

6

Resultados dos Testes

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com as técnicas e os modelos propostos para a APET. Os modelos e técnicas descritos nas seções precedentes foram aplicados em três sistemas-teste:

- i) IEEE-MRTS: versão modificada do sistema IEEE-RTS [RTS Task Force, 1999], [Bertoldi, 1988];
- ii) EQV-65 e EQV-107: sistemas equivalentes de 65 e 107 barras, respectivamente, obtidos do sistema interligado nacional [Alves,2007].

Primeiramente, o sistema IEEE-MRTS foi usado para realizar uma análise comparativa entre as técnicas de seleção de estados usadas na APET, ou seja: enumeração e SMC. Em seguida, a APET dos sistemas EQV-65 e EQV-107 foi efetuada com o objetivo de estimar os índices: RIT, probabilidades dos estados de robustez e valor esperado do índice de influência nodal. Os sistemas brasileiros também foram utilizados para executar uma análise de causa raiz da instabilidade de tensão e uma avaliação da eficiência das ações de controle usadas na RESFLUP. Os resultados apresentados nas seguintes seções são organizados da forma:

- i) a Seção 6.1 contém uma descrição geral dos sistemas-teste;
- ii) a Seção 6.2 mostra os resultados do estudo comparativo entre os métodos de SMC e enumeração no sistema IEEE-MRTS;
- iii) a Seção 6.3 apresenta os resultados da APET nos sistemas EQV-65 e EQV-107;
- iv) finalmente, a Seção 6.4 mostra alguns resultados associados com o algoritmo de estimação de parâmetros do sistema equivalente, descrito na Subseção 4.2.1.

6.1

Características dos Sistemas-Teste

O sistema EQV-65 é composto pelas áreas Sul e Sudeste do sistema interligado nacional. O sistema EQV-107 é formado por três áreas: Sul, Sudeste e Mato Grosso. Nestes sistemas, a geração é predominantemente hidroelétrica. No sistema IEEE-MRTS a geração é predominantemente térmica. Devido a isto, o despacho de geração no sistema IEEE-MRTS é realizado usando uma lista de ordem de mérito baseada nos custos de produção. Por outro lado, nos sistemas brasileiros o despacho de geração é realizado através da minimização do desvio quadrático entre a potência de saída das usinas e um padrão de geração especificado (ver Subseção 1.3.4). As principais características dos sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 são apresentadas na Tabela 6.1. Além disso, os diagramas unifilares dos sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 são mostrados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, respectivamente. Adicionalmente, é importante mencionar que os dados de confiabilidade dos sistemas EQV-65 e EQV-107 foram obtidos de [Schilling, 2008].

Tabela 6.1 – Características dos sistemas-teste

Características	Sistemas		
	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
Capacidade Instalada (MW)	4304,0	17858,2	22080,2
Pico de Carga (MW)	3562,4	10102,1	12681,7
Nº de Barras	24	65	107
Nº de Circuitos	31	141	230
Nº de Geradores	40	65	103
Nº de Usinas	10	14	23
Nº de Compensadores	1	4	5

O sistema IEEE-MRTS foi usado devido ao seu sistema de transmissão ser bastante carregado. Por outro lado, Os sistemas brasileiros foram utilizados porque as suas usinas de geração estão localizadas distantes dos centros de carga. Portanto, há troncos de transmissão transportando grandes blocos de energia a longas distâncias. Conseqüentemente, os três sistemas-teste são adequados para estudos de instabilidade de tensão.

