	0,00
29	1,0178	41,4703	0,00	0,00
30	1,0480	25,3027	368,43	460,30
31	0,9820	27,9478	844,44	581,21
32	0,9830	31,8444	957,79	584,18
33	0,9970	35,2024	931,00	359,49
34	1,0120	29,8222	748,37	378,40
35	1,0490	44,8715	957,79	564,07
36	1,0040	50,2594	825,00	137,79
37	1,0000	36,2645	795,61	62,07
38	1,0270	52,1257	1222,80	273,69
39	1,0300	0,0000	1473,12	749,37

Tabela 6.33- Fator de Participação das Máquinas em uma Única Área de Controle

Barra de Geração	Potência Base (MW)	Fator de participação da máquina (%)
30	1000	4,04
31	1000	9,26
32	1000	10,5
33	1000	10,2
34	1000	8,2
35	1000	10,5
36	1000	9,04
37	1000	8,72
38	1000	13,4
39	1000	16,14

Os índices de estabilidade de tensão no ponto de operação da Tabela 6.31 são mostrados nas Tabelas 6.34 e 6.35.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.34- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	74,5215	102,4309	100
2	0,0000	95,0569	71,3687	100
3	3,2201	73,1781	89,3610	95,5997
4	10,6556	62,5435	101,2963	82,9628
5	0,0000	65,2217	89,9680	100
6	0,0000	67,7057	84,4612	100
7	2,4843	51,9753	99,7395	95,2202
8	11,0174	55,9279	106,5606	80,3006
9	0,0000	68,2838	102,9862	100
10	0,0000	63,4083	72,6096	100
11	0,0000	60,9907	77,0825	100
12	0,8841	24,2013	85,4281	96,3469
13	0,0000	58,5925	77,9588	100
14	0,0000	60,3597	86,9052	100
15	3,5470	54,7159	85,5317	93,5175
16	3,3098	74,7951	75,4524	95,5748
17	0,0000	67,6155	82,1651	100
18	1,6082	60,0417	87,0117	97,3215
19	0,0000	59,4932	75,8175	100
20	13,7551	44,1681	92,8659	68,8574
21	2,9715	49,5282	72,2974	94,0003
22	0,0000	58,4175	60,2330	100
23	2,6156	50,5741	63,7528	94,8282
24	3,2208	55,8992	78,5692	94,2382
25	2,2892	74,9253	65,0268	96,9447
26	1,4004	47,1747	74,5245	97,0316
27	2,9097	45,4633	84,7829	93,6000
28	2,0784	28,5488	68,8790	92,7198
29	2,8477	37,2967	57,9450	92,3646
30	5,8959	35,5808	72,5209	83,4295
31	10,1495	24,9962	51,0391	59,3959
32	11,2189	26,3296	47,6444	57,3906
33	9,9799	27,4376	62,3788	63,6267
34	8,3860	20,7642	72,5741	59,6132
35	11,1155	27,9195	51,8768	60,1875
36	8,3642	19,2652	49,0836	56,5837
37	7,9803	24,7283	53,4342	67,7280
38	12,5306	16,2117	22,5130	22,7065
39	7,7604	24,6357	130,1498	68,4995

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.35- Índices de Estabilidade de Tensão (f=60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barra	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	74,5197	102,4268	100
2	0,0000	95,0499	71,3706	100
3	3,2201	73,1724	89,3611	95,5993
4	10,6556	62,5385	101,2968	82,9615
5	0,0000	65,2166	89,9712	100
6	0,0000	67,7004	84,4660	100
7	2,4843	51,9723	99,7404	95,2199
8	11,0174	55,9245	106,5599	80,2994
9	0,0000	68,2815	102,9813	100
10	0,0000	63,4042	72,6154	100
11	0,0000	60,9867	77,0877	100
12	0,8841	24,2008	85,4303	96,3468
13	0,0000	58,5887	77,9634	100
14	0,0000	60,3554	86,9077	100
15	3,5470	54,7133	85,5313	93,5172
16	3,3098	74,7918	75,4511	95,5747
17	0,0000	67,6120	82,1646	100
18	1,6082	60,0384	87,0117	97,3213
19	0,0000	59,4930	75,8128	100
20	13,7551	44,1683	92,8626	68,8574
21	2,9715	49,5268	72,2973	94,0001
22	0,0000	58,4161	60,2337	100
23	2,6156	50,5729	63,7527	94,8281
24	3,2208	55,8974	78,5683	94,2380
25	2,2892	74,9223	65,0277	96,9446
26	1,4004	47,1730	74,5242	97,0314
27	2,9097	45,4617	84,7827	93,5997
28	2,0784	28,5482	68,8775	92,7197
29	2,8477	37,2959	57,9429	92,3645
30	5,8952	35,5799	72,5248	83,4310
31	10,1471	24,9957	51,0526	59,4048
32	11,2175	26,3291	47,6528	57,3951
33	9,9814	27,4374	62,3728	63,6211
34	8,3868	20,7643	72,5694	59,6095
35	11,1143	27,9193	51,8797	60,1913
36	8,3650	19,2650	49,0814	56,5794
37	7,9802	24,7279	53,4356	67,7280
38	12,5313	16,2118	22,5095	22,7025
39	7,7581	24,6371	130,1420	68,5106

