

Estudo do Comportamento de um Sistema-Teste sob Diferentes Condições de Carregamento Utilizando o Equivalente de Ward Estendido

Jéssica Gantes Cordeiro * Jaqueline Clamer *
Daniel Sousa da Silva * Israel Gondres Torné **

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, SC (e-mails: jessica.gantes@posgrad.ufsc.br, jc.clamer@gmail.com, dass.eng@uea.edu.br)

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Amazonas, AM (e-mail: igondrest@gmail.com)

Abstract:

The Electric Power Systems planning and operation aims to meet the continuous load growth, as well as its variations, whether daily or seasonal. In studies of the transmission system expansion planning, the goal is to reduce the dimension of the problem through an equivalent representation of the original power system. One of the commonly used methods is the network reduction method called Extended Ward Equivalent, covered in this article. This method is applied to a real test system that belongs to the National Interconnected System. Some loadability levels can be simulated, including the maximum loadability that the system is capable of performing using the Continuous Power Flow tool of the ANAREDE software. In this context, to ensure the reliability of operation, voltage stability studies are performed through the analysis of PV and QV curves to obtain the reactive compensation capacity of the bus-bars. The results obtained from Ward Equivalent was validated to many different loadability from the research, inclusive to maximum loading of the proposed system.

Resumo:

O planejamento e a operação de Sistemas Elétricos de Potência visa atender o contínuo crescimento de carga, bem como suas variações, sejam elas diárias ou sazonais. Em estudos de planejamento da expansão do sistema de transmissão busca-se reduzir a dimensão do problema através de uma representação equivalente do sistema de potência original. Um dos métodos comumente utilizados é o método de redução de redes denominado Equivalente de Ward Estendido, abordado nesse artigo. Esse método é aplicado a um sistema-teste real que pertence ao Sistema Interligado Nacional. Através da ferramenta de Fluxo de Potência Continuado, do *software* ANAREDE, alguns níveis de carregamento são simulados, inclusive, o carregamento máximo que o sistema é capaz de suportar. Nesse contexto, a fim de garantir a confiabilidade da operação, estudos de estabilidade de tensão são realizados através da análise das curvas PV e QV para obter a capacidade de compensação reativa das barras. Os resultados obtidos pelo Equivalente de Ward Estendido foram validados para os diferentes carregamentos do estudo, inclusive para o carregamento máximo do sistema proposto.

Keywords: Extended Ward Equivalent; Continuation Power Flow; Maximum Loadability; Voltage Stability; PV and QV Curves.

Palavras-chaves: Equivalente de Ward Estendido; Fluxo de Potência Continuado; Máximo Carregamento; Estabilidade de Tensão; Curvas PV e QV.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável pela geração e transmissão de energia no Brasil ao longo dos subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da área Norte. Os subsistemas estão sujeitos a diferentes níveis de cargas, sendo que os maiores carregamentos estão localizados nas regiões Sul e Sudeste, representando aproximadamente 75% da demanda nacional (ONS, 2020).

A projeção de crescimento do SIN é de 3,6% para os próximos 15 anos (EPE, 2018). Nesse cenário, destaca-se a importância de métodos numéricos que visam o ponto máximo de carregamento, a fim de determinar a margem segura de operação (Bonini Neto and Amancio Alves, 2016). Devido à necessidade de explorar os sistemas em seus pontos de máximo carregamento, os estudos de estabilidade de tensão tornam-se fundamentais para manter a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

As análises descritas, em sistemas de grande porte, podem exigir elevado esforço computacional, tornando-se inviável em alguns casos. Nesse contexto, propõe-se reduzir a complexidade do sistema através de uma representação mais compacta, utilizando a definição de redes equivalentes (Hebling, 2018). Esse conceito também é utilizado em áreas onde o acesso a todas as barras é restrito a uma parte relativamente pequena do sistema, como, por exemplo, em sistemas interligados que são controlados por diferentes concessionárias de energia.

Neste artigo, propõe-se analisar o comportamento de um sistema-teste sob condições normais de carregamento, 5% acima de tais condições e máximo carregamento, com o intuito de verificar condições de operação como intercâmbios de potência, índices de severidade, capacidade de compensação reativa e estabilidade de tensão. O comportamento do sistema é avaliado para a rede completa e para a rede equivalente, cuja precisão deseja-se verificar.

O sistema-teste de 107 barras que contempla as regiões Sul, Sudeste e Mato-Grosso do SIN é adotado para este estudo com a proposta de analisar a precisão de redes equivalentes, através do método de Equivalente de Ward Estendido, via *software* ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e amplamente utilizado em estudos de sistemas de potência.

2. FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

O Fluxo de Potência Continuado é utilizado para averiguar o desempenho de um sistema em regime permanente através de variações de carga, sendo comumente utilizado para determinar o máximo carregamento que o sistema pode suportar. Outra contribuição desse método é o cálculo do índice de severidade de cada barra do sistema de acordo com o carregamento. Este índice representa o tempo (em minutos) de duração de uma interrupção fictícia do sistema quando a ponta de carga é atingida (Brasil, 2009).

* Jéssica G. Cordeiro, Jaqueline Clamer e Daniel S. Silva agradecem o suporte financeiro da CAPES.

O método convencional de solução do Fluxo de Potência é inadequado na obtenção do ponto de máximo carregamento, devido à singularidade da matriz Jacobiana neste ponto (Leite and Costa, 2003). Para contornar este problema, utiliza-se o método da continuação, através da parametrização da equação (1) da rede elétrica em regime permanente do fluxo convencional (Ruan et al., 2018).

$$H(x, \lambda) = 0 \quad (1)$$

Onde, x é a variável de estado do sistema e λ é o parâmetro de carga a partir do qual as potências ativa e reativa são incrementadas. Através da parametrização da equação (1), a solução base é atualizada até a convergência em duas etapas denominadas predição e correção. A Figura 1 ilustra as etapas que ocorrem nas curvas de tensão das barras até a determinação do ponto crítico, que indica o máximo carregamento do sistema (de Melo, 2017).

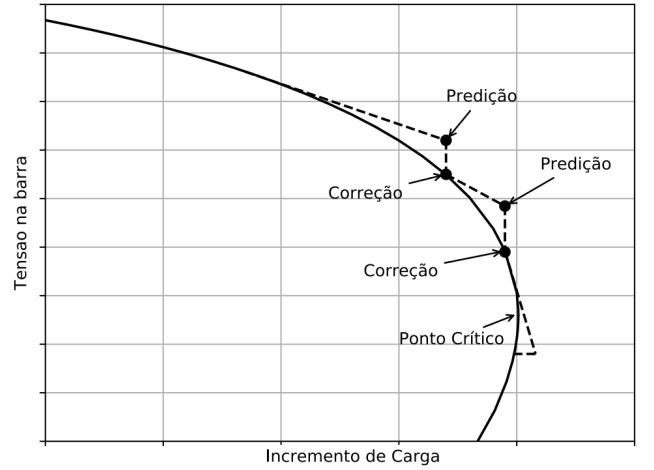


Figura 1. Etapas do Fluxo de Potência Continuado (Andrade, 2017)

2.1 Etapa da Predição

Na etapa da predição, o processo iterativo é realizado através da equação 2.

$$\begin{bmatrix} x^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^k \\ \lambda^k \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} \Delta x^k \\ \Delta \lambda^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde x^{k+1} e λ^{k+1} são atualizados a cada iteração em um determinado ponto $k + 1$, incrementados pela soma dos valores de x^k e λ^k da iteração anterior com a multiplicação do tamanho de passo (α) com a direção $([\Delta x^k; \Delta \lambda^k])$.

2.2 Etapa da Correção

A etapa da correção utiliza o resultado inicial da etapa da predição para determinar a trajetória da solução até a solução exata. Para isto, o sistema formado pela equação 2 é resolvido com a adição das variáveis de correção x^c e λ^c , assim obtém-se o ponto crítico.

3. CURVAS PV E QV

Em estudos de estabilidade de tensão é importante avaliar a relação entre a potência ativa transmitida e a capacidade de injeção de potência reativa com o objetivo de que o sistema opere sob níveis seguros de tensão. Tal avaliação pode ser verificada através das curvas PV e QV de cada barra.

As curvas PV representam a variação de tensão em uma barra em função da variação de potência ativa total do sistema. A Figura 2 ilustra o comportamento das curvas PV.

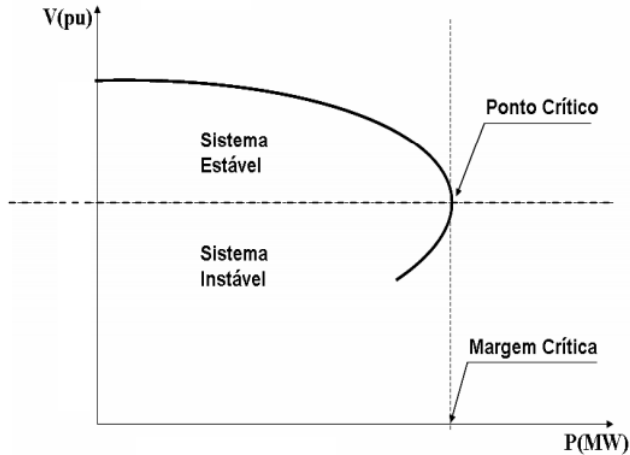


Figura 2. Curva PV (Paiva, 2007)

Na Figura 2 o eixo das abcissas representa a potência ativa, enquanto o eixo das ordenadas representa a tensão. O sistema é estável na parte superior da curva e instável na parte inferior. O ponto de inflexão ou “nariz” da curva representa o máximo carregamento do sistema, limitado pela margem crítica de carga ativa. A partir desse ponto, denominado ponto crítico, qualquer incremento de carga leva o sistema ao colapso de tensão e, conseqüentemente, à instabilidade (De Souza, 2000).

Através da curva PV não é possível avaliar se a alocação de potência reativa na barra analisada é suficiente para manter os níveis de tensão estáveis, sendo necessária análise conjunta com a curva QV. Assim, para cada ponto de tensão obtido na curva PV, calcula-se a potência reativa injetada na barra, resultando na curva QV, a qual ilustra a sensibilidade da tensão na barra com a absorção ou geração de potência reativa. O comportamento dessa curva é apresentado na Figura 3.

Na Figura 3 o eixo das abcissas representa a tensão, enquanto o eixo das ordenadas representa a potência reativa. O ponto de mínimo da curva QV representa a potência reativa mínima para manter a operação estável, ou seja, o sistema é estável à direita do ponto de mínimo e instável a sua esquerda. A margem de carga reativa é a distância do ponto de mínimo da curva QV até o eixo das tensões. Assim, determinar a margem de carga reativa implica em conhecer a capacidade de compensação reativa da barra em estudo (Pinto, 2013).

A análise de estabilidade de tensão deve ser feita em conjunto através das curvas PV e QV. No ponto crítico da

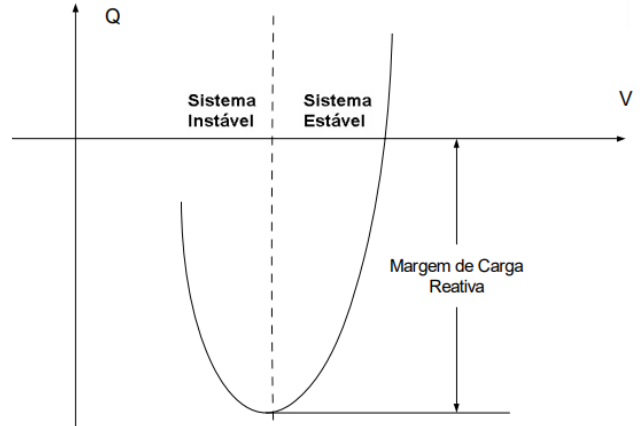


Figura 3. Curva QV (Paiva, 2007, adaptada)

curva PV, a margem de carga reativa da curva QV tende a zero. Assim, a associação entre os resultados obtidos da curva PV e QV, permite avaliar os níveis seguros de tensão para operação estável do sistema (Paiva, 2007).

4. EQUIVALENTE DE WARD ESTENDIDO

O Equivalente de Ward Estendido particiona um sistema em subsistemas internos (SI) e externos (SE), conectados por barras de fronteiras, conforme a Figura 4.

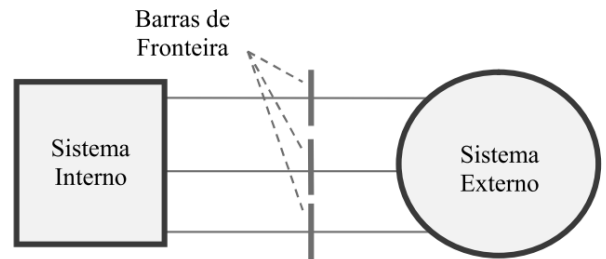


Figura 4. Representação do Equivalente de Ward (Lima et al., 2018)

O SI corresponde a parte do sistema em que se tem acesso a monitoração das barras, enquanto o SE refere-se a parte em que não é possível monitorar as barras. O fluxo de potência é realizado através das barras de fronteira, as quais permitem que o SI tenha acesso aos dados gerais do SE.

O SE é representado por injeções de corrente nas barras de fronteira (Lima et al., 2018), conforme Figura 5.

O Equivalente de Ward substitui as barras do SE por injeções de corrente nas barras de fronteiras, que representam parcialmente o efeito dos fluxos. O método não distingue as barras do tipo PV do SE, o que resulta em maior precisão para potência ativa quando comparada a potência reativa devido ao comportamento constante das injeções oriundas do fluxo de potência no ponto de operação (Huang et al., 2018).

Em contrapartida, o Equivalente de Ward Estendido utiliza ajustes nas injeções de potência reativa nas barras de fronteira através de barras PV fictícias que simulam os efeitos das barras PV do SE. Essa variação corrige as

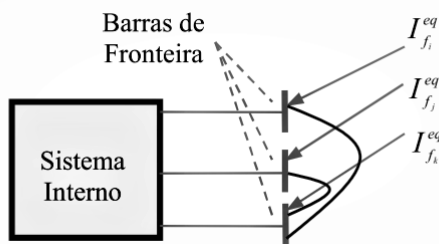


Figura 5. Injeções de corrente no sistema interno (Lima et al., 2018)

deficiências de precisão da potência reativa do Equivalente de Ward convencional (da Silva, 2018).

5. METODOLOGIA

As análises deste estudo são realizadas através do *software* ANAREDE, com o auxílio do manual (CEPEL, 2010), para avaliar o comportamento operativo das regiões Sul, Sudeste e Mato Grosso pertencentes ao SIN, através do sistema-teste 107 barras (Alves, 2007). A Figura 6 apresenta o sistema-teste utilizado.

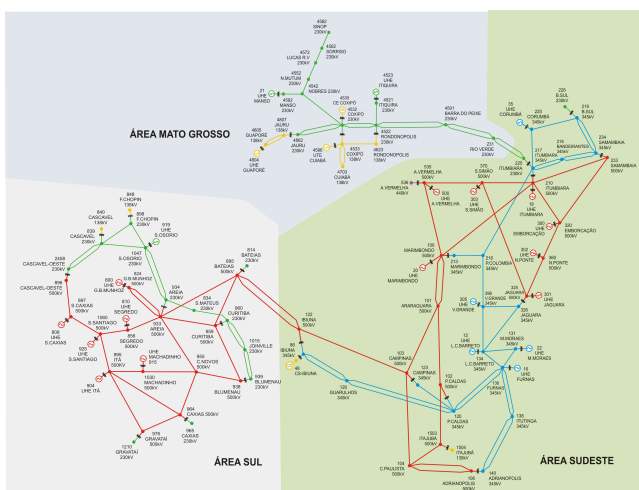


Figura 6. Sistema-teste

A fim de verificar a eficácia dos modelos de rede equivalente, o modelo de Equivalente de Ward Estendido é adotado, no qual dez barras do sistema deixam de ser monitoradas. Assim, o Fluxo de Potência Convencional e o Fluxo de Potência Continuado são avaliados tanto para o modelo equivalente quanto para o monitoramento de todas as barras do sistema-teste. Dessa forma, a rede equivalente auxilia na análise do comportamento da rede completa em sistemas onde não é viável monitorar todas as barras. Sendo assim, tais dados são relevantes e contribuem nas fases de projeto e planejamento de expansão (Hebling, 2018).

Com o Fluxo de Potência Continuado é possível determinar o máximo carregamento do sistema-teste e o índice de severidade das barras mais críticas sob o aspecto de violação da magnitude de tensão. Além disso, as curvas PV e QV das duas barras mais críticas são plotadas.

6. RESULTADOS

O sistema-teste de 107 barras é simulado sob carregamento nominal através do Fluxo de Potência Convencional para o caso base e o Equivalente de Ward Estendido. Com o auxílio do Fluxo de Potência Continuado, o carregamento de 105% e seus respectivos índices são computados. Além disso, o máximo carregamento do sistema é verificado, assim como, os limites de estabilidade de tensão, mais uma vez, para ambas representações da rede.

6.1 Fluxo de Potência Convencional

A. Caso Base

Para o carregamento nominal do sistema, ou seja, com fator de carga igual a 1, a simulação do caso base não apresenta violações nos monitoramentos de tensão, de geração de potência reativa e de fluxo de potência. Assim, para esse caso, não é necessário realizar medidas corretivas. A relação entre geração versus carga e os intercâmbios de cada área é obtida no “Relatório de Totais de Área” do ANAREDE, ilustrada na Figura 7.

Sistema Teste - 107 Barras - Caso Base
RELATORIO DE TOTAIS DE AREA

AREA NUM.	GERACAO MW/Mvar	INJ EQV MW/Mvar	CARGA MW/Mvar	ELO CC MW/Mvar	SHUNT Mvar/EQUIV	EXPORT MW/Mvar	IMPORT MW/Mvar
1	6045.8 -2483.0	0.0 0.0	6237.0 1964.2	0.0 0.0	-450.8 0.0	307.8 0.0	607.1 343.7
2	6500.0 -3.3	0.0 0.0	5689.1 1439.6	0.0 0.0	106.8 0.0	607.1 301.1	0.0 0.0
3	470.0 -76.6	0.0 0.0	755.6 193.6	0.0 0.0	-90.7 0.0	0.0 42.6	307.8 0.0
TOTAL	13015.8 -2562.9	0.0 0.0	12681.7 3597.4	0.0 0.0	-434.7 0.0	914.9 343.7	914.9 343.7

Figura 7. Fluxo de potência para o caso base

Através da Figura 7 percebe-se que a geração de potência ativa (em azul) total do sistema de 107 barras é de 13015,8 MW. A maior geração encontra-se na área Sul com 6500 MW, seguida de área Sudeste com 6045,8 MW e da área Mato Grosso, que gera 470 MW.

A carga total do sistema é de 12681,7 MW. A área que apresenta maior carga é a área Sudeste, com 6237 MW, seguida da área Sul com 5689,1 MW e por fim, da área Mato Grosso com 755,6 MW.

A área Sul é capaz de suprir sua carga e exportar potência ativa para as outras áreas, nas quais a geração própria não supre totalmente as respectivas demandas. Assim, (em vermelho) a área Sul exporta 607,1 MW para a área Sudeste, a qual exporta 307,7 MW para a área Mato Grosso. Devido aos intercâmbios, 334 MW de potência ativa são consumidos pelas linhas de transmissão.

B. Equivalente de Ward Estendido

Para implementar o equivalente de Ward Estendido dez barras são selecionadas para deixar de ser monitoradas. Tais barras são destacadas na Figura 9.

As barras que deixam de ser monitoradas estão localizadas majoritariamente na área Mato Grosso, sendo elas: 21 (UHE Manso), 4521 (Itiquira), 4523 (UHE Itiquira),

4582 (Sinop), 4592 (Manso), 4596 (UTE Cuiabá), 4703 (Cuiabá), 4804 (UHE Guaporé) e 4805 (Guaporé) e ao norte da área Sudeste, a barra 228 (B. Sul). Essa escolha baseia-se na hipótese das barras pertencerem à diferentes transmissoras, sendo externas ao sistema monitorado. Para deixar de monitorar tais barras a ferramenta “Equivalente de Redes” do ANAREDE é utilizada e o fluxo de potência convencional é simulado novamente. Os resultados são indicados no “Relatório de Totais de Área” da Figura 8:

AREA NUM.	GERACAO MW/ Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	EXPORT MW/ Mvar	IMPORT MW/ Mvar
1	6045.7 -2483.0	0.0 0.0	6237.0 1964.2	0.0 0.0	-450.8 0.0	307.7 0.0	607.1 343.7
2	6500.0 -3.2	0.0 0.0	5689.1 1439.6	0.0 0.0	106.8 0.0	607.1 301.1	0.0 0.0
3	280.0 -45.5	190.0 1018.5	755.6 193.6	0.0 0.0	-90.7 -1067.8	0.0 42.7	307.7 0.0
TOTAL	12825.7 -2531.7	190.0 1018.5	12681.7 3597.4	0.0 0.0	-434.8 -1067.8	914.8 343.7	914.8 343.7

Figura 8. Fluxo de potência convencional para o Equivalente Ward Estendido

Ao comparar o relatório do fluxo de potência convencional (Figura 6) do caso base com o Equivalente de Ward Estendido (Figura 8), nota-se que a mudança mais significativa ocorre na geração das potências ativa e reativa na área Mato Grosso. Tal alteração justifica-se pela maioria das barras que não estão sendo monitoradas pertencerem a essa região. Verifica-se também que devido as barras de intercâmbio entre áreas permanecerem no sistema interno, os valores de importação e exportação entre áreas não sofrem alterações entre o caso base e a rede equivalente.

A demanda de potência ativa para os dois casos é de 12871,7 MW. No caso base a geração é capaz de suprir totalmente a demanda, enquanto que na rede de Ward a geração de potência ativa é de 12681,7 MW, necessitando da injeção equivalente de 190 MW para obter o balanço de potência. Assim, o erro em relação a geração de potência ativa é de 1,5%.

A demanda de potência reativa é igual a 3597,4 MVar para os dois casos. No caso base a geração reativa é capaz de suprir totalmente a demanda. Na rede de Ward, além das injeções equivalentes de 1018,5 MVar, os shunts equivalentes de -1067,8 MVar também são considerados, representando uma diferença de -49,3 MVar, assim o erro em relação ao caso base é de 1,37%. Tendo em vista que o Equivalente de Ward Estendido utiliza ajustes nas injeções de reativo nas barras de fronteira através de barras PV fictícias, o erro de potência reativa é minimizado.

6.2 Fluxo de Potência Continuado

A ferramenta “Fluxo de Potência Continuado” do ANAREDE é utilizada com o objetivo de simular o máximo carregamento para a monitoração completa e para a rede equivalente do sistema. Considera-se um incremento de 5% de potência ativa e de potência reativa, dessa forma, o carregamento do sistema torna-se 1,05.

A. Caso Base

O relatório com os resultados da monitoração de tensão para o carregamento de 105% do caso base é apresentado na Figura 10.

As soluções do Fluxo de Potência Continuado apresentadas na Figura 10 indicam os níveis de severidade de violação de tensão nas barras por meio do caractere “*” que representa até 1% dessa violação, segundo CEPEL (2010). As oito barras mais severas estão localizadas na área Sudeste, sendo elas: 102 (Poços), 104 (C. Paulista), 106 (Adrianópolis), 123 (Campinas), 138 (Itutinga), 140 (Adrianópolis), 1503 (Itajubá) e 1504 (Itajubá). Assim, conclui-se que a área Sudeste é a mais crítica do sistema.

Ainda na Figura 10, nota-se que com o aumento de carga, a tensão tende a diminuir, assim, no caso de maior severidade - 140 (Adrianópolis) - a tensão mínima permitida é de 0,95 pu enquanto que a de máximo carregamento é de 0,591 pu, indicando a severidade da violação.

A monitoração dos fluxos nas linhas de transmissão também é realizada para caso base e o relatório é apresentado na Figura 11.

DA BARRA NOME	PARA BARRA NOME	NC	MW	FLUXOS Mvar	MVA/V	VIOLACAO MVA	CARREGAMENTO % SEVERIDADE
210 ITUMBIARA500	217 ITUMBIARA345	1	656.4	84.5	645.9	85.9 **	115.35 %
231 R.VERDE-230	225 ITUMBIARA230	2	-224.4	-2.5	227.7	30.7 **	115.58 %
4703 CUIABA-138	4533 COXIPO-138	1	-97.7	-16.0	100.0	0.0 *	100.02 %
4703 CUIABA-138	4533 COXIPO-138	2	-97.7	-16.0	100.0	0.0 *	100.02 %
IND SEVER.			6.0				

Figura 11. Monitoração de fluxos do caso base para fator de carga 1,05

Com a Figura 11 verifica-se que a linha que apresenta fluxo de maior severidade é a que conecta as barras 231 (R. Verde) a 225 (Itumbiara), com carregamento de 115,58%. Essa linha é a única que possibilita o intercâmbio entre as áreas Sudeste e Mato Grosso, afetando o suprimento da demanda do Mato Grosso. Para a geração reativa, não há violações de fluxo.

B. Equivalente de Ward Estendido

O relatório com os resultados de monitoração de tensão para o carregamento de 105% no Equivalente de Ward Estendido é apresentado na Figura 12.

NUM.	BARRA NOME	ARE	TENSÃO MOD.	VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
122	IBIUNA-500	1	0.950	0.949	1.100	-0.001	*
123	CAMPINAS-345	1	0.950	0.943	1.050	-0.007	*
126	GUARULHOS345	1	0.950	0.933	1.070	-0.017	**
101	ARARAQUA-500	1	0.950	0.877	1.100	-0.073	*****
136	FURNAS-345	1	0.950	0.875	1.070	-0.075	*****
103	CAMPINAS-500	1	0.950	0.844	1.100	-0.106	*****
120	P. CALDAS-345	1	0.950	0.835	1.070	-0.115	*****
123	CAMPINAS-345	1	0.950	0.799	1.070	-0.151	*****
102	POÇOS-500	1	0.950	0.778	1.100	-0.172	*****
1503	ITAJUBÁ-500	1	0.950	0.686	1.100	-0.264	*****
138	ITUTINGA-345	1	0.950	0.679	1.070	-0.271	*****
104	C. PAULISTA-500	1	0.950	0.669	1.100	-0.281	*****
106	ADRIANO-500	1	0.950	0.624	1.100	-0.326	*****
1504	ITAJUBÁ-138	1	0.950	0.617	1.050	-0.333	*****
140	ADRIANO-345	1	0.950	0.569	1.070	-0.381	*****
IND SEVER.			6727.9				

Figura 12. Monitoração de tensão da rede equivalente para fator de carga 1,05

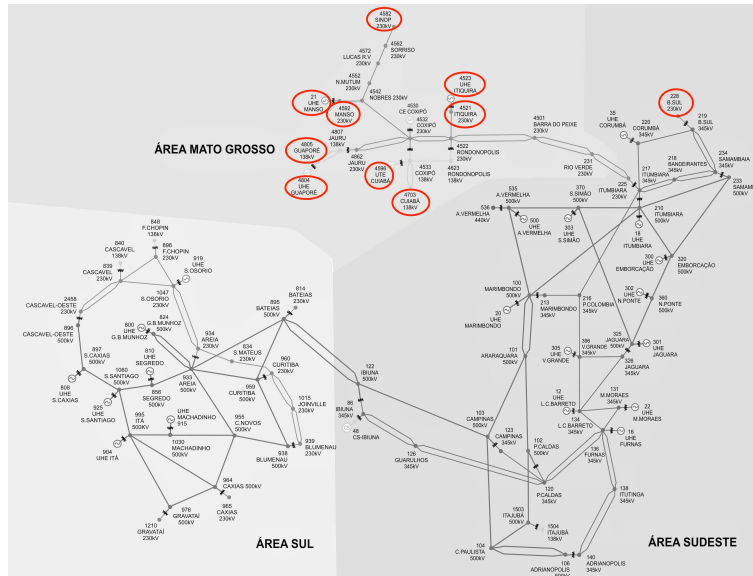


Figura 9. Barras que deixam de ser monitoradas

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - ANAREDE V11.02.01

Sistema Teste - 107 Barras - Caso Base

MONITORACAO DE TENSÃO

NUM.	BARRA NOME	ARE	MIN	TENSÃO MOD.	MAX	VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
16	FURNAS---5GR	1	0.950	0.949	1.050	-0.001			*
126	GUARULHOS345	1	0.950	0.936	1.070	-0.014			**
136	FURNAS---345	1	0.950	0.881	1.070	-0.069			*****
101	ARARAQUA-500	1	0.950	0.880	1.100	-0.070	-200.00		*****
103	CAMPINAS-500	1	0.950	0.851	1.100	-0.099			*****
120	P. CALDAS-345	1	0.950	0.841	1.070	-0.109			*****
123	CAMPINAS-345	1	0.950	0.806	1.070	-0.144			*****
102	POCOS---500	1	0.950	0.786	1.100	-0.164	-100.00		*****
1503	ITAJUBA-500	1	0.950	0.700	1.100	-0.250			*****
138	ITATINGA-345	1	0.950	0.695	1.070	-0.255			*****
104	C. PAULIS-500	1	0.950	0.685	1.100	-0.265			*****
106	ADRIANO-500	1	0.950	0.643	1.100	-0.307	-100.00		*****
1504	ITAJUBA-138	1	0.950	0.633	1.050	-0.317			*****
140	ADRIANO-345	1	0.950	0.591	1.070	-0.359			*****

----- IND SEVER. 6000.8 -----

Figura 10. Monitoração de tensão do caso base para fator de carga 1,05

As violações de tensão mais severas são detectadas nas mesmas oito barras do caso base, localizadas na área Sudeste, conforme a Figura 12. Entretanto, no Equivalente de Ward há 15 barras que apresentam violação de tensão, enquanto no caso base há 14, a barra que passou a ter violação é a 122 (Ibiúna). As violações de tensão são mais significativas nas barras da rede equivalente, elevando o índice de severidade do sistema em 12,1%, sendo igual a 6000,8 para o caso base e 6727,9 para a rede equivalente.

A monitoração dos fluxos nas linhas de transmissão também é realizada para o Equivalente Ward e o relatório é apresentado na Figura 13.

MONITORACAO DE FLUXOS

DA BARRA NOME	PARA BARRA NOME	NC	MW	FLUXOS Mvar	MVA/V	VIOLACAO MVA	CARREGAMENTO %	SEVERIDADE
210	217	1	644.2	76.1	632.3	72.3	**	112.91 %
210	217	1	644.2	76.1	632.3	72.3	**	112.91 %
ITUMBIARA500	ITUMBIARA345	2	644.2	76.1	632.3	72.3	**	112.09 %
231	225	2	-220.2	-0.2	220.8	23.8	**	

----- IND SEVER. 3.8 -----

Figura 13. Monitoração de fluxos da rede equivalente para fator de carga 1,05

Na Figura 13 verifica-se que a linha de transmissão que conecta as barras 210 (Itumbiara) a 217 (Itumbiara) possui o carregamento mais severo, igual a 112,91%. Tal linha é vizinha à linha 231 (R. Verde) - 225 (Itumbiara) que apresenta o carregamento mais crítico no caso base.

O índice de severidade do fluxo da rede equivalente é 3,8, enquanto no caso base é 6. Para a geração reativa não há violações de fluxos, assim como no caso base.

6.3 Curvas PV e QV

A. Caso base

Utilizando o software Plot Cepel do ANAREDE as curvas PV e QV do Fluxo de Potência Continuo são plotadas para as duas barras mais críticas do sistema (140 - Adrianópolis e 1504 - Itajubá) sob o aspecto da magnitude da tensão. As curvas PV do caso base são apresentadas na Figura 14.

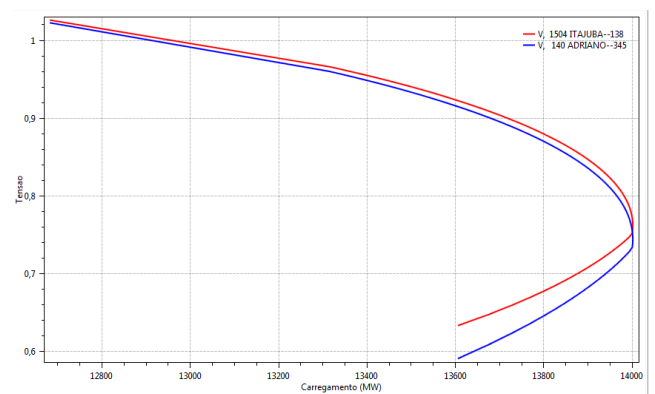


Figura 14. Curvas PV das barras mais críticas sob magnitude de tensão

Conforme a Figura 14, a tensão diminui com o aumento de carga até atingir o carregamento máximo do sistema, no ponto de inflexão de ambas curvas, que é de aproximadamente 14000 MW, correspondendo a um acréscimo de 10,4% sobre o carregamento nominal. O carregamento

máximo indica o ponto crítico, a partir desse ponto não existem soluções reais para as equações da rede elétrica.

A estabilidade de tensão depende de como a variação de Q e P afeta as tensões nas barras de carga. Sendo assim, é necessário obter informações sobre a compensação reativa na barra para manter a tensão em um nível especificado. Tais informações são fornecidas pelas curvas QV, conforme a Figura 15.

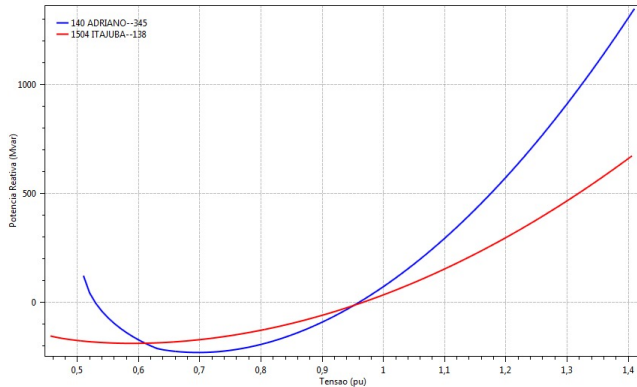


Figura 15. Curvas QV das barras mais críticas sob magnitude de tensão

De acordo com a Figura 15 o ponto de mínimo da barra 140 (Adrianópolis) está em torno de $0,74 \text{ pu}$ de tensão, com uma margem de carga reativa de aproximadamente -230 MVar . Enquanto que para a barra 1504 (Itajubá) o ponto de mínimo está em torno de $0,76 \text{ pu}$ de tensão, com capacidade de compensação reativa de aproximadamente -150 MVar .

Comparando as curvas PV e QV, percebe-se que quanto mais próximo o sistema estiver do ponto de máximo carregamento, menor a margem de carga reativa de cada barramento.

B. Equivalente de Ward Estendido

No Equivalente de Ward Estendido, as barras mais severas sob a magnitude de tensão (Adrianópolis e Itajubá) coincidem com as do caso base, com carregamento máximo de aproximadamente 14000 MW para ambas representações da rede elétrica. Assim, o comportamento das curvas PV para a rede equivalente é compatível com a Figura 14.

A margem de carga reativa da rede equivalente também é semelhante ao caso base, dispondo de uma curva QV correspondente com a Figura 15.

Assim a compatibilidade das curvas PV e QV obtidas para o Equivalente de Ward Estendido é verificada.

7. CONCLUSÃO

As condições de operação tais como intercâmbios de potência, índices de severidade, capacidade de compensação reativa e estabilidade de tensão são validadas para diferentes carregamentos tanto para a rede completa quanto para a rede equivalente.

A ferramenta de Fluxo de Potência Continuado permite avaliar as condições de operação para o carregamento de 105% e computar os índices de severidade das barras. Além

disso, o carregamento máximo é estimado em conjunto com os limites de estabilidade de tensão a partir das curvas PV e QV das barras mais críticas do sistema.

Através da comparação do sistema completo com a Rede Equivalente de Ward verifica-se a confiabilidade de dados provenientes de barras externas ao sistema monitorado. Por conta das dez barras que deixam de ser monitoradas pertencerem a uma transmissora vizinha, torna-se possível controlar o fluxo de potência entre as áreas a partir dos dados de fronteira e, consequentemente, garantir a estabilidade do sistema-teste.

Em virtude dos resultados obtidos, afirma-se que o Equivalente de Ward Estendido representa de forma satisfatória o sistema-teste de 107 barras através das comparações dos resultados dos fluxos de potência implementados, do fator de carga e das curvas PV e QV, embora apresente um aumento no índice de severidade do sistema para a condição de carregamento analisada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, viabilizado através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC.

REFERÊNCIAS

- Alves, W.F. (2007). Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. *Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense*.
- Andrade, M.S. (2017). *Metodologia Alternativa do Fluxo de Potência Continuado para Avaliação da Penetração de Geração Eólica em Sistemas Elétricos de Potência*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Bonini Neto, A. and Amancio Alves, D. (2016). Singularities analysis of the jacobian matrix modified in the continuation power flow: Mathematical modeling. *IEEE Latin America Transactions*, 14(12), 4750–4756. doi: 10.1109/TLA.2016.7817006.
- Brasil, M. (2009). Plano decenal de expansão de energia 2008/2017. *MME, Brasília, DF*, 2.
- CEPEL, P.d.A.d.R. (2010). Anarede. *Manual do Usuário, Versão*, 10(00).
- da Silva, N.S.M. (2018). *Contratação Ótima dos Montantes de Uso do Sistema de Transmissão via Equivalentes Estáticos Flexíveis e Fluxo de Potência Probabilístico*. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- de Melo, G.T. (2017). *Análise de Estabilidade de Tensão em um Alimentador de Distribuição sob a Influência de Geração Distribuída*. Master's thesis, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- De Souza, A.Z. (2000). Discussion on some voltage collapse indices. *Electric Power Systems Research*, 53(1), 53–58.
- EPE (2018). *Empresa de Pesquisa Energética. Caderno de Demanda de Eletricidade*.
- Hebling, G.M. (2018). *Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Malhadas*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade de São Paulo.
- Huang, B., Li, P., Zheng, J.H., and Wu, Q.H. (2018). A modified ward equivalent based on sensitivity matrices for static security analysis. *IEEE Transactions on*

- Electrical and Electronic Engineering*, 1675–1676. doi: 10.1002/tee.22730.
- Leite, L.C.G. and Costa, V.M.d. (2003). Fluxo de potência continuando via equações de injeção de corrente. *SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automação*, 14(4), 430–438.
- Lima, L.R., da Silva, A.M.L., Jardim, J.L., Castro, A.M., and Silva, N.S.M. (2018). A method to compute flexible static equivalents for very large power networks. 1–6. doi:10.1109/SBSE.2018.8395897.
- ONS (2020). URL <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>.
- Paiva, I.d.F.B.d. (2007). Comportamento da curva qv nas barras da região crítica de um sistema elétrico.
- Pinto, S.S. (2013). Comparação da função energia com curvas pv e qv na análise de estabilidade de tensão.
- Ruan, C., Wang, X., Wang, X., Gao, F., and Li, Y. (2018). Improved continuation power flow calculation method based on coordinated combination of parameterization. 207–211. doi:10.1109/CIEEC.2018.8745861.