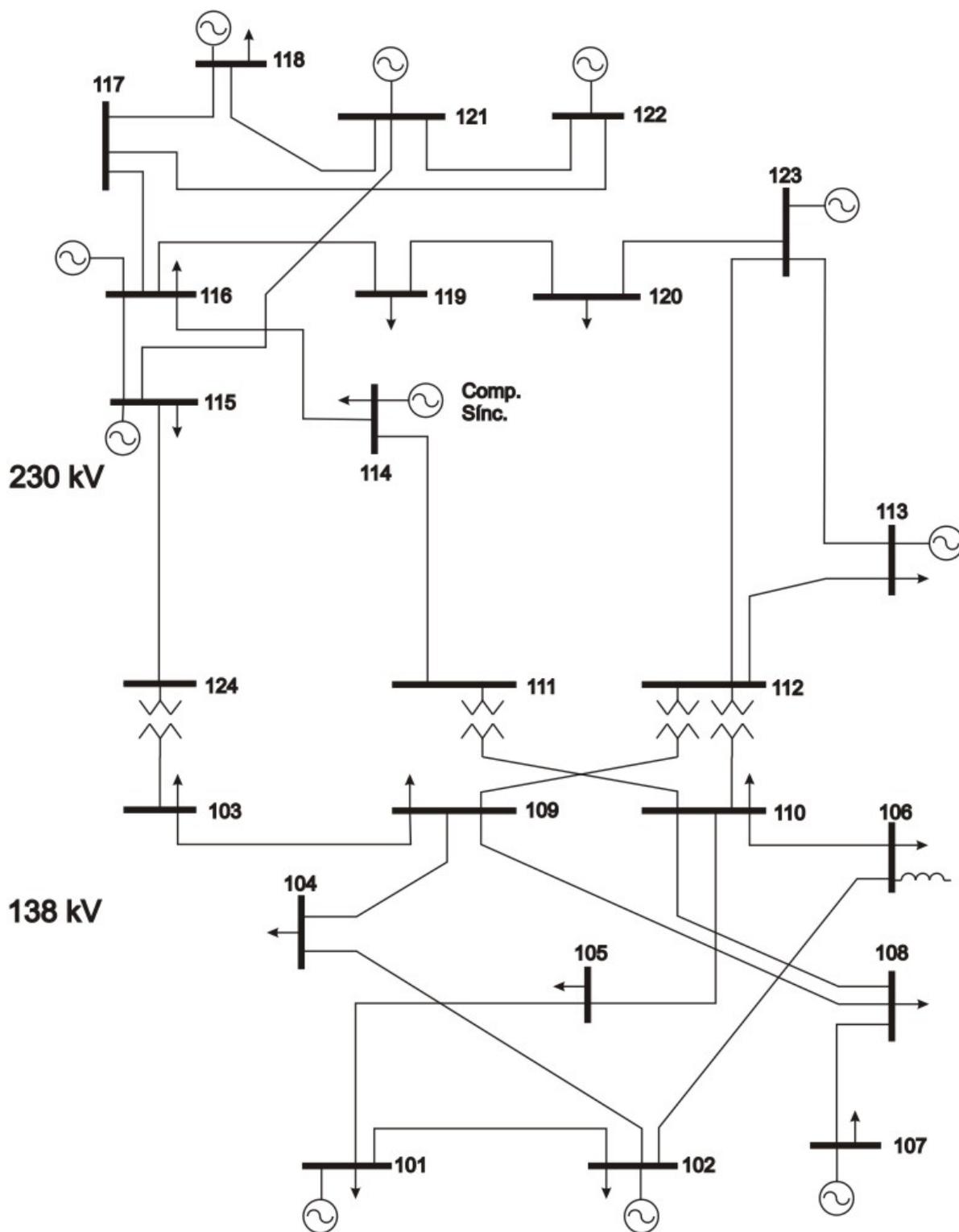


Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-MRTS

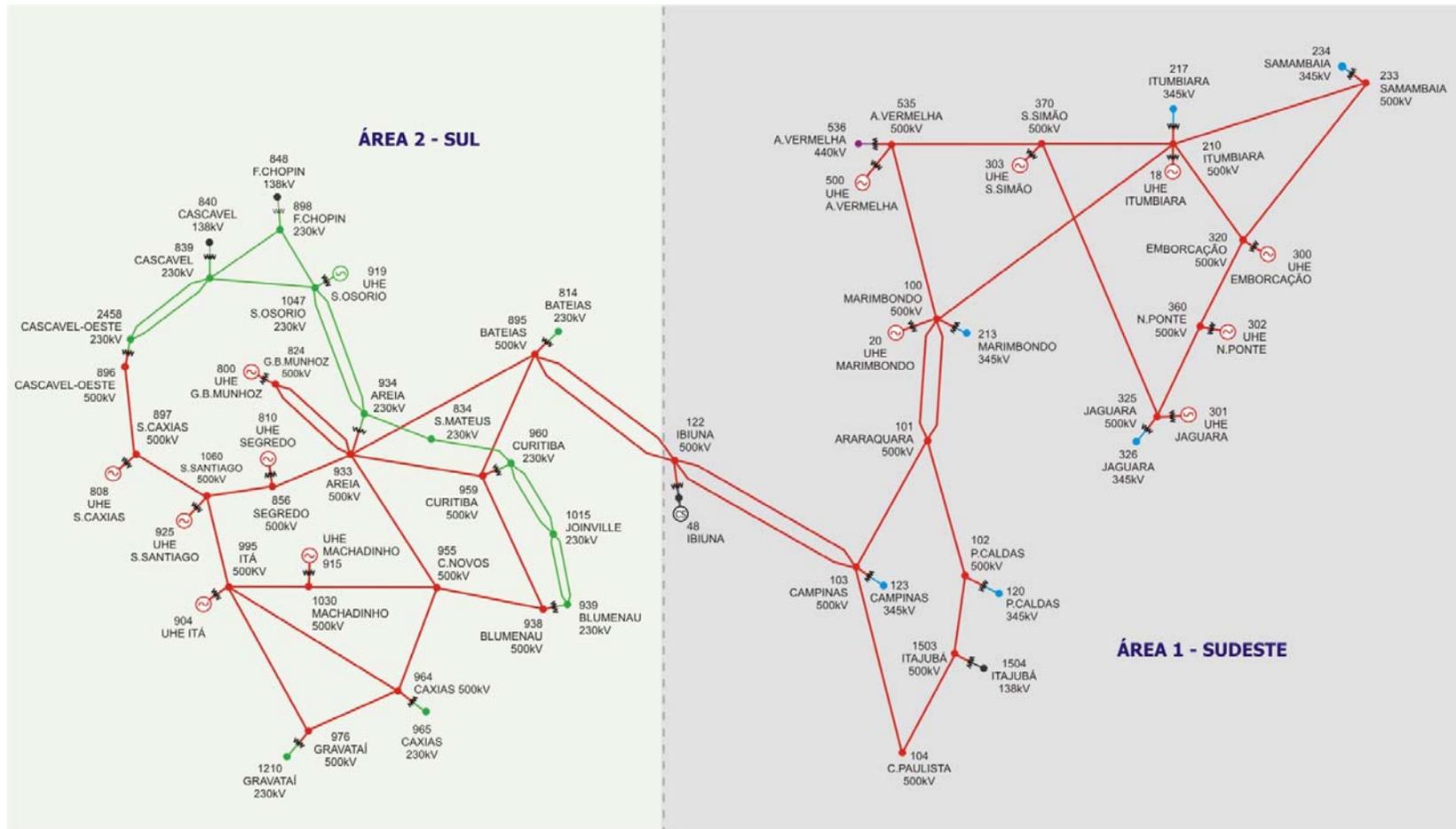


Figura 6.2 – Diagrama unifilar do sistema EQV-65 [Alves, 2007]