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.2.4.2
Duas Áreas de Controle

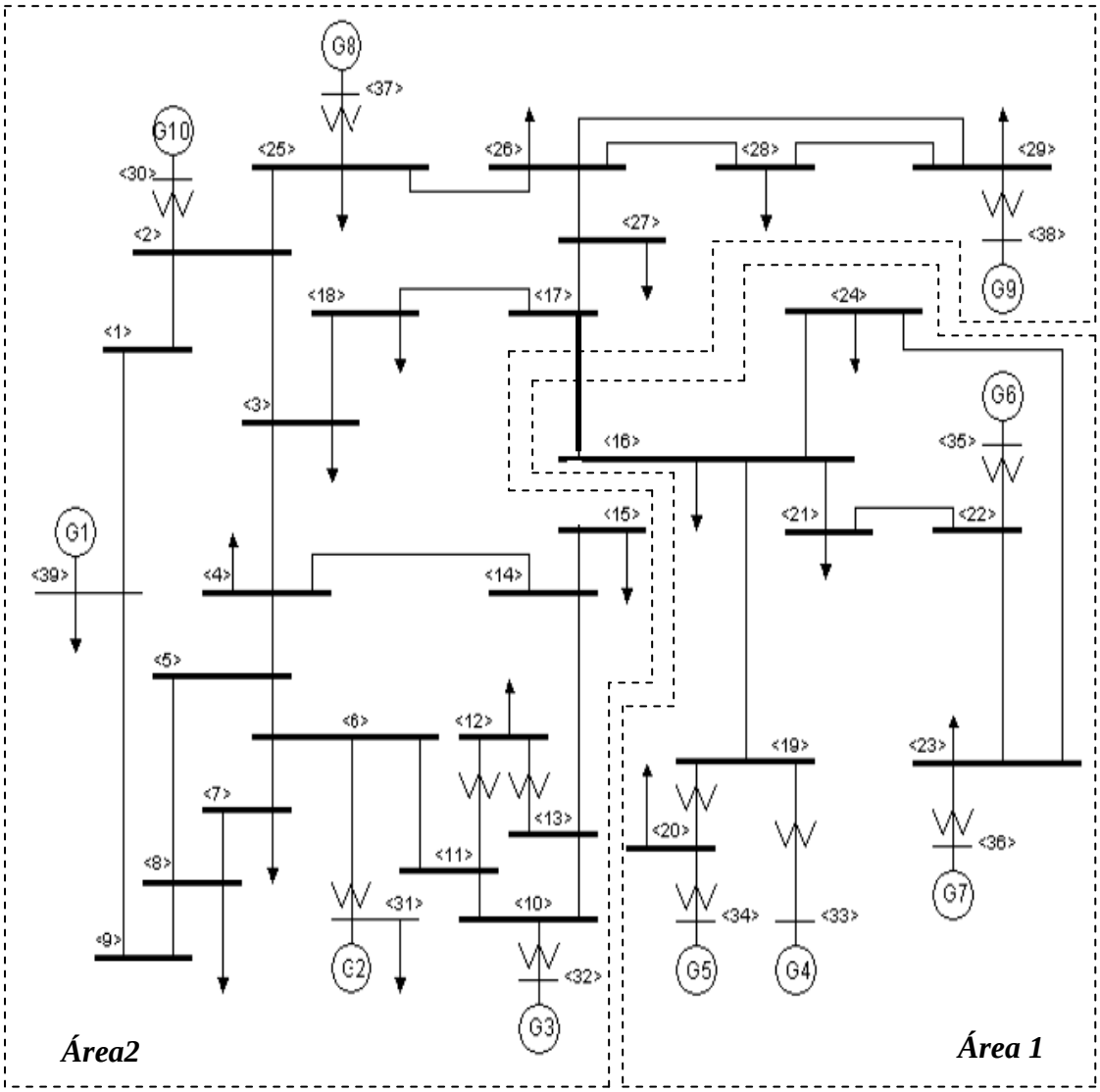

Figura 6.2- Divisão do Sistema *New England* de 39 Barras em Duas Áreas de Controle

Para que o sistema de 39 barras possa ter duas áreas de controle, retirou-se a linha 15-16. O único meio de intercâmbio de potência entre estas duas áreas é através da linha 16-17.

Os fatores de proporcionalidade para cada área de controle são apresentados na Tabela 6.35, sempre na base de 100 MVA.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.36- Fator de Participação dos Geradores nas Duas Áreas de Controle

Barra de geração	Área	Fator de participação da máquina (%)
30	2	6,51
31	2	14,92
32	2	16,92
33	1	26,88
34	1	21,61
35	1	27,68
36	1	23,83
37	2	14,05
38	2	21,59
39	2	26,01

Com a regulação primária não foi possível a recuperação da frequência e o intercâmbio entre áreas. A regulação secundária das duas áreas de controle é necessária. O novo ponto de operação é mostrado na Tabela 6.36.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Tabela 6.37- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária em Duas Áreas de Controle

Barras	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	0,9995	-27,9224	0,00	0,00
2	0,9799	-13,2950	0,00	0,00
3	0,9315	-18,5146	0,00	0,00
4	0,8619	-30,0214	0,00	0,00
5	0,8854	-29,4008	0,00	0,00
6	0,8944	-28,1445	0,00	0,00
7	0,8743	-32,8343	0,00	0,00
8	0,8703	-34,4460	0,00	0,00
9	0,9761	-35,6255	0,00	0,00
10	0,9141	-23,5227	0,00	0,00
11	0,9052	-25,0849	0,00	0,00
12	0,8856	-25,0958	0,00	0,00
13	0,8990	-24,9409	0,00	0,00
14	0,8694	-28,4245	0,00	0,00
15	0,8215	-33,8000	0,00	0,00
16	0,9898	-7,9895	0,00	0,00
17	0,9707	-10,6229	0,00	0,00
18	0,9520	-14,0557	0,00	0,00
19	1,0232	-6,9178	0,00	0,00
20	0,9605	-12,9430	0,00	0,00
21	0,9918	-3,6880	0,00	0,00
22	1,0180	2,7952	0,00	0,00
23	1,0017	2,7363	0,00	0,00
24	0,9939	-7,3587	0,00	0,00

Barras	Tensão (p.u.)	Ângulo (o)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
25	1,0166	-8,4222	0,00	0,00
26	0,9902	-4,7010	0,00	0,00
27	0,9732	-8,7111	0,00	0,00
28	0,9990	5,7954	0,00	0,00
29	1,0104	10,8449	0,00	0,00
30	1,0480	-9,1615	398,97	547,23
31	0,9820	-12,9106	871,95	693,86
32	0,9830	-9,2217	1037,18	762,75
33	0,9970	0,0000	823,17	294,48
34	1,0120	-6,0265	661,69	343,47
35	1,0490	9,4698	846,79	458,96
36	1,0040	14,0950	729,43	67,66
37	1,0000	3,1692	861,54	100,43
38	1,0270	22,4626	1324,11	336,70
39	1,0300	-36,1735	1595,14	811,50

A regulação secundária recuperou o valor da frequência $f = 60\,Hz$ e o intercâmbio entre áreas $P_{16-17} = 510.5\,MW$. Com o novo ponto de operação calculam-se os índices de estabilidade de tensão. Os resultados estão nas Tabelas 6.38 e 6.39.

Tabela 6.38- Índices de Estabilidade de Tensão (Resposta dos Geradores de Acordo a Regulação Secundária)

Barras	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	68,1432	97,2737	100
2	0,0000	76,5205	63,6486	100
3	3,2201	55,8335	79,6239	94,2327
4	10,6556	44,7006	107,0011	76,1622
5	0,0000	49,2788	94,8744	100
6	0,0000	51,4753	89,3489	100
7	2,4843	41,3399	103,3744	93,9905
8	11,0174	44,7848	109,7052	75,3992
9	0,0000	62,7051	100,6279	100
10	0,0000	46,1300	76,5825	100
11	0,0000	45,3459	81,1801	100
12	0,8841	19,7977	86,9963	95,5344
13	0,0000	40,4770	83,0873	100
14	0,0000	34,8351	97,1014	100
15	3,5470	15,6257	110,2851	77,3005
16	3,3098	81,8116	100,9918	95,9544
17	0,0000	46,1951	71,0093	100
18	1,6082	44,2892	75,2481	96,3688
19	0,0000	170,5767	109,2935	100