6.2

Análise Comparativa das Técnicas de Seleção de Estados Usadas na APET

Nesta seção, os métodos de enumeração e SMC são comparados na APET do sistema IEEE-MRTS. Esta comparação tem como objetivo avaliar a precisão e o custo computacional das técnicas de seleção de estados usadas na APET. Estes dois aspectos serão avaliados na estimação dos seguintes índices probabilísticos: RIT, probabilidades dos estados de robustez e valores esperados das MET nodais. A estimação destes índices via enumeração foi realizada considerando-se os tipos de eventos de falha descritos na Tabela 6.2. Estes eventos de falha foram especificados com base nas ordens e tipos de contingências usadas em estudos de confiabilidade no NH2 [Billinton, 1988], [Billinton, 1994]. As contingências de geração de 5ª ordem, especificadas na Tabela 6.2, garantem que os resultados fornecidos pela enumeração sejam comparáveis com aqueles gerados pela SMC [Billinton, 1994]. Por outro lado, a APET via SMC foi realizada sob as seguintes condições:

- i) a tolerância pré-especificada (β^{esp}) para a incerteza relativa (β) é igual a 5%;
- ii) a SMC converge quando $\beta < \beta^{esp}$ para os seguintes índices: RIT, probabilidades dos estados de robustez e MET nodais esperadas;
- iii) a dimensão máxima para a amostra de estados do sistema é 100000,
- iv) a APET é realizada para a condição de pico de carga, ou seja, o erro de previsão de carga é nulo,
- v) as indisponibilidades dos equipamentos são representadas por um modelo de dois estados.

A última condição é usada devido ao fato de que a modelagem de componentes multi-estados causa um aumento excessivo nos custos computacionais associados com a técnica de enumeração de estados.

A APET via SMC, considerando as condições (i)-(iv), gerou uma amostra de estados do sistema com dimensão igual a 36563. O tempo computacional para a avaliação desta amostra foi 3,4289 minutos. Este tempo foi obtido usando um PC com processador Intel Core Quad de 2,4 GHz e 3,25 GB de memória RAM. Por outro lado, a APET via enumeração, com os tipos de eventos de falha da Tabela 6.2, resultou na avaliação de 1219837 estados e obteve um alcance de 99,3417%. O tempo computacional para avaliar estes estados foi de 151,0622 minutos (2,5177 horas).

Tabela 6.2 – Tipos de eventos de falha considerados no método de enumeração de estados

Número de Componentes fora de serviço			
Compensadores	Geradores	Circuitos	Total
0	1	0	1
0	2	0	2
0	3	0	3
0	4	0	4
0	5	0	5
1	0	0	1
0	0	1	1
0	0	2	2
1	1	0	2
0	1	1	2
1	0	1	2
1	2	0	3
1	3	0	4
0	2	1	3
1	1	1	3
0	3	1	4
1	2	1	4
1	4	0	5

A partir dos resultados mostrados acima pode-se concluir que o tempo de computação da SMC é aproximadamente 44 vezes menor do que aquele exigido pela enumeração. Este resultado é devido ao conjunto de estados enumerados ser aproximadamente 33 vezes maior do que o tamanho da amostra de estados do sistema. Em outras palavras, os custos computacionais da enumeração são consideravelmente mais elevados que os da SMC na APET.

Os valores do RIT e das probabilidades dos estados de robustez, estimadas via SMC e enumeração, são apresentados na Tabela 6.3. Além disso, esta tabela

também mostra os erros percentuais entre os índices estimados pelos métodos de enumeração e SMC, isto é: $100\% \times \frac{|\tilde{E}[F^{EE}] - \tilde{E}[F^{SMC}]|}{\tilde{E}[F^{SMC}]}$, onde $\tilde{E}[F^{SMC}]$ ($\tilde{E}[F^{EE}]$) é a média amostral (valor esperado) de um índice calculado pelo método de SMC (enumeração de estados).

Tabela 6.3 – Comparação dos índices de robustez e do RIT estimados pelos métodos de enumeração e SMC

Índices	Enumeração	SMC	Erro (%)
RIT	$2,2252 \times 10^{-1}$	$2,2301 \times 10^{-1}$	0,2218
P(Saudável)	$7,7090 \times 10^{-1}$	$7,7699 \times 10^{-1}$	0,7836
P(Marginal)	$2,1652 \times 10^{-2}$	$2,1032 \times 10^{-2}$	2,9464
P(Emergência)	$1,9070 \times 10^{-1}$	$1,9115 \times 10^{-1}$	0,2352
P(Colapso)	$1,0166 \times 10^{-2}$	$1,0831 \times 10^{-2}$	6,1376

A partir da Tabela 6.3, pode-se concluir que os valores dos índices estimados pela enumeração são muito próximos daqueles obtidos pela SMC. Por exemplo, o valor máximo do erro percentual é 6.1376% para a probabilidade do estado de colapso.

Adicionalmente, os métodos de enumeração e SMC também foram usados para estimar os valores esperados condicionais das MET nodais. Estes valores esperados condicionais são mostrados na Tabela 6.4. Esta tabela também apresenta os erros percentuais entre os valores esperados das MET nodais calculados pelos métodos de enumeração e SMC.

Os resultados mostrados na Tabela 6.4 demonstram que as diferenças entre as MET nodais calculadas via SMC e enumeração são muito pequenas. Por exemplo, o valor máximo do erro entre os valores esperados das MET nodais é igual a 1,2258% na barra 107.

Os resultados nas Tabelas 6.3 e 6.4 demonstram quantitativamente que as estimativas dos índices fornecidas pela SMC e pela enumeração são similares. Contudo, a avaliação do desempenho computacional confirma que a técnica de seleção de estados mais adequada para a APET no NH2 é a SMC. A principal vantagem da SMC com relação à enumeração é o seu baixo custo computacional.

Por exemplo, o tempo exigido pela SMC para realizar uma APET no sistema IEEE-MRTS é igual a apenas 2,2699% do tempo exigido pela enumeração. O alto custo computacional da técnica de enumeração inviabiliza a sua aplicação em sistemas de grande porte, tais como os sistemas EQV-65 e EQV-107. Devido a isto, a APET nos sistemas brasileiros será realizada através da SMC. Finalmente, deve ser lembrado que a APET via enumeração é realizada somente para a condição de pico de carga. Esta restrição é devido ao fato de que a modelagem do erro de previsão causa um aumento excessivo nos custos computacionais da enumeração (ver Subseção 5.2.3). Entretanto, será mostrado na próxima seção que o erro de previsão de carga tem um fator de participação significativo no RIT.

Tabela 6.4 – Comparação dos valores esperados das MET nodais calculadas via enumeração e SMC

Barra	Enumeração	SMC	Erro (%)
101	43,3548	43,3343	0,0473
102	23,6279	23,8352	0,8697
103	59,3591	59,4462	0,1465
104	54,4209	54,5864	0,3032
105	45,1552	45,3416	0,4111
106	51,8933	52,0556	0,3118
107	34,3516	34,7779	1,2258
108	50,8369	50,8601	0,0456
109	49,0299	49,1675	0,2799
110	42,3047	42,4489	0,3397
111	38,4857	38,5689	0,2157
112	48,3646	48,3933	0,0593
113	32,7760	32,9542	0,5408
114	41,9592	42,2241	0,6274
115	27,5313	27,5618	0,1107
116	22,1323	22,2606	0,5764
117	23,3724	23,5012	0,5481
118	21,7823	21,9310	0,6780
119	34,4272	34,5141	0,2518
120	28,7465	28,7459	0,0021
121	29,1991	29,2980	0,3376
122	41,4036	41,5092	0,2544
123	52,5270	52,4809	0,0878
124	61,1906	61,2512	0,0989

6.3

APET nos Sistemas EQV-65 e EQV-107

Nesta seção são apresentados os resultados da APET realizada nos sistemas brasileiros EQV-65 e EQV-107. Também são mostrados alguns índices probabilísticos estimados no sistema IEEE-MRTS com a modelagem do erro de previsão de carga. Os resultados apresentados a seguir são organizados da seguinte forma:

- i) Subseção 6.3.1: apresenta uma avaliação da precisão e dos custos computacionais da APET via SMC;
- ii) Subseção 6.3.2: realiza uma APET baseada em índices do sistema (RIT, probabilidades dos estados de robustez e fatores de participação);
- iii) Subseção 6.3.3: mostra como os valores esperados do índice de influência podem ser usados para identificar barras e áreas críticas na APET.

6.3.1

Avaliação da Precisão e do Esforço Computacional da SMC

Os índices obtidos com a APET via SMC foram estimados sob as seguintes condições:

- i) o erro de previsão de carga (σ^p) é 5%;
- ii) falhas em circuitos, geradores e compensadores tem sido consideradas na APET;
- iii) a tolerância pré-especificada (β^{esp}) para o coeficiente (β) de variação é igual a 5%;
- iv) a SMC converge quando $\beta < \beta^{esp}$ para os seguintes índices: RIT, probabilidades dos estados de robustez e MET nodais esperadas;

- v) o tamanho máximo para a amostra de estados da rede elétrica é 100000 para o sistema IEEE-MRTS e 50000 para os sistemas brasileiros;
- vi) o modelo de dois estados foi usado para representar falhas nas unidades geradoras.

A última condição é usada devido a falta de dados associados com modelos multi-estados nos sistemas brasileiros.

O esforço computacional (tamanho da amostra e tempo de computação) para realizar uma APET em cada sistema-teste, considerando as condições (i)-(v), é mostrado na Tabela 6.5. Os resultados apresentados nesta tabela foram obtidos com a mesma plataforma computacional especificada na Seção 6.2.

Tabela 6.5 – Esforço computacional para realizar uma APET nos sistemas-teste

Sistema	Tamanho da Amostra	Tempo Computacional (min.)
IEEE-MRTS	42401	4,5036
EQV-65	38193	8,0242
EQV-107	39955	25,2453

Os resultados da Tabela 6.5 demonstram que o tamanho da amostra, exigido para satisfazer uma precisão especificada, é independente da dimensão do sistema. Por exemplo, os sistemas-teste com o menor e o maior número de componentes são o IEEE-MRTS e o EQV-107, respectivamente. Entretanto, o tamanho da amostra no sistema IEEE-MRTS é maior que aquele associado com o sistema EQV-107. Este efeito é devido ao tamanho da amostra ser dado por (5.2):

$$NA = \frac{\tilde{Var}[F]}{(\beta^{esp} E[F])^2}$$

Conseqüentemente, índices com pequenos valores esperados ou grandes variâncias exigem amostras com dimensões elevadas. Por exemplo, o tamanho exigido da amostra para estimar uma probabilidade \tilde{Q} é dado por:

$$NA = \frac{\tilde{Var}[F]}{(\beta^{esp} E[F])^2} = \frac{\tilde{Q} - \tilde{Q}^2}{(\beta^{esp} \tilde{Q})^2} = \frac{1 - \tilde{Q}}{\tilde{Q}(\beta^{esp})^2} \approx \frac{1}{\tilde{Q}(\beta^{esp})^2}$$

A última equação demonstra que quando a probabilidade \tilde{Q} se aproxima de zero o tamanho da amostra tende para infinito.

A Tabela 6.5 também mostra que a modelagem do erro de previsão de carga causou um aumento de apenas 31,3424% no tempo de computação da SMC no sistema IEEE-MRTS. Em outras palavras, o custo computacional para modelar os erros de previsão de carga na APET via SMC é consideravelmente menor que aquele associado com a enumeração de estados.

Os valores de β para os índices probabilísticos estimados são mostrados na Tabela 6.6. Nesta tabela, o valor de β associado com a MET nodal esperada é igual ao β máximo da MET para todas as barras do sistema.

Tabela 6.6 – Coeficiente de variação para os índices probabilísticos (em porcentagem)

Índices	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
RIT	0,8120	0,8055	0,8396
P(Saudável)	0,2905	0,3251	0,2981
P(Marginal)	4,9954	0,9109	4,9939
P(Emergência)	0,8624	2,5992	0,8922
P(Colapso)	4,1752	4,9991	4,3738
MET Nodal Esperada	0,6992	1,1080	0,3213

A partir da Tabela 6.6, pode-se concluir que a convergência da SMC é dominada pelas probabilidades dos estados de robustez. Por exemplo, as incertezas relativas máximas para os sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 estão associadas com os seguintes índices: P(Marginal), P(Colapso) e P(Marginal), respectivamente. Este efeito é devido à incerteza relativa, associada com uma probabilidade \tilde{Q} , ser dada por (5.1):

$$\beta[F] = \frac{\tilde{\sigma}[F]}{\tilde{E}[F]} = \frac{\sqrt{(\tilde{Q} - \tilde{Q}^2)/NS}}{\tilde{Q}} = \sqrt{\frac{1 - \tilde{Q}}{\tilde{Q} \cdot NA}} \approx \frac{1}{\sqrt{\tilde{Q} \cdot NA}}$$

A partir da última equação, pode-se concluir que probabilidades pequenas resultam em grandes incertezas relativas para uma amostra com dimensão especificada. As probabilidades dos estados Marginal, Colapso e Marginal são os índices com os menores valores esperados nos sistemas-teste MRTS, EQV-65 e

EQV-107, respectivamente. Conseqüentemente, as incertezas relativas dos índices P(Marginal) e P(Colapso) tendem a ser maiores que aquelas associadas com outros índices.

6.3.2

APET Baseada em Índices do Sistema

Os valores do RIT para os sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 são iguais a: 26.3484%, 28.7540% e 26.2045%, respectivamente. Este resultado demonstra que o RIT para os três sistemas-teste é bastante elevado. Contudo, as causas dos valores elevados do RIT não são as mesmas para os três sistemas. Este fato pode ser demonstrado calculando-se os fatores de participação das incertezas no RIT. Isto é, a porcentagem de cada incerteza no RIT. Estes fatores de participação permitem realizar uma análise de causa raiz do RIT orientada para os distúrbios da rede elétrica. Os fatores de participação das incertezas no RIT são apresentados na Tabela 6.7. Nesta tabela as incertezas são identificadas com as seguintes siglas:

- i) G – contingências nos geradores e/ou compensadores síncronos,
- ii) C – contingências nos circuitos (linhas e transformadores),
- iii) GC – falhas simultâneas de geradores e circuitos,
- iv) E – flutuações no pico de carga devido a erros de previsão (sem componentes fora de serviço).

Tabela 6.7 – Análise de causa raiz do RIT com relação aos distúrbios do sistema

Incetezas	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
G	69,8980 %	19,1950 %	42,0535 %
C	0,9846 %	24,2488 %	13,1614 %
GC	4,2338 %	9,7159 %	24,4795 %
E	24,8836 %	46,8403 %	20,3056 %

A partir da Tabela 6.7 pode-se concluir que:

- i) Os estados instáveis associados com os sistemas IEEE-MRTS e EQV-107 são causados principalmente por falhas nos geradores. Este efeito pode ser causado pela existência de uma deficiência na reserva de geração de potência reativa. Consequentemente, não há recursos de potência reativa suficientes para corrigir o perfil de tensão em estados de contingência.
- ii) O fator de participação associado com o erro de previsão de carga é significativo nos três sistemas-teste. Por exemplo, o valor mínimo do fator de participação do referente ao erro de previsão no RIT é 20,3056% no sistema EQV-107.
- iii) O sistema onde as falhas na transmissão têm maior impacto no RIT é o EQV-65. Desta forma, pode ser necessário realizar reforços na rede de transmissão do sistema EQV-65 para eliminar problemas de instabilidade de tensão.

A APET também gerou estimativas para os índices de robustez. Estes índices permitem realizar uma análise da estabilidade de tensão baseada nos mecanismos causadores dos estados instáveis. A análise de robustez também proporciona uma identificação dos estados insolúveis que podem ser restaurados sem o uso de corte de carga. As probabilidades dos estados de robustez para os três sistemas-teste são mostradas na Tabela 6.8. Estas probabilidades podem ser usadas para calcular os fatores de participação dos estados de robustez instáveis (marginal, emergência e colapso) no RIT. Ou seja, é possível usar as probabilidades dos estados de robustez uma análise de causa raiz do RIT orientada para os mecanismos da instabilidade de tensão. Os fatores de participação dos estados marginal, emergência e colapso são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.8 – Probabilidades dos estados de robustez

Estados	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
Saudável	$7,3652 \times 10^{-1}$	$7,1246 \times 10^{-1}$	$7,3796 \times 10^{-1}$
Marginal	$9,3630 \times 10^{-3}$	$2,3986 \times 10^{-1}$	$9,9362 \times 10^{-3}$
Emergência	$2,4077 \times 10^{-1}$	$3,7311 \times 10^{-2}$	$2,3919 \times 10^{-1}$
Colapso	$1,3349 \times 10^{-2}$	$1,0368 \times 10^{-2}$	$1,2915 \times 10^{-2}$

Tabela 6.9 – Fatores de participação dos estados de robustez instáveis no RIT

Estados	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
Marginal	3,5535 %	83,4183 %	3,7918 %
Emergência	91,3802 %	12,9758 %	91,2798 %
Colapso	5,0662 %	3,6059 %	4,9284 %

Os resultados das Tabelas 6.8 e 6.9 indicam que:

- i) O estado de emergência é o estado mais provável nos sistemas IEEE-MRTS e EQV-107. Em outras palavras, nestes sistemas a causa raiz da instabilidade de tensão é a ausência de solubilidade. Este fato também é demonstrado pelos fatores de participação do estado de emergência, pois os valores destes fatores para os sistemas IEEE-MRTS e EQV-107 são iguais a 91,3802% e 91,2798%, respectivamente. Por outro lado, o fator de participação do estado de emergência para o sistema EQV-65 é somente 12,9758%.
- ii) O valor máximo da probabilidade de ocorrência do estado marginal está associado com o sistema EQV-65. Devido a isto, o maior valor do fator de participação do estado marginal ocorre neste sistema (83,4183%). Ou seja, no sistema EQV-65 os estados instáveis são causados principalmente pela perda de controlabilidade.
- iii) Os fatores de participação associados com o estado de colapso são pequenos para os três sistemas-teste. Por exemplo, o valor máximo do fator de participação, associado com o estado de colapso, para os três sistemas-teste é igual a 5,0662%. Em outras palavras, pode-se realizar a RESFLUP na maioria dos estados insolúveis sem a utilização do corte de carga. Desta forma, pode-se concluir que a insolubilidade das equações de fluxo de potência não é muito severa nos sistemas-teste.

É também importante avaliar a eficiência das ações de controle usadas na RESFLUP. Esta avaliação pode ser realizada através do cálculo de fatores de participação dos estados de robustez insolúveis (emergência e colapso) com relação à probabilidade de insolubilidade. Estes fatores de participação são apresentados na Tabela 6.10 para os três sistemas-teste.

Tabela 6.10 – Eficiência das ações de controle usadas na RESFLUP

Estados	IEEE-MRTS	EQV-65	EQV-107
Emergência	94,7471 %	78,2537 %	94,8774 %
Colapso	5,2529 %	21,7463 %	5,1226 %

A partir da Tabela 6.10, pode-se observar que o redespacho de geração e o ajuste das tensões terminais em barras PV e V θ foram bastante eficientes para evitar o corte de carga nos estados insolúveis dos sistemas IEEE-MRTS e EQV-107. Por exemplo, o valor mínimo do fator de participação, associado com o estado de emergência, nestes sistemas é 94,7471%. Isto é, o maior percentual de estados insolúveis que exigiu corte de carga na RESFLUP é 5,2529%. Por outro lado, os reajustes da potência de saída e da tensão terminal em barras de geração foram capazes de evitar o corte de carga em apenas 78,2537% dos estados insolúveis do sistema EQV-65. Conseqüentemente, a insolubilidade das equações de fluxo de potência é mais severa neste sistema.

Finalmente, deve-se mencionar que há estados do sistema nos quais há perda de controlabilidade após a realização da RESFLUP. Isto ocorre devido à ausência de restrições de estabilidade de tensão no algoritmo de FPO usado para realizar a RESFLUP. Conseqüentemente, uma solução restaurada do algoritmo de FPO pode apresentar problemas de perda de controlabilidade. Isto é, a solução obtida pelo algoritmo de FPO está localizada na região instável da curva PV (metade inferior). A probabilidade de um estado ter problemas de perda de controlabilidade e ausência de solubilidade para os sistemas-teste IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 são iguais a: 0,0684%, 4,5977% e 4,5376%, respectivamente. A partir destes resultados, pode-se concluir que a probabilidade de ocorrência dos dois mecanismos de instabilidade de tensão é significativa para os sistemas brasileiros. Por exemplo, o valor mínimo desta probabilidade nos sistemas EQV-65 e EQV-107 é 4,5376%.

6.3.3

Identificação de Barras e Áreas Críticas Usando o Valor Esperado do Índice de Influência

Nesta subseção os valores esperados do índice de influência são usados para identificar barras e áreas críticas no sistema EQV-107. Este sistema-teste é composto por duas áreas do sistema interligado nacional nas quais já foram detectados problemas de instabilidade de tensão. [Prada, 2002], [Granville, 1996].

Desta forma, é possível verificar se o método proposto identifica corretamente estas áreas. Os valores esperados do índice de influência, para 21 barras de cada área do sistema EQV-107, são mostrados na Tabela 6.11.

A partir da Tabela 6.11, pode-se observar que os valores esperados do índice de influência referentes à área Sul são menos negativos que aqueles associados com as áreas Sudeste e Mato Grosso. Por exemplo, os valores mínimos do índice de influência para as áreas Sul, Sudeste e Mato Grosso são iguais a -1,4086%, -7,4439% e -11,5313%, respectivamente. Em outras palavras, a área Sul é mais estável que as áreas Sudeste e Mato Grosso. Por outro lado, pode-se notar que a área Mato Grosso é a mais vulnerável a problemas de instabilidade de tensão no sistema EQV-107. Isto ocorre devido à topologia da área Mato Grosso ser basicamente radial (ver Figura 6.3). Conseqüentemente, há poucos caminhos para transferir potência para as barras de carga. Portanto, a margem de carregamento da área Mato Grosso é menor que a margem das outras áreas. A Tabela 6.11 também mostra que as barras da área Sudeste experimentaram reduções significativas na MET nodal. Por exemplo, a maior redução na MET nodal da área Sudeste é igual a -7,4439 na barra 48 (CS-IBIÚNA).

É importante mencionar que em [Prada, 2002] foi realizado um estudo do ponto de operação associado com o distúrbio do sistema brasileiro Sul/Sudeste ocorrido em 24 de abril de 1997. Neste estudo foi identificado que a barra 48 (CS-IBIÚNA) da área Sudeste tinha problemas de instabilidade de tensão associados com a perda de controlabilidade. Além disso, a análise realizada na referência [Granville, 1996] identificou que a área Mato Grosso é extremamente vulnerável a problemas de instabilidade de tensão causados pela insolubilidade das equações de fluxo de potência. Portanto, o método proposto mostra coerência com os resultados previamente relatados na literatura técnica. Além disso, o método proposto para a APET pode prever precisamente quais barras e áreas são mais vulneráveis a problemas de instabilidade de tensão.

Tabela 6.11 – Índice de influência esperado para o sistema EQV-107

Área Sul		Área Sudeste		Área Mato Grosso	
Barra	$\tilde{E}[I_i \bar{\Omega}_\phi]$	Barra	$\tilde{E}[I_i \bar{\Omega}_\phi]$	Barra	$\tilde{E}[I_i \bar{\Omega}_\phi]$
808	-1,4086	48	-7,4439	21	-11,5313
925	-1,3823	140	-4,8953	4523	-8,5356
897	-1,1537	231	-4,7360	4582	-6,7761
896	-1,1533	106	-4,3498	4596	-6,4133
919	-1,0561	104	-4,2139	4804	-6,1566
1047	-1,0124	1503	-3,1814	4530	-6,0599
898	-0,9861	1504	-3,1429	4562	-6,0344
810	-0,9807	225	-1,6616	4521	-5,3233
2458	-0,9684	22	-1,4197	4501	-5,0917
839	-0,9463	234	-1,3978	4572	-4,8416
800	-0,7622	218	-1,3708	4623	-4,6788
915	-0,6105	219	-1,2935	4703	-4,6070
840	-0,5985	123	-1,2876	4522	-4,5777
1060	-0,5627	86	-1,2188	4862	-4,5667
848	-0,5227	126	-1,1250	4533	-4,3415
856	0,0357	233	-0,9791	4807	-4,0855
1015	0,3370	35	-0,8295	4805	-3,9538
939	0,8054	228	-0,7587	4532	-3,7512
934	0,8186	300	-0,6243	4592	-3,3951
834	0,9798	305	-0,5906	4552	-2,4578
814	1,2044	302	-0,5408	4542	-1,8659

6.4

Estimação dos Parâmetros do Sistema Equivalente de Duas Barras

Nesta seção são apresentados alguns resultados associados com o algoritmo de estimação de parâmetros do sistema equivalente de duas barras usado no cálculo da MET nodal. Este algoritmo calcula o módulo e fase da tensão na barra de referência ($V_1^{eq} \angle \theta_1^{eq}$) e a admitância série do sistema equivalente ($y_{21}^{eq} = g_{21}^{eq} + j b_{21}^{eq}$). Na Subseção 4.2.1, é mostrado que estes parâmetros são estimados através da solução de um sistema de equações não-lineares indeterminado. Este sistema é resolvido usando uma extensão do método de Newton-Raphson baseada no conceito de matriz pseudo-inversa. Os testes realizados com este algoritmo nos sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107 foram realizados sob as seguintes condições:

- i) Os estados do sistema, selecionados via SMC na Seção 6.3, são usados nos testes com o algoritmo de estimação do equivalente.
- ii) A tolerância para os resíduos das equações não lineares (equações de fluxo de potência na barra 2) é 0,0001 pu.
- iii) Os valores mínimo e máximo permitidos para o módulo da tensão na barra 1 são 0,4 e 2,0.
- iv) O número máximo de iterações para o algoritmo é 100.
- v) Uma falha de convergência ocorre quando as condições (ii) ou (iii) não podem ser satisfeitas. Este critério também é adotado nos testes de não-convergência do algoritmo de fluxo de potência.
- vi) O algoritmo obtém uma solução quando a condição do item (ii) é satisfeita.
- vii) A estimativa inicial do módulo da tensão na barra 1 é 1,0 pu. As estimativas iniciais dos demais parâmetros do equivalente são obtidas a partir da solução do sistema linear indeterminado descrito na equação (4.30).

Os resultados dos testes com algoritmo de estimação do sistema equivalente para o sistema IEEE-MRTS são mostrados na Tabela 6.12. Esta tabela contém as seguintes informações:

- i) 1ª coluna: número da barra;
- ii) 2ª coluna: número de estados do sistema para os quais os parâmetros do sistema equivalente foram estimados;
- iii) 3ª coluna: probabilidade de falha de convergência associada com o algoritmo de estimação (P(Falha));
- iv) 4ª, 5ª e 6ª colunas: valores mínimo, médio e máximo, respectivamente, para o módulo da tensão na barra 1 (V_1^{eq}) calculados pelo algoritmo de estimação;
- v) 7ª coluna: número máximo de iterações realizadas pelo algoritmo para estimar os parâmetros do equivalente.

Tabela 6.12 – Estatísticas associadas com as soluções obtidas pelo algoritmo de estimação do equivalente

Barra	Nº de estados	P(Falha)	V_1^{eq} mim.	V_1^{eq} médio	V_1^{eq} máx.	Nº máx. de iterações
101	39138	0,0	0,9524	0,9740	1,0752	2
102	42233	0,0	0,9524	0,9754	1,0831	2
103	42401	0,0	1,0610	1,1715	1,5894	3
104	42400	0,0	1,0178	1,0881	1,3868	3
105	42401	0,0	0,9783	1,0283	1,2093	2
106	42401	0,0	0,9910	1,0646	1,5253	3
107	27922	0,0	0,9544	1,0262	1,4099	3
108	42401	0,0	1,0140	1,0978	1,4239	2
109	42401	0,0	1,0393	1,1404	1,3067	2
110	42401	0,0	0,9736	1,0527	1,1717	2
111	42399	0,0	0,9567	1,0381	1,1688	2
112	42401	0,0	0,9994	1,0722	1,2044	2
113	19421	0,0	0,9528	0,9812	1,0496	2
114	42400	0,0	0,9528	1,0202	1,1682	2
115	40879	0,0	0,9535	1,0221	1,1657	2
116	42401	0,0	0,9556	1,0112	1,1400	2
117	42401	0,0	0,9526	0,9868	1,1320	2
118	42401	0,0	0,9524	0,9743	1,1466	2
119	42401	0,0	0,9689	1,0171	1,1338	2
120	42401	0,0	0,9612	0,9897	1,0824	2
121	42401	0,0	0,9524	0,9662	1,1243	2
122	42401	0,0	0,9525	0,9585	1,0380	2
123	42401	0,0	0,9524	0,9568	0,9990	2
124	42401	0,0	0,9515	1,0958	1,4309	3

A partir dos resultados da Tabela 6.12, pode-se concluir que:

- i) a probabilidade de falha de convergência é nula para todas as barras do sistema,
- ii) o número máximo de iterações realizadas pelo algoritmo é três,
- iii) o valor médio do módulo da tensão na barra 1 está dentro da faixa de operação normal das tensões nodais.

Os resultados da Tabela 6.12 demonstram que é possível associar a matriz D' com um sistema de duas barras sem violar a solubilidade das equações de fluxo de potência neste sistema. Adicionalmente, a solução do fluxo de potência no sistema equivalente é garantida com valores aceitáveis para o módulo da tensão na barra 1. Finalmente, deve-se mencionar que mais uma vez não foi encontrado caso

de não-convergência do algoritmo de estimação nos sistemas brasileiros. Além disso, o valor médio de V_1^{eq} , para todas as barras dos sistemas brasileiros, está dentro da faixa de operação normal.

6.5

Comentários Finais

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram que o método proposto para a APET tem grande potencial para aplicação no planejamento da operação e da expansão de sistemas de energia elétrica. Por exemplo, pode-se utilizar o método proposto no planejamento da operação para avaliar o impacto de cenários do sistema previstos no RIT, por exemplo: um cenário do sistema com componentes fora de serviço devido à execução de manutenções programadas. Esta análise permitirá identificar cenários do sistema nos quais a rede elétrica está exposta a um risco elevado de colapso de tensão. Por outro lado, a técnica de APET desenvolvida nesta tese também pode ser usada no planejamento da expansão para auxiliar a tomada de decisões nas seguintes tarefas:

- i) avaliação do impacto da conexão de agentes de geração nas condições de segurança de tensão;
- ii) localização de barras e áreas críticas para reforço das condições de segurança de tensão;
- iii) identificação das empresas de energia elétrica cujos equipamentos (geradores, circuitos, compensadores, transformadores, etc.) têm um fator de participação significativo no RIT.