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barras	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
20	13,7551	73,7270	108,5627	81,3432
21	2,9715	57,6113	87,9085	94,8421
22	0,0000	71,0528	72,7199	100
23	2,6156	61,3250	75,2963	95,7349
24	3,2208	62,2331	97,3881	94,8246
25	2,2892	64,2400	59,0366	96,4365
26	1,4004	39,0365	69,9772	96,4127
27	2,9097	35,8996	78,4787	91,8950
28	2,0784	25,7874	65,5848	91,9402
29	2,8477	33,8694	54,1394	91,5920
30	6,7723	39,1396	76,9872	82,6972
31	11,0427	22,7084	57,3319	51,3716
32	12,8745	23,1200	48,4613	44,3147
33	8,7426	37,5685	66,5055	76,7290
34	7,4552	26,4288	81,8993	71,7915
35	9,6317	28,8232	61,3397	66,5833
36	7,3256	19,9083	55,9128	63,2033
37	8,6737	27,4619	53,5484	68,4153
38	13,6625	17,0048	14,7295	19,6553
39	6,8748	23,7724	129,1735	71,0810

Tabela 6.39- Índices de Estabilidade (f=60Hz. Resposta dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)

Barras	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
1	0,0000	33,7561	103,1761	100
2	0,0000	68,5912	88,8832	100
3	3,2201	58,0946	108,6389	94,4572
4	10,6556	35,1905	119,3544	69,7202
5	0,0000	34,4600	107,0328	100
6	0,0000	35,9188	102,7919	100
7	2,4843	28,7637	110,1793	91,3630
8	11,0174	31,0605	114,3307	64,5290
9	0,0000	29,6942	96,8546	100
10	0,0000	34,7515	89,8704	100
11	0,0000	33,5910	93,9860	100
12	0,8841	16,7263	92,4024	94,7143
13	0,0000	31,0120	94,7236	100
14	0,0000	27,3348	106,7893	100
15	3,5470	13,7227	113,3739	74,1526
16	3,3098	133,8687	96,0017	97,5276
17	0,0000	91,6711	101,2908	100
18	1,6082	65,7304	104,8483	97,5533
19	0,0000	279,4557	106,4188	100

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Barras	Si (p.u.)	Sm (p.u.)	β (graus)	M (%)
20	13,7551	75,1996	107,3182	81,7085
21	2,9715	67,8504	81,9036	95,6204
22	0,0000	75,9763	68,8347	100
23	2,6156	65,0209	71,3859	95,9773
24	3,2208	82,5820	92,2025	96,0999
25	2,2892	64,8359	81,1249	96,4693
26	1,4004	47,7421	81,5088	97,0668
27	2,9097	49,8088	94,1606	94,1583
28	2,0784	28,3412	69,0097	92,6665
29	2,8477	37,0233	57,3998	92,3083
30	6,7723	31,3257	80,8577	78,3811
31	11,0427	20,8690	61,4232	47,0854
32	12,8745	21,5839	53,2687	40,3517
33	8,7426	25,8595	66,6360	66,1921
34	7,4552	28,8294	79,4602	74,1404
35	9,6317	33,2884	56,0517	71,0658
36	7,3256	21,9658	52,6009	66,6499
37	8,6737	24,2563	58,5549	64,2414
38	13,6625	16,8391	16,6503	18,8645
39	6,8748	21,5127	123,2865	68,0432

Observa-se nos resultados apresentados para os sistemas de 6 barras e 39 barras que, para cada ponto de operação obtido (despacho proporcional, após regulação primária e após a regulação secundária), tem-se duas tabelas de resultados para índices de estabilidade de tensão. Isto é consequência da escolha dos geradores e da resposta dos mesmos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

6.3
Conclusões

Neste capítulo de resultados numéricos foram apresentados pontos de operação obtidos por diferentes modelagens refletidas no algoritmo de fluxo de carga, como mostradas no capítulo anterior, incluindo modelagem de múltiplas *swing*, o que permite a distribuição de geração de acordo com o despacho proporcional, da regulação própria, da regulação primária e da regulação secundária. Foram apresentados os índices de estabilidade de tensão correspondentes, calculados pelos modelos de sistemas linearizados propostos neste trabalho.

Ressaltou-se que os índices de estabilidade de tensão não são comparáveis, mesmo quando calculados no mesmo ponto de operação, porque os geradores disponíveis para absorver as variações infinitesimais de potência ativa da barra em análise, assim como as variações correspondentes nas perdas, são diferentes em cada modelagem. Mesmo se fossem os mesmos geradores, ainda assim, os fatores de participação não são os mesmos. Por exemplo, todos os geradores participam do despacho proporcional e os fatores de participação são os custos associados às gerações. Por outro lado, nem todos os geradores participam da regulação primária de frequência e os fatores de participação são suas energias de regulação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA