

6

Resultados

6.1

Teste em Laboratório

Com o objetivo de se verificar os efeitos reais da variação do *tap* de um transformador com *tap* variável, para cada sentido do fluxo de potência através do mesmo, foram realizados ensaios em laboratório com um transformador de 1kVA, 220:220V (corrente nominal de 4,5A), sendo que, através de alteração do *tap* em ambos os lados é possível alterar a tensão de 220 para 190 ou 110V. Neste trabalho utilizou-se a configuração com 0,5kVA, 110:220V, alterando-se o *tap* no lado de alta para 190V em alguns ensaios.

Os ensaios consistiram na alimentação, de um dos lados do transformador, através de um Variac, e inserção gradativa de resistores no outro lado, anotando-se tensão e potência da carga, em cada ponto de operação, de forma a se obter a curva ϕ constante no plano PV. Variação do *tap* e do sentido do fluxo de potência foram efetuadas, de forma a confirmar os resultados do modelo proposto apresentados no Capítulo 4.

6.1.1

Fluxo de Potência do Lado de Baixa para o Lado de Alta Tensão

Nessa situação, o lado de baixa tensão foi alimentado com tensão nominal (110 V), sendo inserida carga no lado de alta tensão gradativamente. Para cada inserção de carga foram anotados os valores da potência e da tensão na carga. Esse procedimento foi realizado para os dois *taps* do transformador, ou seja, para as situações em que as relações de transformação são 110:190V e 110:220V. Na Figura 6.1 apresenta-se as duas curvas ϕ constante no plano PV, uma para cada valor de *tap*.

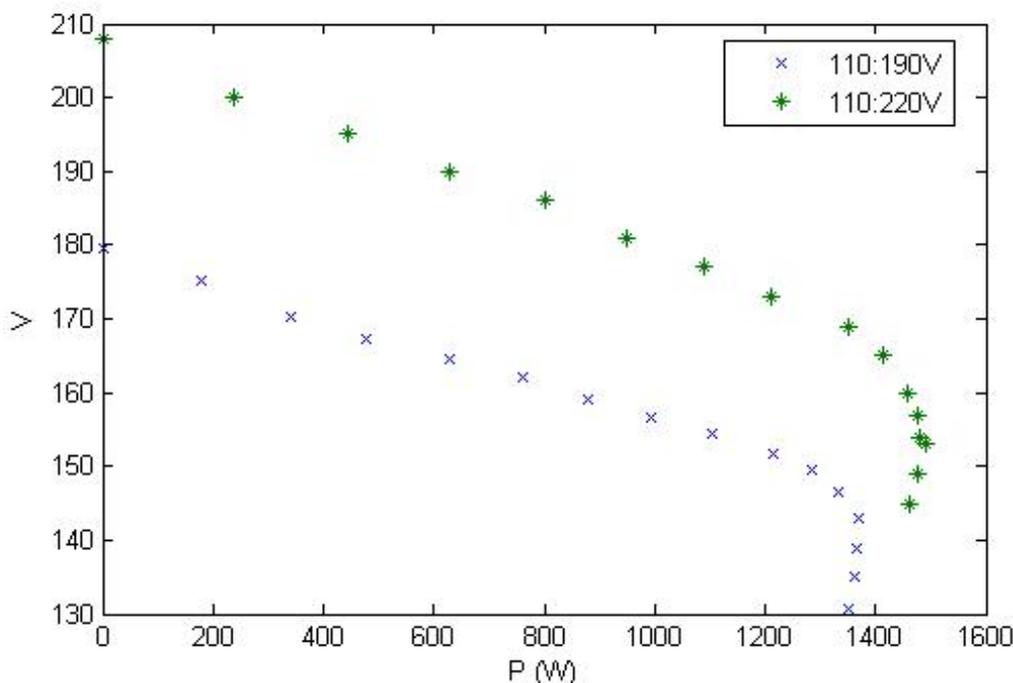


Figura 6.1: Curvas ϕ Constante para Dois Valores de *Tap* Obtidas em Laboratório e com Fluxo de Potência do Lado de Baixa para o Lado de Alta Tensão

De acordo com a Figura 6.1, verifica-se que, aumentando-se o *tap* do transformador, o ponto de máximo carregamento varia de 1370 W para 1490 W. A partir de medições de correntes realizadas nos pontos de máximo carregamento, foi possível, também, obter a impedância equivalente da carga nesses pontos, tendo sido verificado que a mesma aumentou de 17,4 Ω para 18,4 Ω . É importante mencionar que, após a obtenção do ponto de máximo carregamento e de alguns pontos na região anormal, foi interrompido o teste, devido à crescente dissipação de potência no transformador desde vazio até curto-circuito.

6.1.2

Fluxo de Potência do Lado de Alta para o Lado de Baixa Tensão

Nesse caso, o lado de alta tensão foi alimentado com 220 V, sendo inserida carga no lado de baixa tensão gradativamente. Novamente, para cada inserção de carga foram anotados os valores da potência e da tensão na carga. Esse procedimento foi realizado para os dois *taps* do transformador, ou seja, para as situações em que as relações de transformação são 190:110V e 220:110V. Na

Figura 6.2 apresenta-se as 2 curvas ϕ constante no plano PV, uma para cada valor de *tap*.

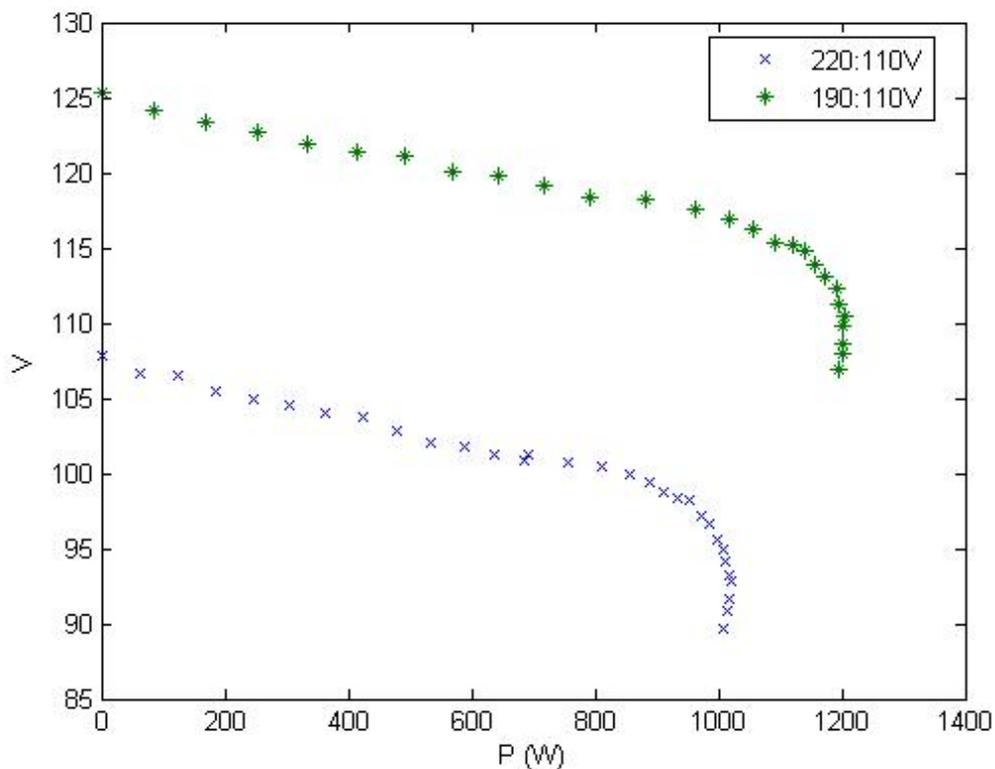


Figura 6.2: Curvas ϕ Constante para Dois Valores de *Tap* Obtidas em Laboratório e com Fluxo de Potência do Lado de Alta para o Lado de Baixa Tensão

De acordo com a Figura 6.2, verifica-se que, diminuindo-se o *tap* do transformador, o ponto de máximo carregamento varia de 1022W para 1205W. A partir de medições de correntes realizadas nos pontos de máximo carregamento, foi possível, também, obter a impedância equivalente da carga nesses pontos, tendo sido verificado que a mesma aumentou de $10,4\Omega$ para $12,3\Omega$.

Verifica-se, dessa forma, a partir dos testes em laboratório, que, tanto a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento, quanto à margem de estabilidade de tensão, variam quando o *tap* é alterado, independente do sentido do fluxo de potência, conforme modelo proposto, apresentado no Capítulo 4.

O modelo usual, que é utilizado pelos programas de fluxo de potência, informa que, dependendo do sentido do fluxo de potência, o ponto de máximo

carregamento e a impedância equivalente da carga neste ponto podem ou não variar.

Não foi possível confirmar em laboratório a suposição de que o modelo usual pode fornecer informações incorretas sobre ações de controle de tensão na região anormal, devido à impossibilidade de se obter em laboratório todos os pontos da região anormal da curva ϕ constante. Essa impossibilidade se deve somente ao aquecimento crescente do transformador na medida em que a carga era inserida.

Oscilações de medições e imperfeições do transformador utilizado nos testes de laboratório são alguns dos fatores que não permitem que seja realizada comparação numérica entre os valores obtidos em laboratório com simulações do modelo usual de transformador com *tap* variável.

Outro aspecto relevante, que complicaria a comparação numérica, é que a corrente do transformador fica superior ao valor nominal (4,5A), a partir do terceiro ponto da curva apresentada na Figura 6.1, para a situação 110:220V, e a partir do quarto ponto da curva, para *tap* a situação 110:190V. Em relação à Figura 6.2, a corrente do transformador fica superior ao valor nominal, a partir do oitavo ponto, para a situação 220:110V, e a partir do nono ponto da curva, para a situação 190:110V,

Além disso, ressalta-se novamente nesta tese, que uma máquina elétrica não é um circuito elétrico, por mais adequado e completo que seja o modelo. Assim, apesar de o modelo proposto ser mais preciso que o usual (de acordo com o que foi apresentado no Capítulo 4), ele é, ainda, uma aproximação, mesmo que não fossem desprezadas a impedância *shunt* e a variação das impedâncias série (incluindo as resistências) com o *tap*.

6.2

Simulações Computacionais

6.2.1

Sistemas Radiais

6.2.1.1

Sistema de 2 Barras

Na Figura 6.3 é apresentado sistema de 2 barras utilizado nas simulações que quantificarão as informações apresentadas genericamente na Seção 4.5. O transformador situado entre as barras 1 e 2 possui impedância total sob condições nominais ($a=1$) igual a $j0,2$ p.u..

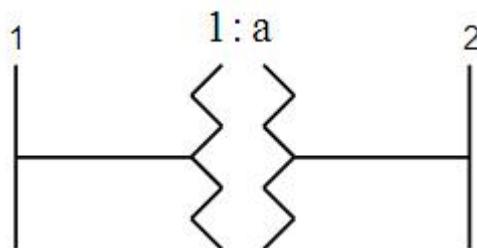


Figura 6.3: Sistema de 2 Barras

Na Figura 6.4 é apresentada comparação entre os modelos usual e proposto ao variar o *tap* do transformador do valor referente ao caso-base, $a=1$ p.u., para $a=1.1$ p.u.. Nessa simulação, a geração está na barra 1 ($\dot{V}_1 = 1|0^\circ$ p.u.) e carga ($\cos \phi_{cte} = 0,92$ ind) na barra 2, de forma que o fluxo de potência flua da barra 1 para a barra 2.

Na Figura 6.5 também é apresentada comparação entre os modelos usual e proposto. Nessa situação, entretanto, gerador está na barra 2 ($\dot{V}_2 = 1|0^\circ$ p.u.) e carga na barra 1 ($\cos \phi_{cte} = 0,92$ ind), de forma a se inverter o sentido do fluxo de potência. Nesse caso, o *tap* foi reduzido de seu valor base, $a=1$ p.u., para $a = 0,9$ p.u..

Analisando-se as Figuras 6.4 e 6.5, verifica-se que quando o *tap* é nominal, as curvas obtidas pelos modelos usual e proposto são as mesmas, uma vez que

quando $a=1$ os valores das impedâncias dos circuitos apresentados nas Figuras 3.4 e 4.4 são iguais, conforme Figura 4.5. Observa-se, também, que em p.u. as curvas para *tap* nominal são as mesmas, independente do sentido do fluxo de potência, uma vez que os circuitos elétricos em p.u. são os mesmos.

Para *tap* diferente do nominal, observa-se nessas figuras, que as tensões obtidas pelos modelos usual e proposto nos pontos de máximo carregamento são iguais para cada sentido do fluxo de potência, valendo 0,66 p.u. para fluxo da barra 1 para a barra 2, e 0,67 p.u. para fluxo inverso. Os valores das tensões são próximos porque os valores dos *taps* para diferentes sentidos do fluxo são quase inversos. Se os valores dos *taps* fossem exatamente inversos ($a_{12}=1/a_{21}$), ao se inverter o sentido do fluxo, as tensões seriam idênticas para ambos modelos, independente do sentido do fluxo de potência. No Apêndice V é detalhada esta questão, apresentando-se, inclusive, como poderiam ser calculados os valores das tensões.

Ainda para *tap* diferente do nominal, no que diz respeito à potência no ponto de máximo carregamento, para sentidos diferentes do fluxo de potência, valores diferentes são obtidos pelo modelo usual, o que pode ser observado comparando-se a Figura 6.4 com a Figura 6.5. Para fluxo da barra 1 para a barra 2, o ponto de máximo carregamento vale 2,17 p.u.. Invertendo-se o sentido do fluxo, o ponto de máximo carregamento vale 1,8 p.u.. Para o modelo proposto, todavia, para fluxo de potência da barra 1 para a barra 2, o ponto de máximo carregamento vale 1,96 p.u.. Invertendo-se o fluxo de potência, tem-se um máximo carregamento de 1,99 p.u.. Se os valores dos *taps* fossem exatamente inversos ($a_{12}=1/a_{21}$), ao se inverter o sentido do fluxo, os pontos de máximo carregamento seriam idênticos para o modelo proposto, independente do sentido do fluxo de potência, uma vez que os circuitos seriam simétricos para cada caminho da corrente elétrica, segundo o modelo proposto do transformador de *tap* variável, apresentado na Figura 4.3.

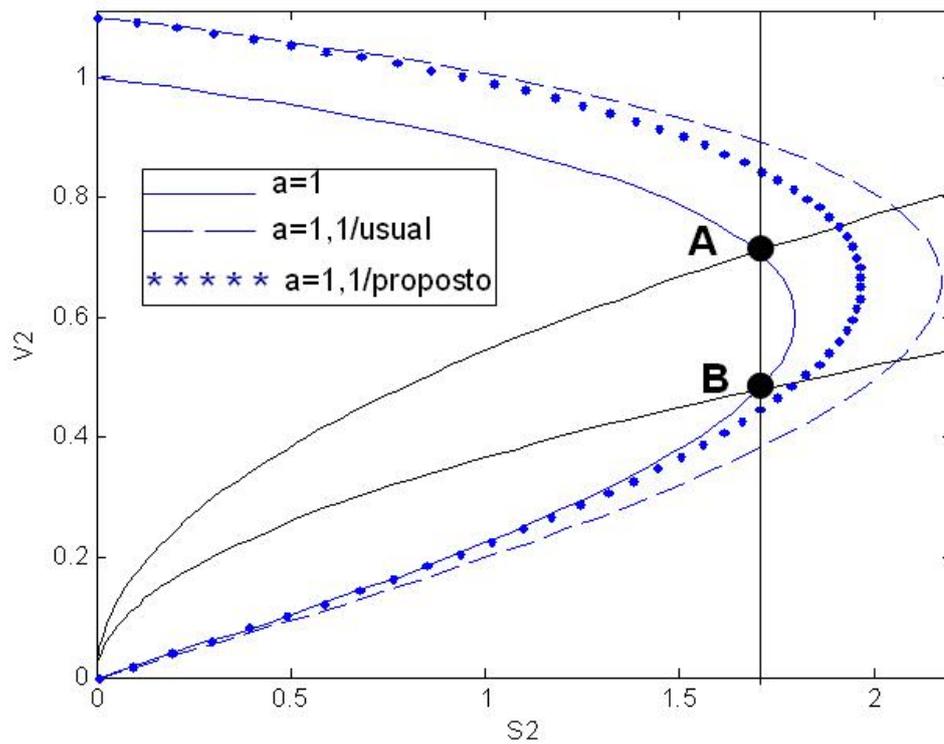


Figura 6.4: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 2

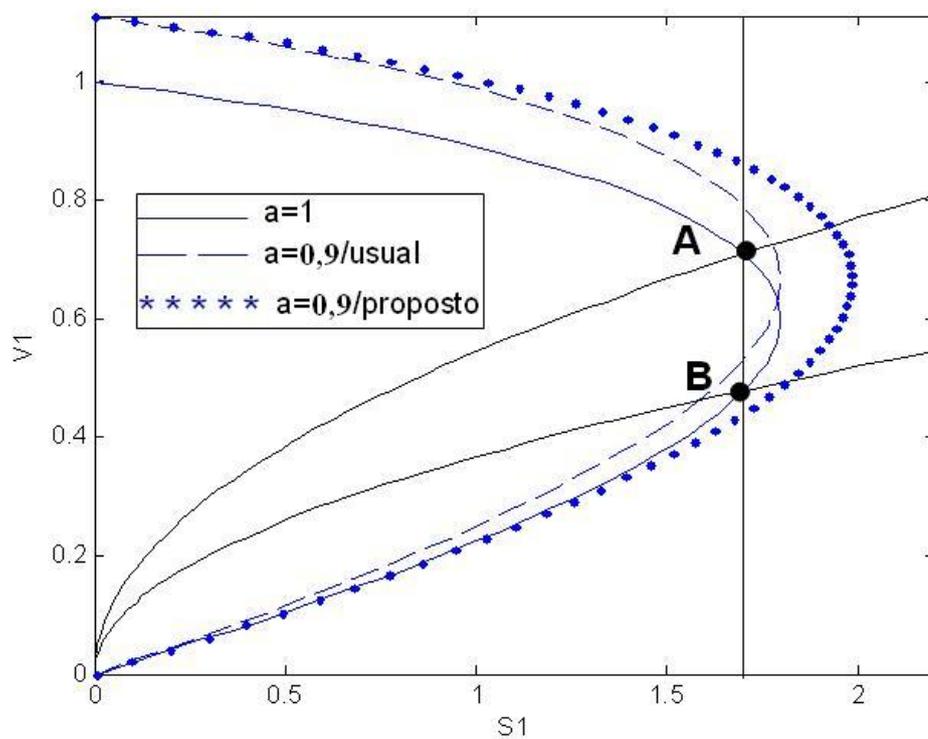


Figura 6.5: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 2 para Barra 1

Nas Tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 são apresentados valores de tensões, potências e margens de estabilidade de tensão referentes aos casos-base (A e B) e o efeito da alteração do *tap* do transformador nos valores dessas grandezas para os modelos usual e proposto, em função do sentido do fluxo de potência, para carga potência e impedância constante. Análise qualitativa foi apresentada na Seção 4.5.

Tabela 6.1: Grandezas Referentes ao Caso-Base (A) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o *Tap* para 1.1 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 1 para a Barra 2

Ponto de Operação	Caso Base (A)		Modelo Usual		Modelo Proposto	
	S cte	Z cte	S cte	Z cte	S cte	Z cte
Tensão (p.u.)	0,71	0,71	0,89	0,78	0,84	0,75
S (p.u.)	1,70	1,70	1,70	2,05	1,70	1,91
S max (p.u.)	1,80	1,80	2,17	2,17	1,96	1,96
M (p.u.)	0,10	0,10	0,47	0,12	0,26	0,05

A partir da Tabela 6.1, pode ser calculado que, para o modelo usual com carga potência constante, a tensão aumenta 25%, o ponto de máximo carregamento 21% e a margem 370%, em relação ao caso-base. Já para o modelo proposto, a tensão aumenta 18%, o ponto de máximo carregamento 9% e a margem de estabilidade de tensão 160%.

Ainda em relação à Tabela 6.1, para o modelo usual com carga impedância constante, a tensão aumenta 10% e a margem 20%, em relação ao caso-base. Para o modelo proposto, a tensão aumenta 6% e a margem diminui 50%. Os pontos de máximo carregamento independem do modelo de carga, conforme a teoria estabelece [42], sendo obtidas as mesmas variações percentuais em relação ao caso-base, apresentadas no parágrafo anterior.

Tabela 6.2: Grandezas Referentes ao Caso-Base (B) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o *Tap* para 1.1 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 1 para a Barra 2

Ponto de Operação	Caso Base (B)		Modelo Usual		Modelo Proposto	
	S cte	Z cte	S cte	Z cte	S cte	Z cte
Tensão (p.u.)	0,48	0,48	0,38	0,52	0,44	0,49
S (p.u.)	1,70	1,70	1,70	2,05	1,70	1,80
S max (p.u.)	1,80	1,80	2,17	2,17	1,96	1,96
M (p.u.)	0,10	0,10	0,47	0,12	0,26	0,16

Da Tabela 6.2, pode ser calculado que, para o modelo usual com carga potência constante, a tensão diminui 21%, o ponto de máximo carregamento aumenta 21% e a margem aumenta 370%, em relação ao caso-base. Já para o modelo proposto, a tensão diminui 8%, o ponto de máximo carregamento aumenta 9% e a margem de estabilidade de tensão aumenta 160%.

Para o modelo usual, mas agora com carga impedância constante, a tensão aumenta 8% e a margem 20%, em relação ao caso-base. Para o modelo proposto, a tensão aumenta 2% e a margem 60%.

Tabela 6.3: Grandezas Referentes ao Caso-Base (A) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o *Tap* para 0,9 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 2 para a Barra 1

Ponto de Operação	Caso Base (A)		Modelo Usual		Modelo Proposto	
	S cte	Z cte	S cte	Z cte	S cte	Z cte
Tensão (p.u.)	0,71	0,71	0,78	0,72	0,86	0,75
S (p.u.)	0,70	1,70	1,70	1,77	1,70	1,93
S max (p.u.)	1,80	1,80	1,80	1,80	1,98	1,98
M (p.u.)	0,10	0,10	0,10	0,03	0,28	0,05

A partir da Tabela 6.3, pode ser calculado que, para o modelo usual com carga potência constante, a tensão aumenta 10%, enquanto que o ponto de máximo carregamento e a margem de estabilidade de tensão não variam, em relação ao caso-base. Já para o modelo proposto, a tensão aumenta 21%, o ponto de máximo carregamento 10% e a margem de estabilidade de tensão 180%.

Ainda em relação à Tabela 6.3, para o modelo usual com carga impedância constante, a tensão aumenta 1% e a margem diminui 70%, em relação ao caso-base. Para o modelo proposto, a tensão aumenta 6% e a margem diminui 50%.

Tabela 6.4: Grandezas Referentes ao Caso-Base (B) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o *Tap* para 0,9 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 2 para a Barra 1

Ponto de Operação	Caso Base (B)		Modelo Usual		Modelo Proposto	
	S cte	Z cte	S cte	Z cte	S cte	Z cte
Tensão (p.u.)	0,48	0,48	0,53	0,46	0,43	0,49
S (p.u.)	1,70	1,70	1,70	1,58	1,70	1,81
S max (p.u.)	1,80	1,80	1,80	1,80	1,98	1,98
M (p.u.)	0,10	0,10	0,10	0,22	0,28	0,17

Da Tabela 6.4, pode ser calculado que, para o modelo usual com carga potência constante, a tensão aumenta 10%, enquanto que o ponto de máximo carregamento e a margem de estabilidade de tensão não variam, em relação ao caso-base. Já para o modelo proposto, a tensão diminui 10%, o ponto de máximo carregamento aumenta 10% e a margem de estabilidade de tensão aumenta 180%.

Para o modelo usual, mas agora com carga impedância constante, a tensão diminui 4% e a margem aumenta 120%, em relação ao caso-base. Para o modelo proposto, a tensão aumenta 2% e a margem aumenta 70%.

Resumindo, se o fluxo de potência flui da barra 1 para a barra 2, as diferenças entre os modelos usual e proposto são quantitativas, como pode ser observado na Figura 6.4 e Tabelas 6.1 e 6.2. Por outro lado, de acordo com a Figura 6.5 e com as Tabelas 6.3 e 6.4, se o fluxo flui no sentido inverso, além das diferenças quantitativas, também podem ser notadas diferenças qualitativas, como no ponto de máximo carregamento, que só varia com o *tap* no modelo proposto, e nas diferenças das informações sobre ações de controle de tensão.

6.2.1.2

Sistema de 4 Barras

De forma a se ratificar as diferenças entre as modelagens usual e proposta, foram efetuadas simulações em um sistema elétrico de 4 barras, conforme apresentado na Figura 6.6. Ao contrário das situações anteriormente apresentadas, o transformador, que está entre as barras 2 e 3, não tem a tensão em um de seus terminais controlada por gerador. Para se verificar os efeitos da variação do sentido do fluxo de potência, o gerador pode estar na barra 1 ou na barra 4. A carga, por sua vez, estará em barra terminal oposta ao gerador. O transformador situado entre as barras 2 e 3 possui impedância total sob condições nominais ($a=1$) igual a $j0,2$ p.u..

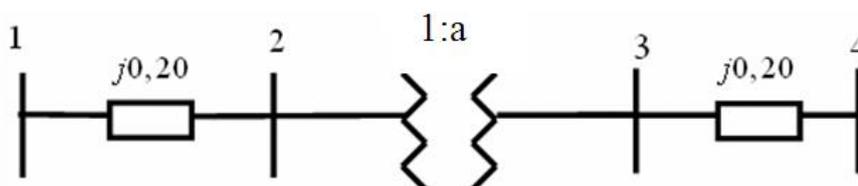


Figura 6.6: Sistema de 4 Barras

Nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 apresenta-se a comparação entre curvas ϕ constante no plano SV para os modelos usual e proposto, referentes as barras 4, 3 e 2, respectivamente, considerando-se que gerador foi inserido na barra 1 ($\dot{V}_1 = 1 \angle 0^\circ$ p.u.) e carga ($\cos \phi_{cte} = 0,92$ ind) na barra 4, de forma que o fluxo de potência flua da barra 1 para a barra 4. O *tap* do transformador foi alterado do valor referente ao caso-base, $a=1$ p.u. para $a=1,1$ p.u..

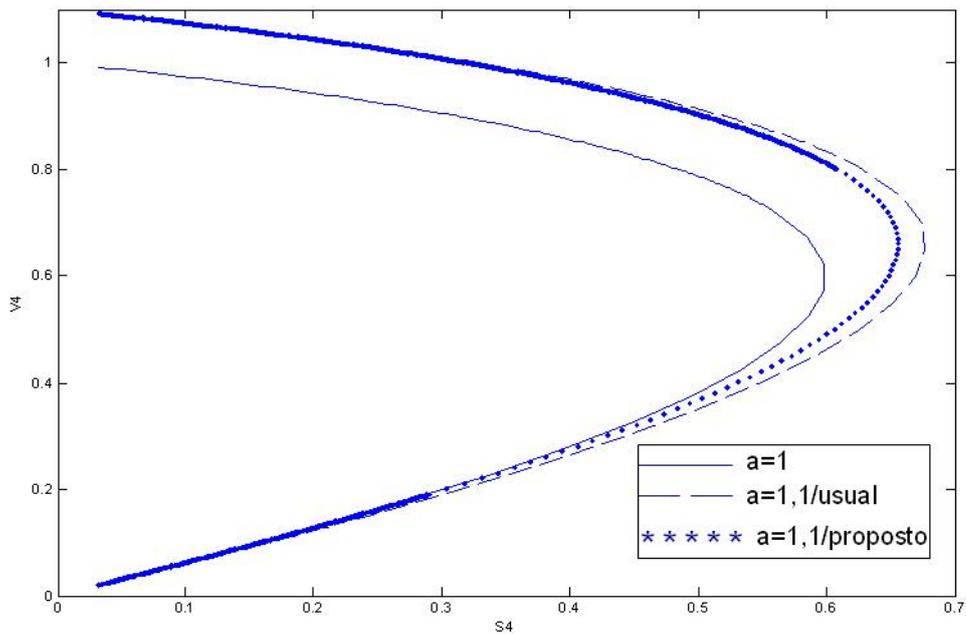


Figura 6.7: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 4

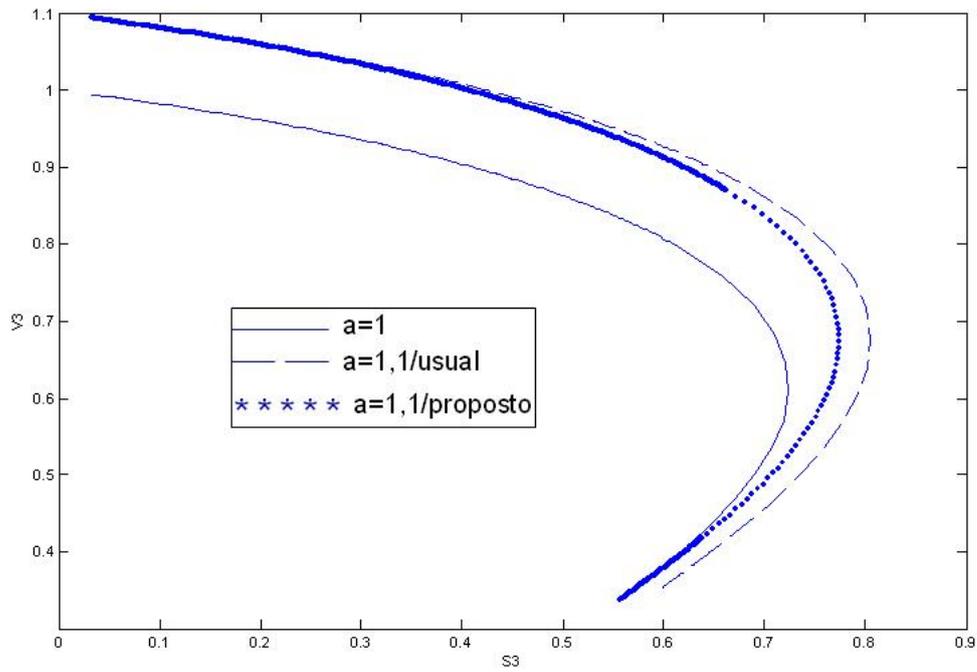


Figura 6.8: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 3

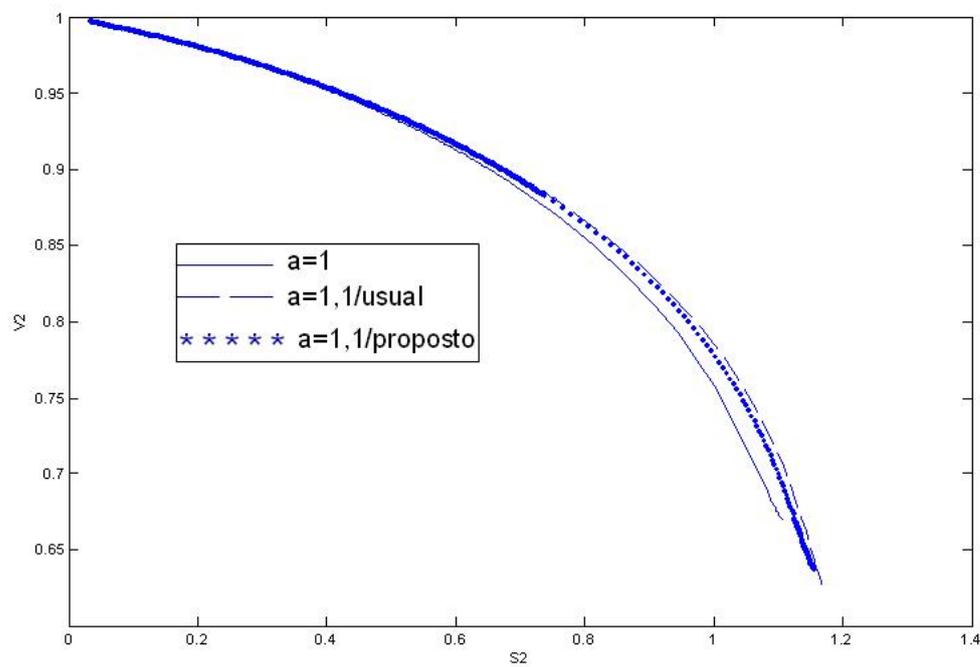


Figura 6.9: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 2

Nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 apresenta-se comparação entre curvas ϕ constante no plano SV para os modelos usual e proposto, referentes as barras 1, 2 e 3, respectivamente, considerando-se que gerador foi inserido na barra 4 ($\dot{V}_4 = 1 \angle 0^\circ$ p.u.) e carga ($\cos \phi_{cte} = 0,92$ ind) na barra 1, de forma que o fluxo de potência flua da barra 4 para a barra 1. O *tap* do transformador foi alterado do valor referente ao caso-base, $a=1$ p.u. para $a=0,9$ p.u.. Além das diferenças entre os valores das tensões informados pelos modelos usual e proposto, que aumentam com a carga, e dos pontos de máximo carregamento, é importante notar, na Figura 6.11, que informações sobre ações de controle de tensão fornecidas pelos dois modelos começam a ser diferentes em pontos posteriores ao ponto X assinalado.

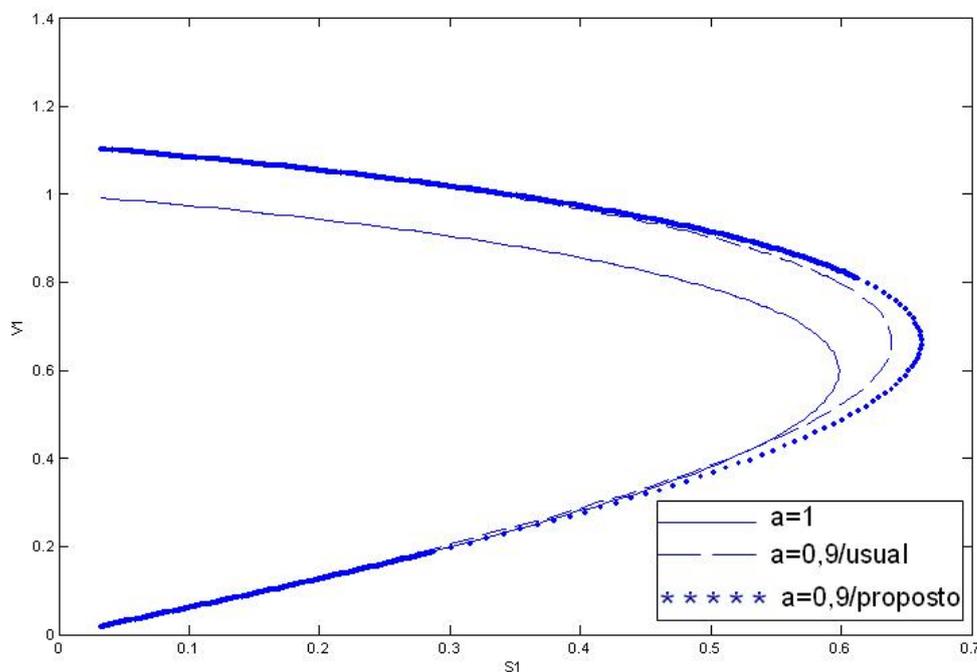


Figura 6.10: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 1

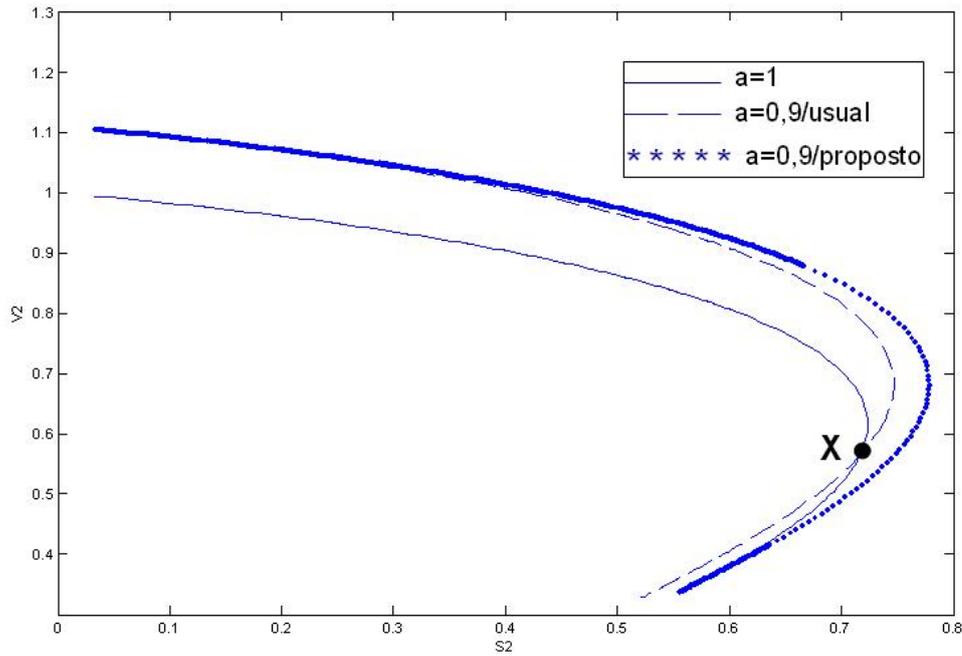


Figura 6.11: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 2

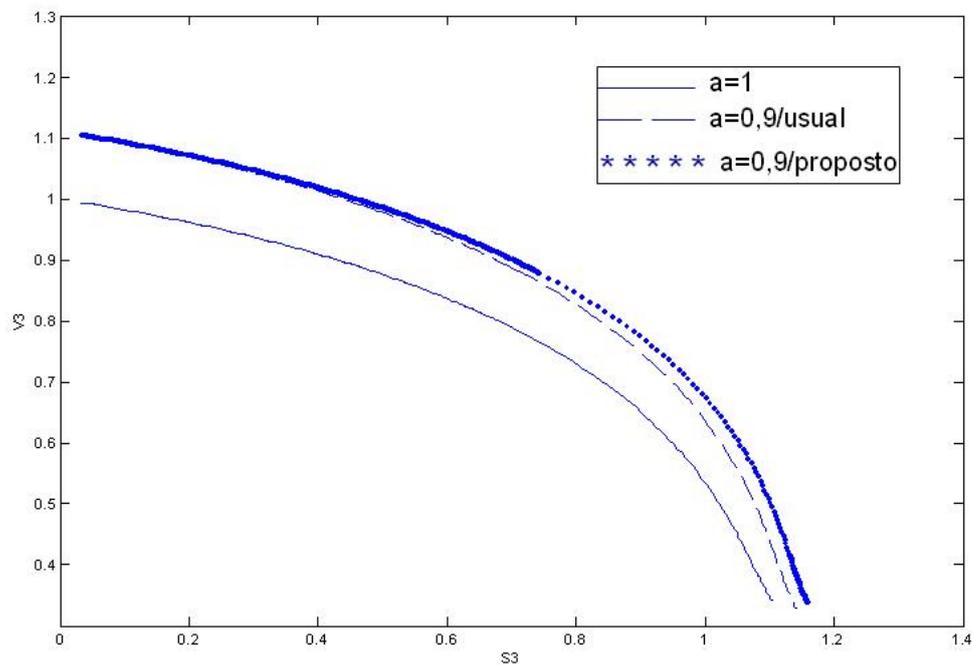


Figura 6.12: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 3

6.2.2

Sistemas Malhados

As curvas ϕ constante no plano *Carregamento Adicional* x V foram obtidas através de um algoritmo de fluxo de potência continuado [43]. Nas simulações apresentadas, o carregamento adicional é realizado em todas as barras com carga do sistema, mantendo-se constante o fator de potência. As expressões para os incrementos das potências ativa e reativa demandadas de cada barra com carga são:

$$P_{D_k} = P_{D_k}^0 (1 + \text{Carregamento Adicional})$$

$$Q_{D_k} = Q_{D_k}^0 (1 + \text{Carregamento Adicional})$$

O aumento da carga foi suprido apenas pelo gerador da barra de referência de ângulo de tensão. Não foram considerados os limites de geração de potência reativa das barras PV do sistema. Além disso, não foram alterados os *taps* dos transformadores, de forma a se controlar tensões. Apesar disso, diferenças são observadas entre os modelo usual e proposto porque alguns transformadores, dos diversos sistemas-teste utilizados nas simulações, possuem valor do *tap* diferente do nominal. A seguir serão apresentadas simulações realizadas em sistemas-teste do IEEE apresentados em [44].

6.2.2.1

Sistema IEEE 14 Barras

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são apresentadas as curvas ϕ constante no plano *Carregamento Adicional* x V para as barras 5 e 6. Entre essas barras está um dos três transformadores com *taps* variáveis desse sistema-teste. Nessa simulação, considerou-se que a barra 6 é PQ. Podem ser observadas diferenças entre os valores de tensão, principalmente na medida em que o carregamento do sistema é aumentado e na região anormal de operação. Os pontos de máximo carregamento também são diferentes.

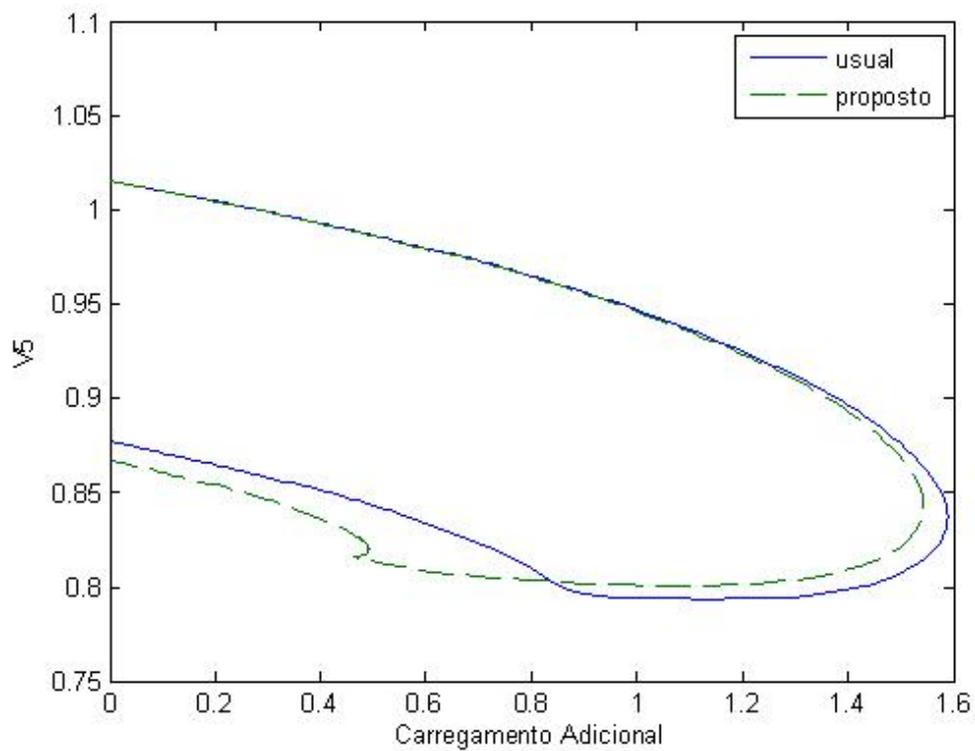


Figura 6.13: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 5 / IEEE14
Barras

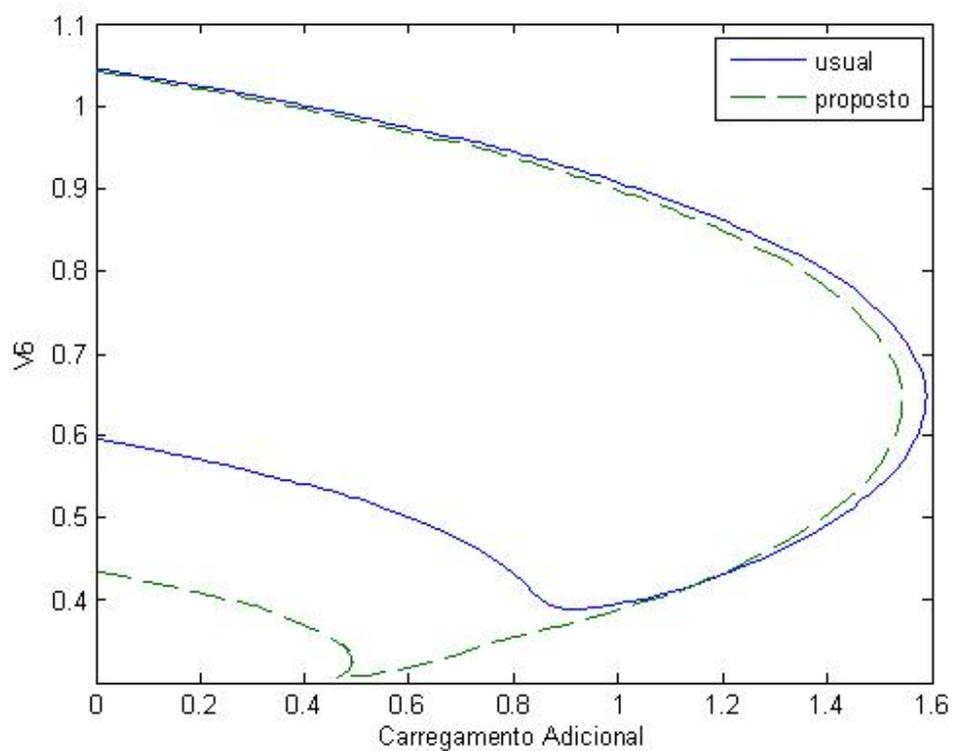


Figura 6.14: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 6 / IEEE14
Barras

Importante notar na Figura 6.14 que, se o sistema opera na região anormal, com carregamento adicional de 0,8 p.u. e ocorre corte de carga, de forma que o carregamento adicional passe a valer 0,6 p.u., informações contrárias referentes ao comportamento da tensão são fornecidas pelos dois modelos. Ou seja, é informado que a tensão será elevada, utilizando-se o modelo usual, ou reduzida no caso do modelo proposto.

6.2.2.2

Sistema IEEE 118 Barras

O sistema IEEE 118 barras possui nove transformadores, sendo que dois deles não tem tensão controlada por gerador (transformador entre as barras 17 e 30 e transformador entre as barras 37 e 38). São apresentadas nas Figuras 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18, as curvas ϕ constante no plano *Carregamento Adicional x V* para as barras 17, 30, 37 e 38, respectivamente.

Novamente são observadas diferenças entre os valores das tensões obtidos entre os modelos usual e proposto, principalmente na região anormal de operação, sendo também observada diferença entre os pontos de máximo carregamento. É importante observar que todos os pontos apresentados nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam valores de tensão aceitáveis para operação de sistemas elétricos de potência.

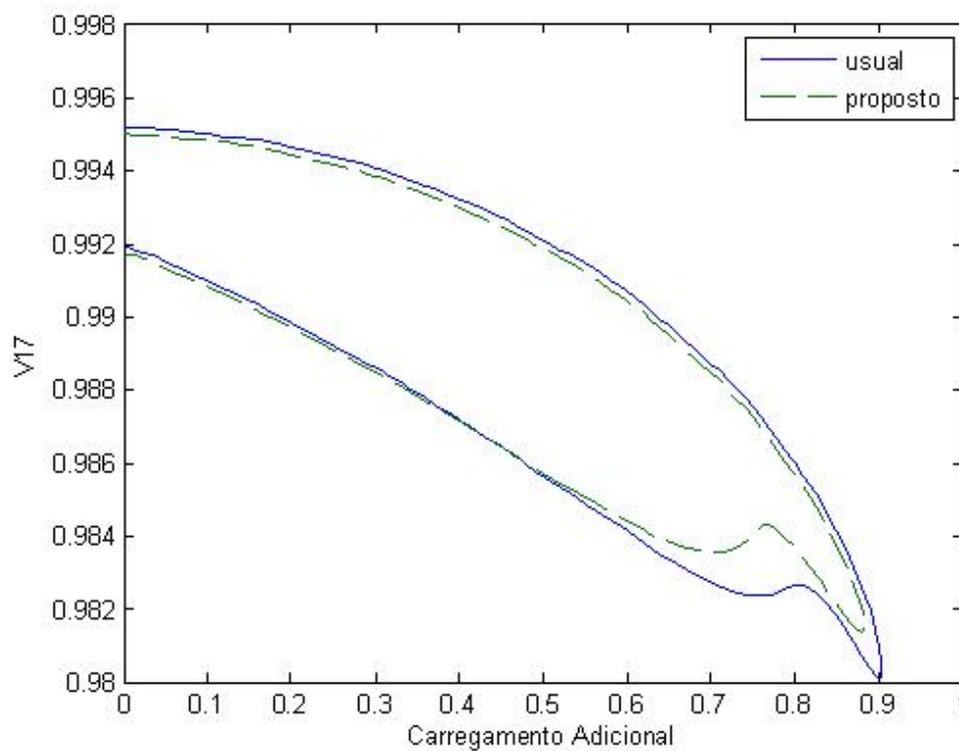


Figura 6.15: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 17 / IEEE 118 Barras

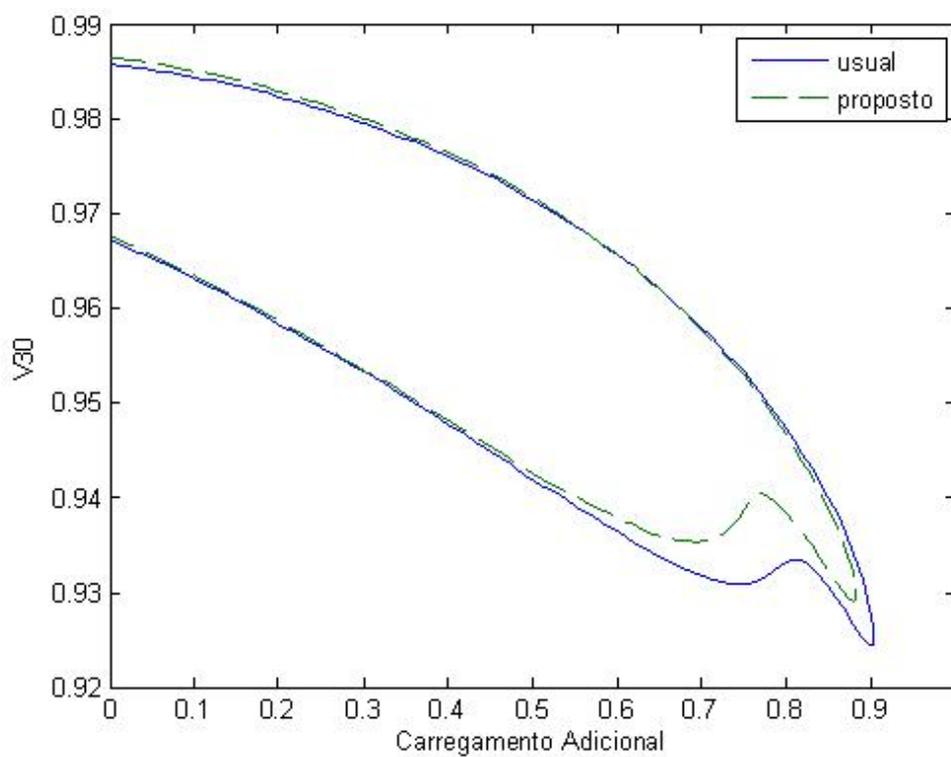


Figura 6.16: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 30 / IEEE 118 Barras

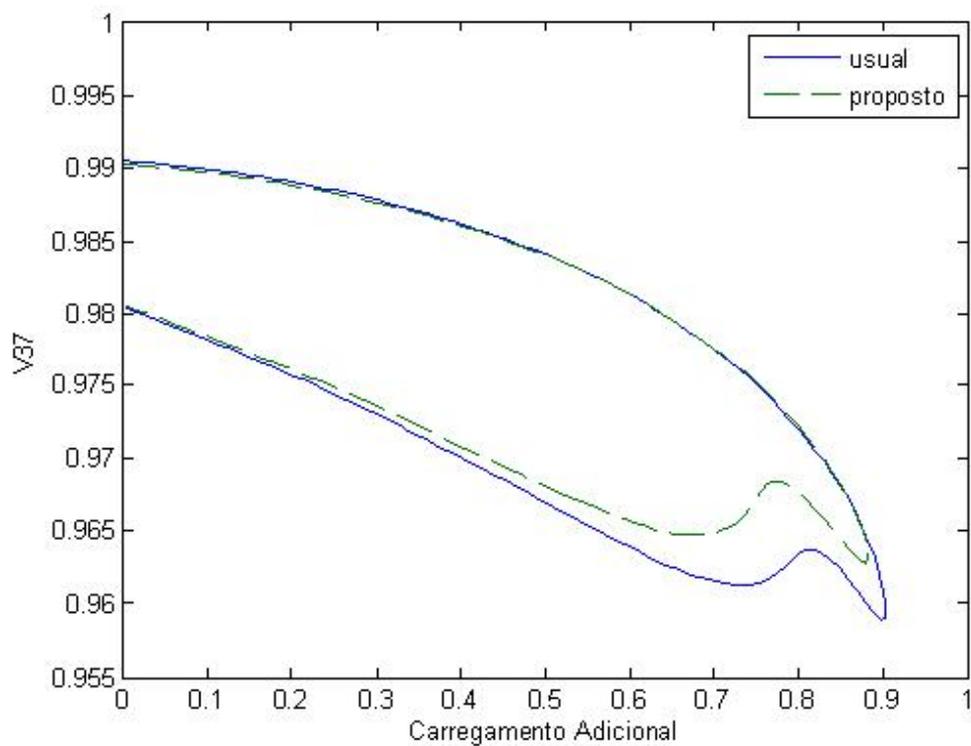


Figura 6.17: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 37 / IEEE 118 Barras

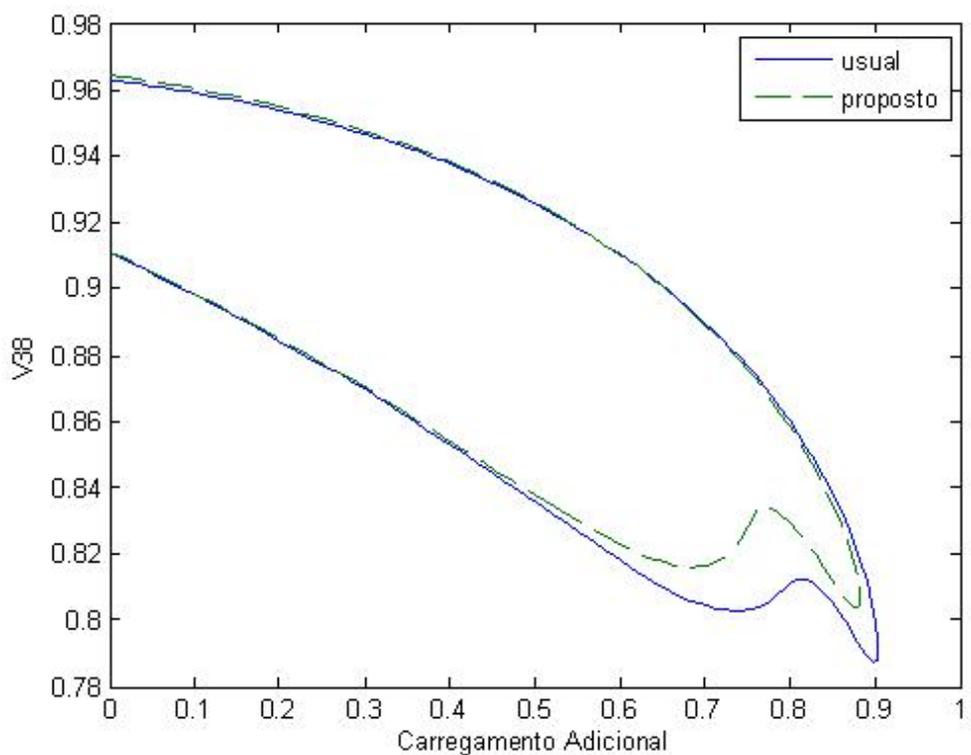


Figura 6.18: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 38 / IEEE 118 Barras

Nas figuras anteriores observa-se que, se o sistema opera na região anormal, com carregamento adicional de 0,8 p.u. e ocorre pequeno corte de carga, informações contrárias referentes ao comportamento da tensão são fornecidas pelos dois modelos. Ou seja, é informado que a tensão será elevada, utilizando-se o modelo proposto ou reduzida no caso do modelo usual.

6.2.2.3

Sistemas IEEE 30, 57 e 300 Barras

Nas simulações anteriores, foram comparados perfis de tensão de barras terminais de transformadores, obtidos pelos modelos usual e proposto. Conforme mostrado nas Figuras 6.19, 6.20 e 6.21, o perfil de tensão de barras não terminais de transformadores com *taps* variáveis também são modificados quando se compara os modelos usual e proposto. Nessas situações, as maiores diferenças são observadas na proximidade do ponto de máximo carregamento.

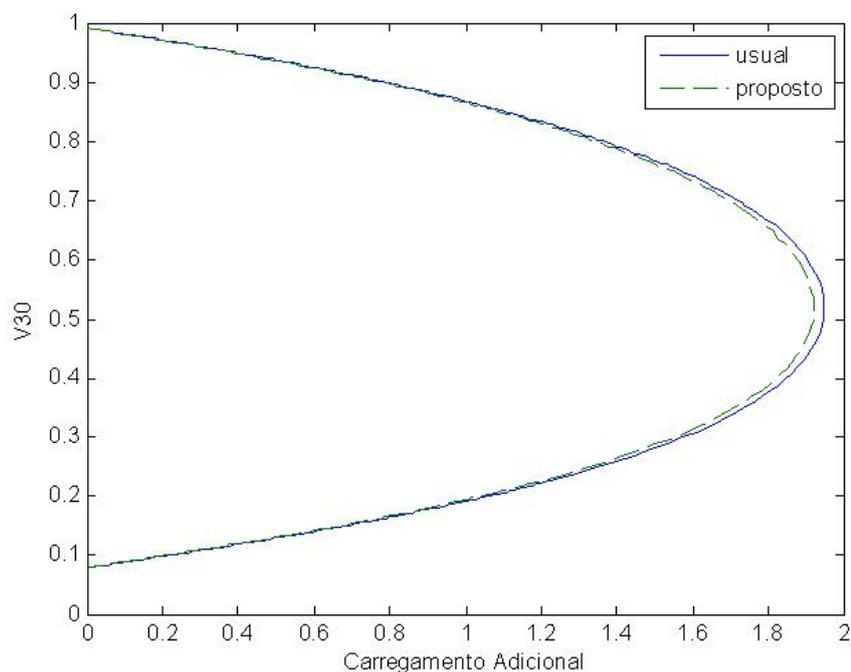


Figura 6.19: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 30 / IEEE 30 Barras

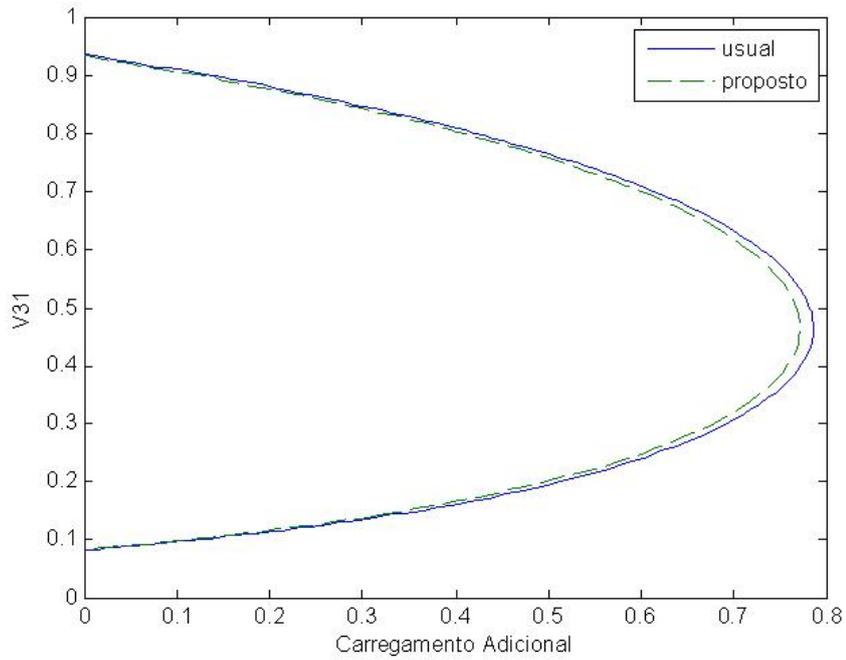


Figura 6.20: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 31 / IEEE
57 Barras

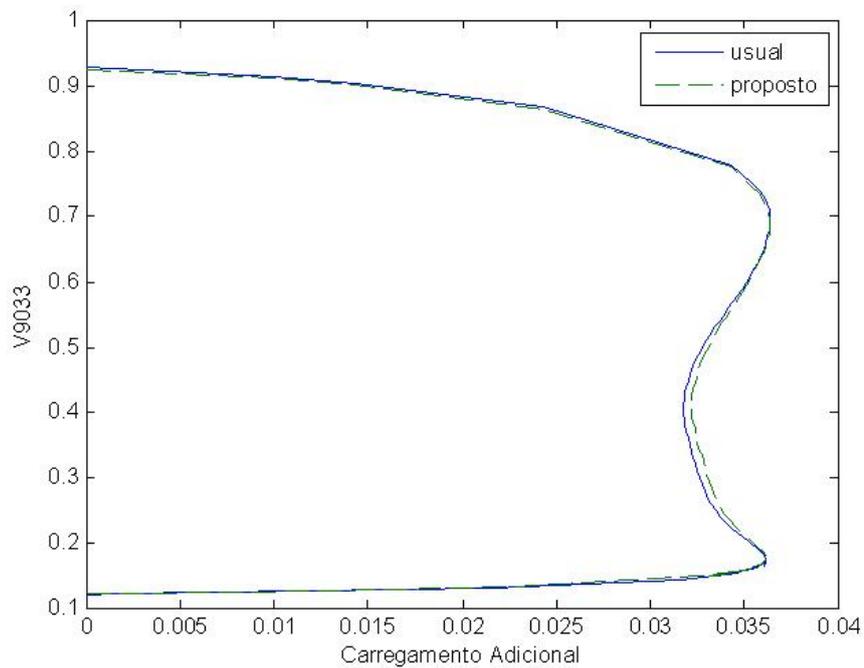


Figura 6.21: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9033 /
IEEE 300 Barras

6.2.3

Controle de Tensão através de Transformador com *Tap* Variável

As curvas ϕ constante no plano *Carregamento Adicional* x V foram obtidas através de um algoritmo de fluxo de potência continuado com possibilidade de se controlar tensões de barras terminais ou remotas de transformadores através da variação de *tap* de transformador [41]. Se o *tap* atinge seu limite mínimo ou máximo, a barra cuja tensão estava sendo controlada muda seu tipo, de PQV para PQ. Porém, a cada carregamento posterior, ou iteração do método de Newton Raphson, é verificada a possibilidade de a barra voltar a ser PQV, através da avaliação do sinal do resíduo da tensão da barra de tensão controlada, como detalhado em [41].

Nas simulações apresentadas, o carregamento adicional é realizado em todas as barras com carga do sistema, mantendo-se constante o fator de potência. As expressões para os incrementos das potências ativa e reativa demandadas de cada barra com carga são as mesmas apresentadas na Seção 6.2.2.

O aumento da carga foi suprido apenas pelo gerador da barra de referência de ângulo de tensão. Foram utilizados sistemas IEEE, apresentados em [44], nos quais foram considerados os limites de geração de potência reativa das barras PV dos sistemas de 14, 57 e 118 barras. Para os sistemas IEEE 30 e 300 barras, os limites foram desprezados, conforme [45].

Os transformadores com *taps* variáveis com controle automático de *tap*, bem como as respectivas barras de tensão controladas (terminais ou remotas) escolhidos foram os mesmos de [45]. As tensões são controladas em 1 p.u. (exceto para o sistema de 300 barras), desde que o limite do *tap* não seja alcançado.

Como mencionado, alguns transformadores com *taps* variáveis dos sistemas-teste foram escolhidos para controlar tensões de barras terminais ou remotas. Apesar disso, os modelos de todos os transformadores com *taps* variáveis dos sistemas-teste são modificados quando o modelo proposto é usado, apresentando diferença em relação ao modelo usual se $a \neq 1$, ou seja, quando o valor do *tap* é diferente do nominal.

6.2.3.1

Sistema IEEE 14 Barras

Nesse sistema, o transformador com *tap* variável situado entre as barras 4 e 9 controla a tensão da barra 9. Através das Figuras 6.22 e 6.23, verifica-se que já no carregamento inicial, o limite mínimo do *tap*, de 0,9 p.u., é atingido, não sendo possível controlar a tensão da barra 9. Porém, com carregamento adicional em torno de 0,21 p.u., o *tap* do transformador fica na sua faixa normal de operação, sendo possível controlar a tensão da barra 9, até um carregamento adicional de aproximadamente 0,4 p.u., quando o *tap* atinge seu limite máximo, de 1,1 p.u.. A partir desse carregamento, a tensão da barra 9 não é mais controlada, devido ao fato de o limite do *tap* ter sido atingido. Na Figura 6.22, observa-se maiores diferenças nos valores das tensões obtidos pelos modelos usual e proposto nas proximidades do ponto de máximo carregamento e na região anormal. É possível notar, também, que o ponto de máximo carregamento utilizando-se o modelo proposto é inferior ao obtido via modelo usual.

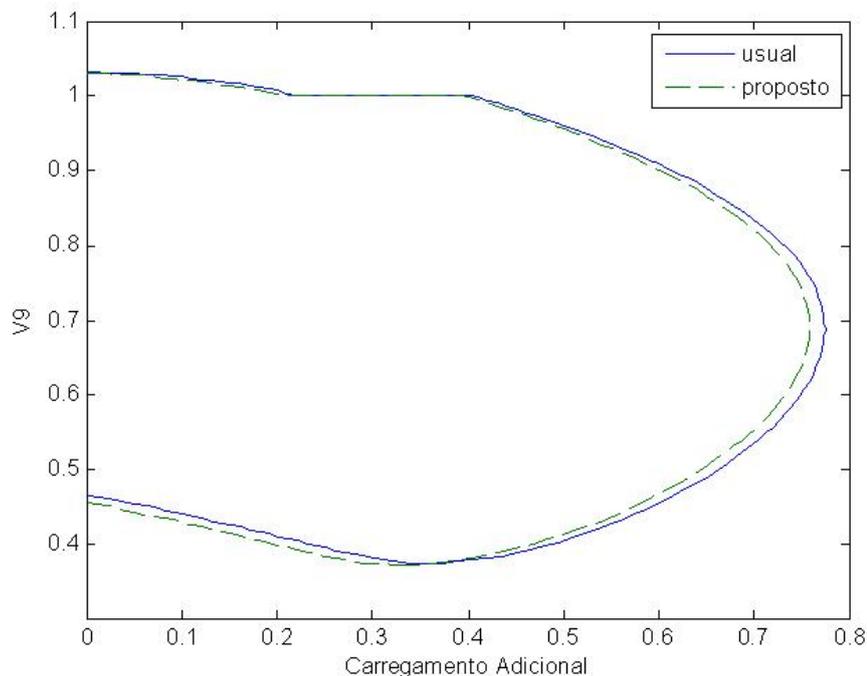


Figura 6.22: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9 / Controle de Tensão / IEEE 14 Barras

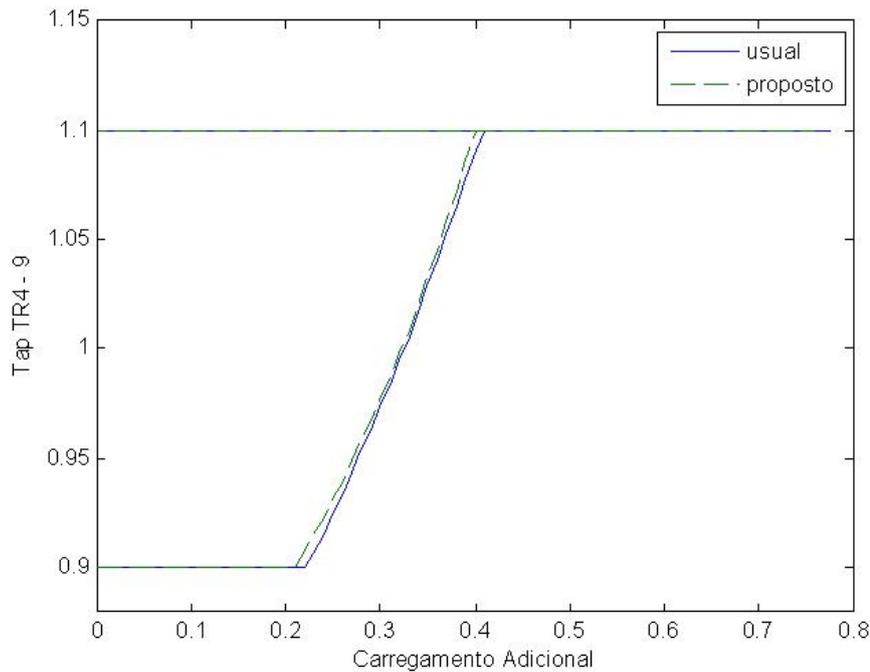


Figura 6.23: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 4 e 9 / Controle de Tensão / IEEE 14 Barras

6.2.3.2

Sistema IEEE 30 Barras

Os transformadores com *taps* variáveis situados entre as barras 6 e 9, 4 e 12, 6 e 10, 28 e 27, controlam as tensões das barras 9, 12, 24 (controle remoto) e 27 respectivamente.

Através das Figuras 6.24 e 6.25, verifica-se que a tensão da barra 9 é controlada até um carregamento adicional de aproximadamente 1,7 p.u., quando o *tap* do transformador com *tap* variável atinge valor máximo, sendo que, no modelo usual, a tensão não é controlada do carregamento inicial até aproximadamente 0,2 p.u., devido à violação do limite inferior do *tap*. A partir do carregamento adicional de aproximadamente 1,7 p.u., a tensão diminui até um valor mínimo no ponto de máximo carregamento, quando começa a aumentar, até um carregamento adicional de aproximadamente 1,1 p.u. quando a tensão volta a ser controlada uma vez que o *tap* do transformador volta a operar na faixa permitida de operação.

Analisando-se as Figuras 6.24 e 6.25, percebe-se diferenças entre os modelos usual e proposto nos pontos de máximo carregamento, nos

carregamentos nos quais os limites dos *taps* são atingidos ou voltam à região de controlabilidade (podendo ser observados pontos de operação onde é informado que a tensão é controlada ou não, dependendo do modelo do transformador) e nos valores das tensões quando a barra deixa de ser controlada, para determinado carregamento.

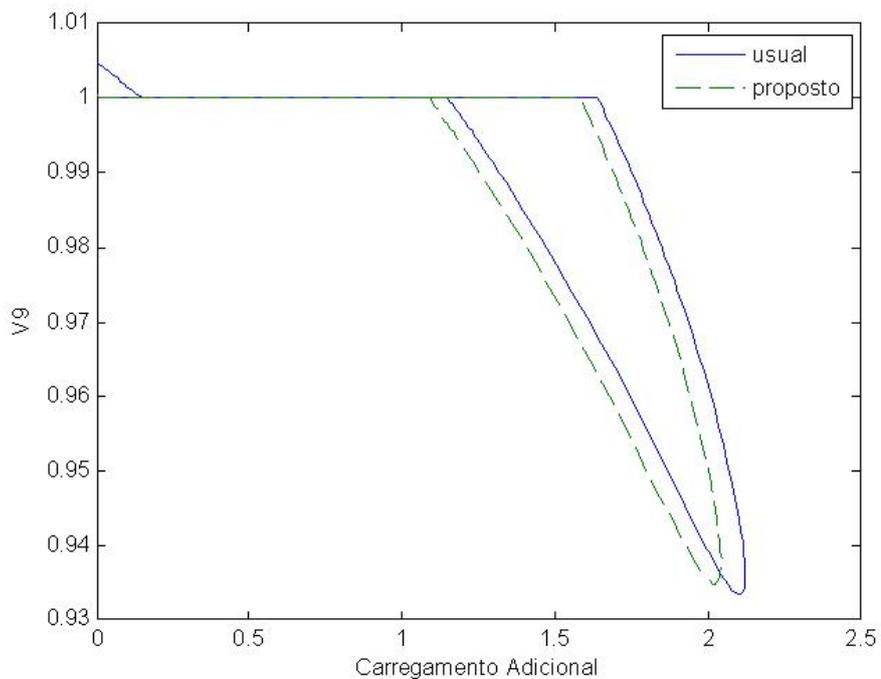


Figura 6.24: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

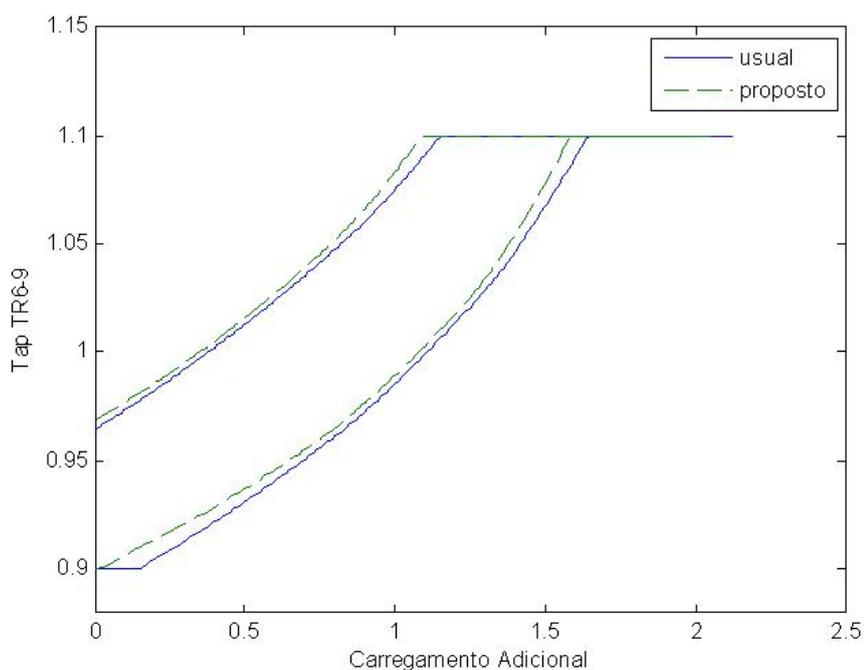


Figura 6.25: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 6 e 9 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

Curvas similares às obtidas anteriormente são obtidas para a barra 12, conforme apresentado nas Figuras 6.26 e 6.27, com a diferença que, com ambos os modelos, não é possível controlar a tensão da barra 12 do carregamento inicial até carregamento adicional em torno de 0,2 p.u., devido à violação do limite mínimo do *tap* do transformador com *tap* variável.

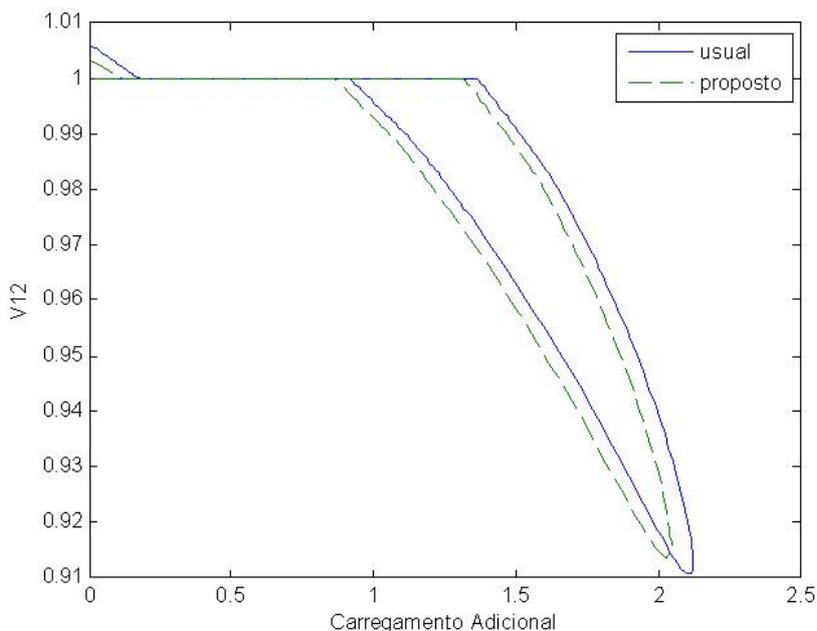


Figura 6.26: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 12 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

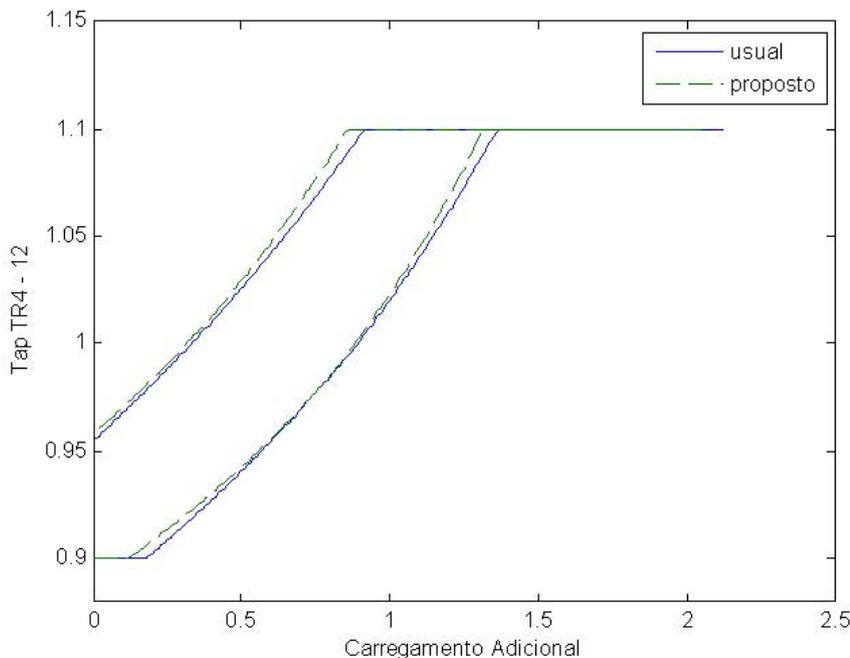


Figura 6.27: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 4 e 12 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

Na Figura 6.28, observa-se que o transformador situado entre as barras 6 e 10 não controla a tensão da barra 24 para nenhum carregamento, uma vez que, desde o carregamento inicial é atingido o limite máximo do *tap* de 1,1 p.u., tanto para o modelo usual quanto para o modelo proposto. É possível observar as diferenças obtidas para os dois modelos no perfil de tensão das barras, que aumentam nas proximidades do ponto de máximo carregamento e na região anormal. Novamente, o ponto de máximo carregamento obtido através do modelo proposto é inferior ao valor utilizando-se o modelo usual.

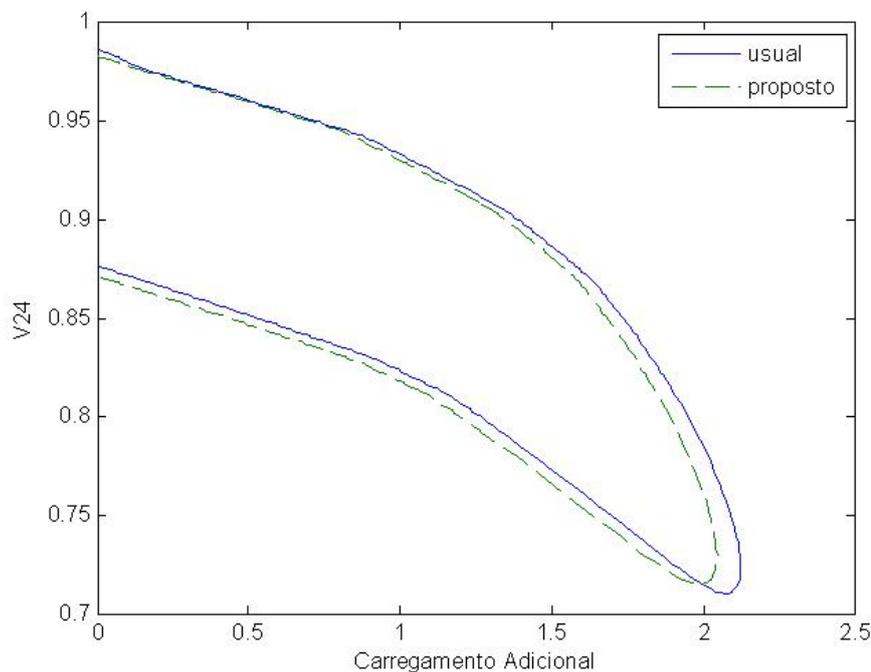


Figura 6.28: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 24 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

Através das Figuras 6.29 e 6.30, observa-se que o transformador situado entre as barras 28 e 27 controla a tensão da barra 27 até um carregamento adicional de aproximadamente 0,8 p.u., quando o *tap* do transformador atinge o valor máximo de 1,1 p.u.. A partir dessa violação de limite, a barra 27 permanece sem controle de tensão para todos os carregamentos adicionais. Além disso, observa-se diferenças entre os dois modelos no carregamento no qual o limite de *tap* do transformador é atingido, nos valores das tensões quando a barra deixa de ser controlada e no ponto de máximo carregamento.

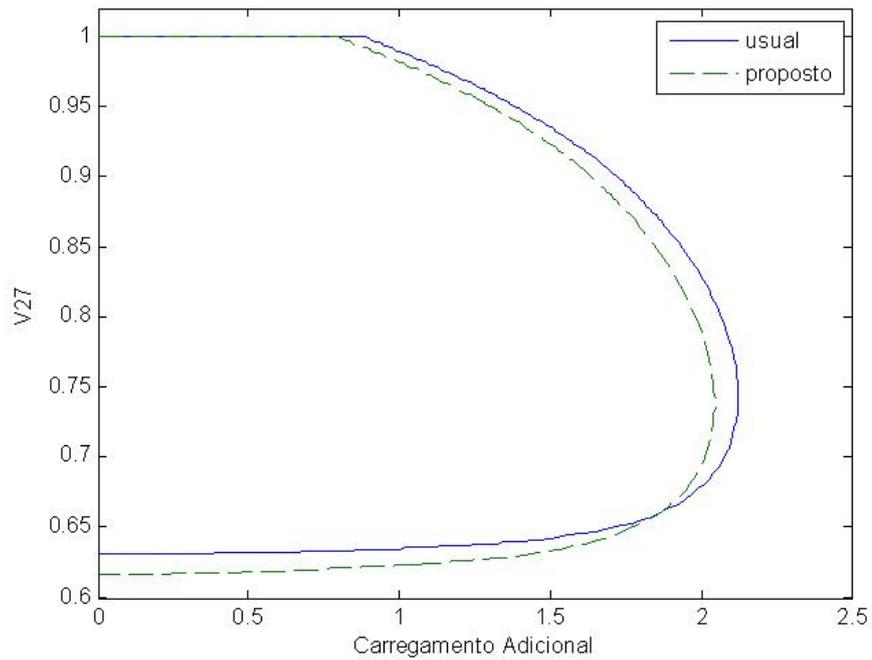


Figura 6.29: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 27 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

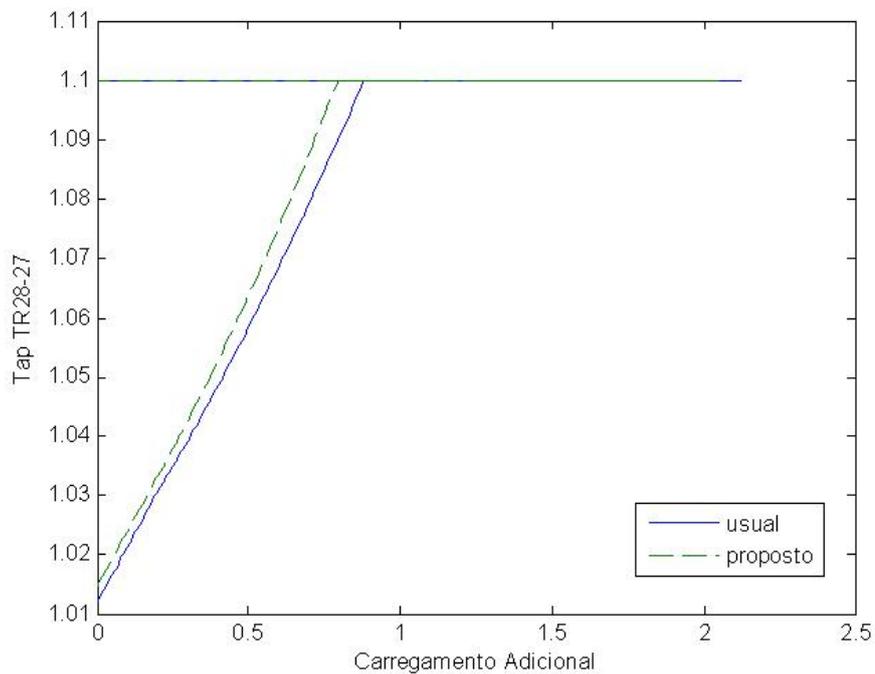


Figura 6.30: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 28 e 27 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras

6.2.3.3

Sistema IEEE 57 Barras

Neste sistema-teste, o transformador situado entre as barras 32 e 34 controla a tensão na barra 32, enquanto o transformador situado entre as barras 10 e 51 controla remotamente a tensão da barra 50.

Nas Figuras 6.31 e 6.32 observa-se que a tensão da barra 32 é controlada até o *tap* do transformador atingir seu limite máximo de 1,15 p.u.. A partir do ponto em que o limite máximo é atingido, a tensão dessa barra não volta mais a ser controlada. A partir das citadas figuras, diferenças podem ser observadas entre os modelos usual e proposto, como no carregamento no qual o *tap* máximo é atingido, nos valores diferentes das tensões para cada carregamento adicional e no ponto de máximo carregamento que, novamente, é inferior com o modelo proposto.

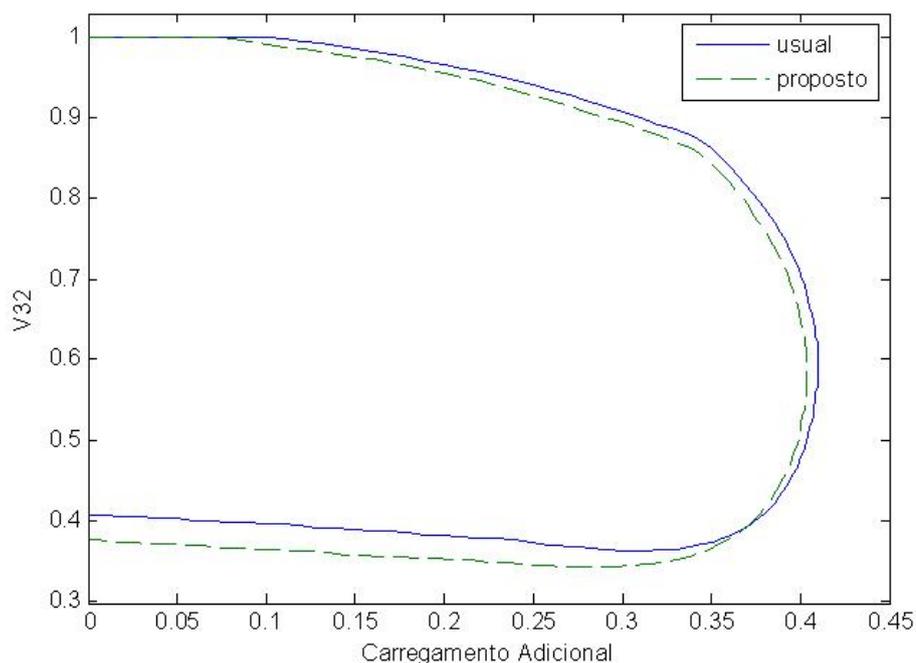


Figura 6.31: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 32 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras

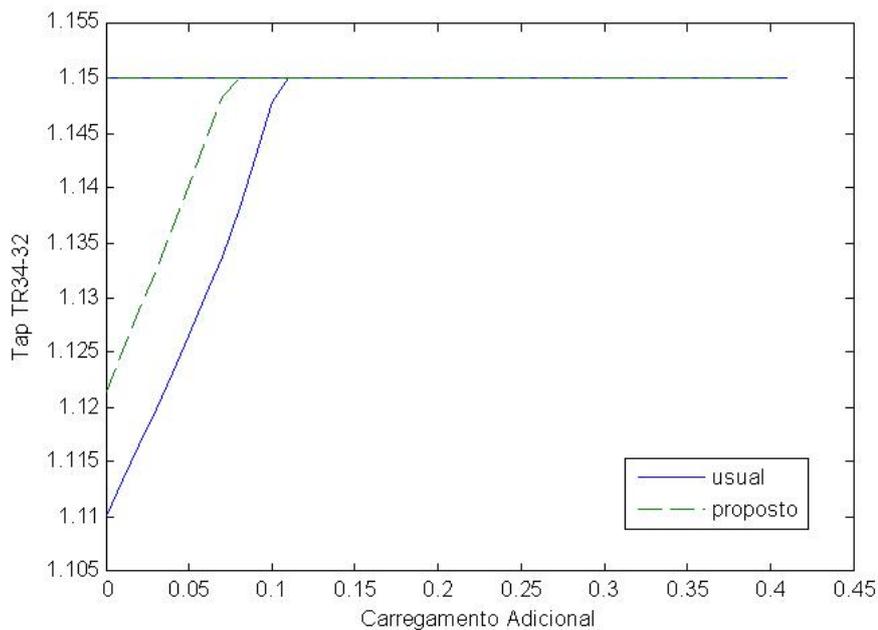


Figura 6.32: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 32 e 34 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras

Com relação ao perfil da tensão da barra 50, ocorre situação semelhante à observada anteriormente, ou seja, é atingido o limite máximo do *tap* de 1,1 p.u. em um certo carregamento adicional e, a partir dessa violação, perde-se o controle da tensão, conforme observa-se nas Figuras 6.33 e 6.34. A partir dessas figuras, diferenças podem ser observadas entre os modelos usual e proposto.

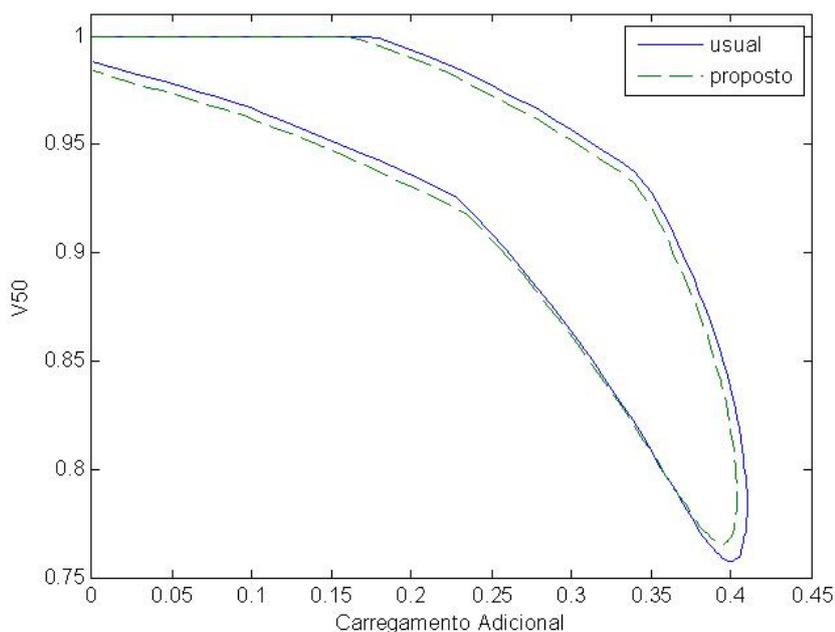


Figura 6.33: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 50 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras

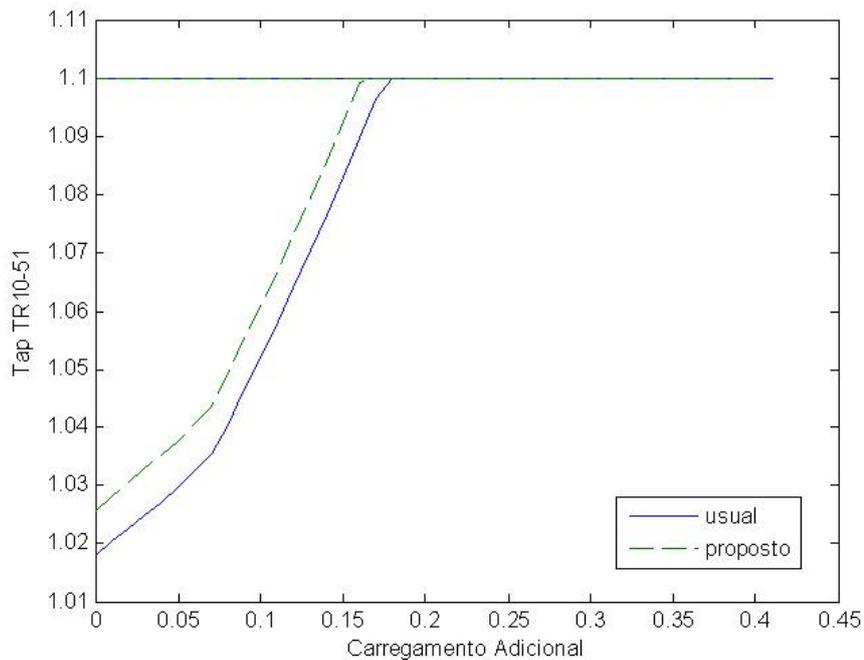


Figura 6.34: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 10 e 51 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras

6.2.3.4

Sistema IEEE 118 Barras

Nesse sistema-teste, o transformador situado entre as barras 37 e 38, controla a tensão da barra 38. A partir das Figuras 6.35 e 6.36, observa-se que o limite mínimo de 0,9 p.u. do *tap* do transformador é atingido quando o carregamento adicional vale aproximadamente 0,3 p.u., para os dois modelos de transformador. Observa-se que o ponto de máximo carregamento é inferior para o modelo proposto e que maiores diferenças nos valores das tensões são obtidos na região anormal, nas proximidades do ponto de máximo carregamento.

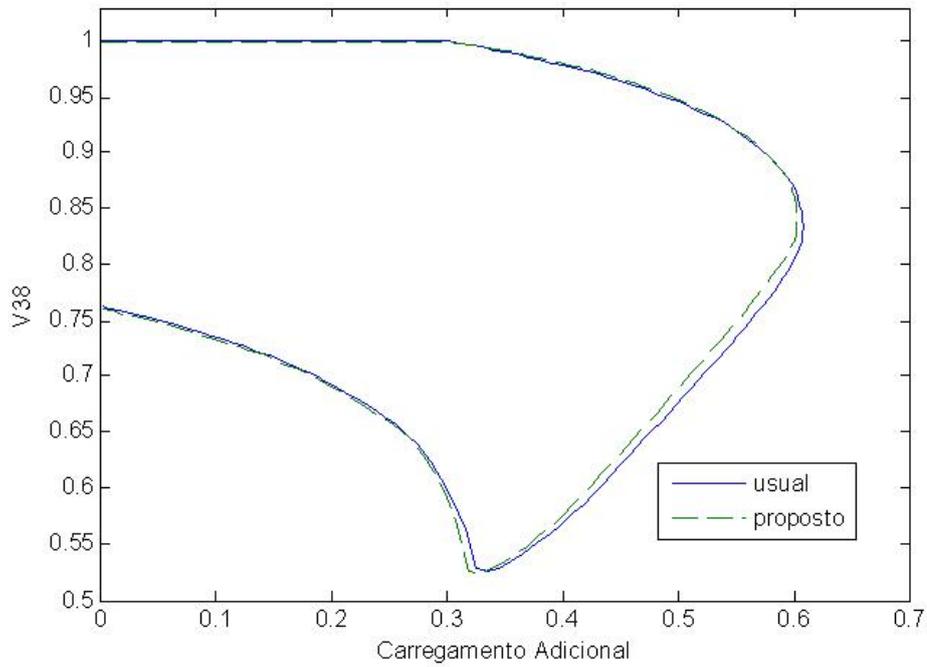


Figura 6.35: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 38 / Controle de Tensão / IEEE 118 Barras

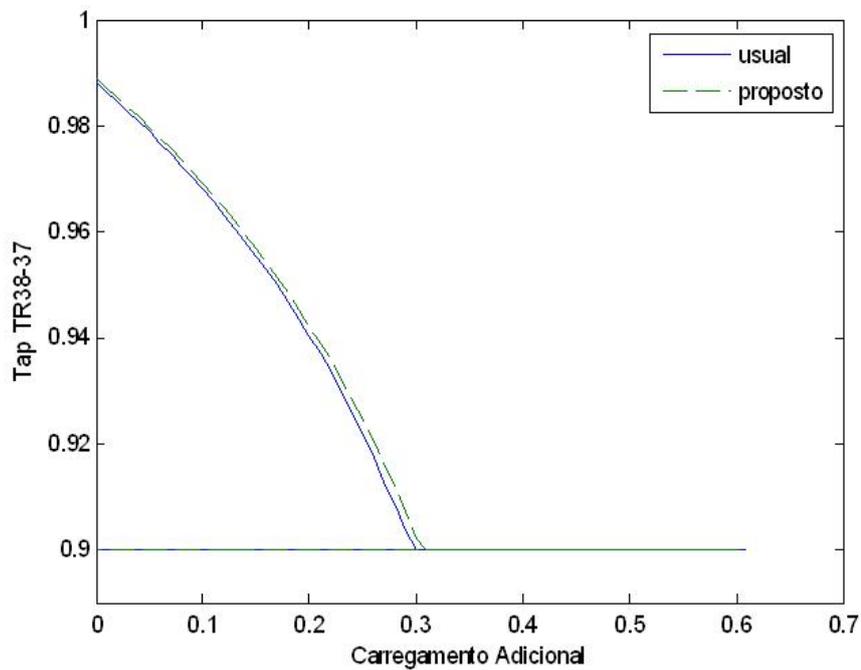


Figura 6.36: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 37 e 38 / Controle de Tensão / IEEE 118 Barras

6.2.3.5

Sistema IEEE 300 Barras

O transformador situado entre as barras 9001 e 9006 do sistema-teste controla remotamente a tensão da barra 9003. Nas Figuras 6.37 e 6.38 observa-se as diferenças entre os modelos usual e proposto. Com os dois modelos, é atingido o limite máximo de 1,1 p.u. para carregamento adicional em torno de 0,028 p.u.. A partir dessa violação, a tensão da barra 9003 não volta a ser controlada.

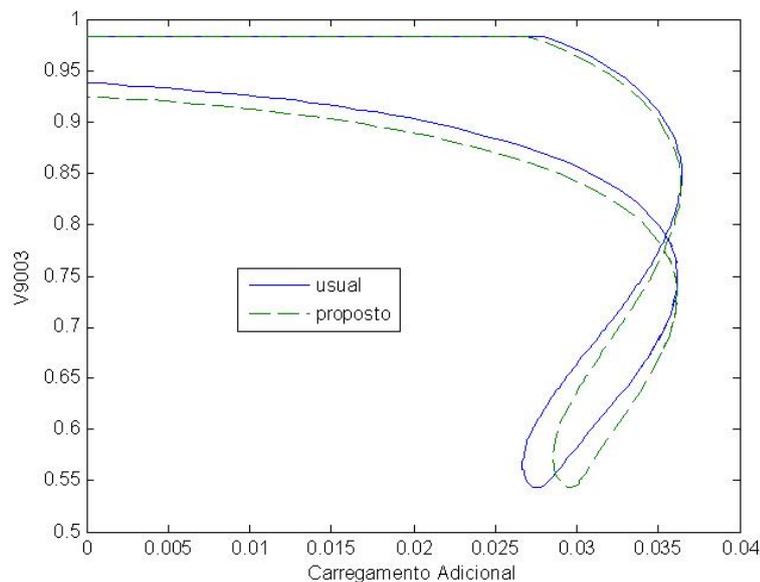


Figura 6.37: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9003 / Controle de Tensão / IEEE 300 Barras

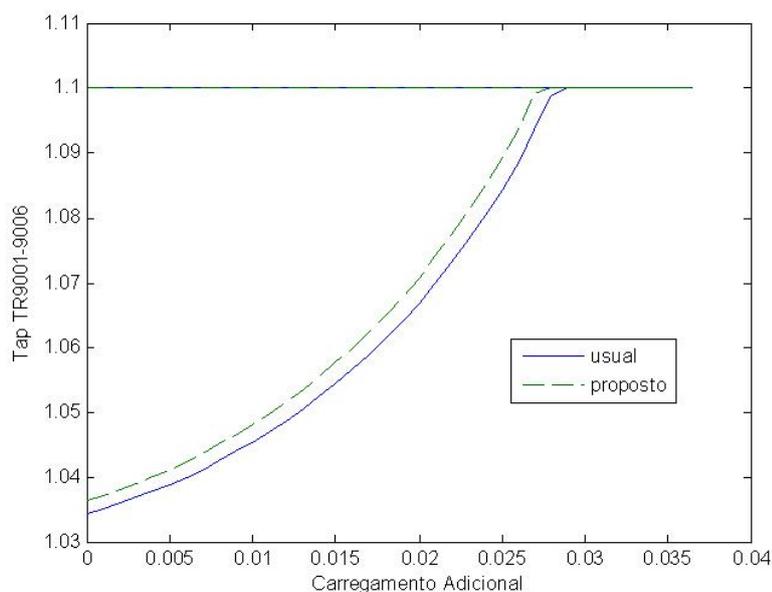


Figura 6.38: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 9001 e 9006 / Controle de Tensão / IEEE 300 Barras

6.2.4

Sistemas Brasileiros

A seguir serão apresentadas simulações realizadas em sistemas brasileiros, de 16 e de 33 barras, elaborados em [46]. Os dados de barra, de linha e demais informações relevantes sobre a obtenção desses sistemas podem ser obtidos em [46] ou em [47]. Inicialmente, serão apresentados resultados de simulações nas quais os transformadores têm *taps* diferentes do valor nominal ($a=1$), não sendo efetuado controle de tensão. Posteriormente, os transformadores controlarão tensões de barras, através da variação do *tap*.

6.2.4.1

Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

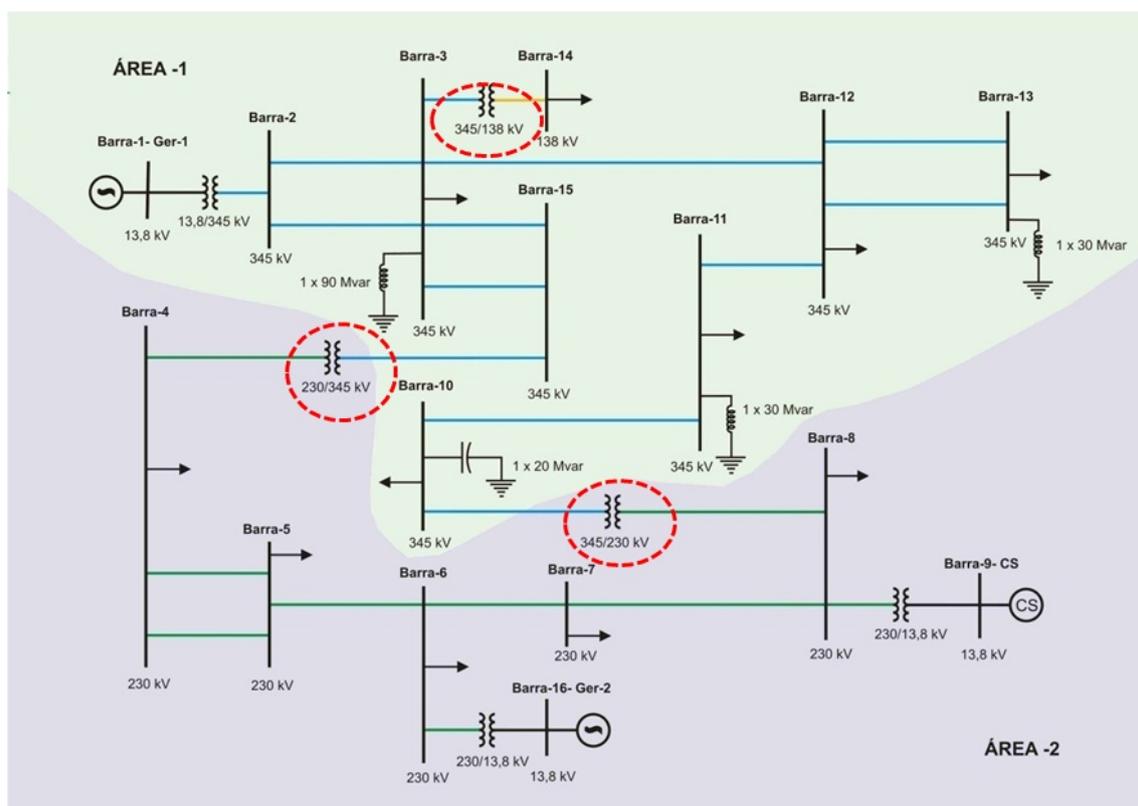


Figura 6.39: Sistema-Teste de 16 Barras

Na Figura 6.39 apresenta-se o diagrama do sistema-teste brasileiro de 16 barras, onde estão destacados os três transformadores cujos *taps* são diferentes do nominal, não sendo efetuado controle de tensão. Os demais transformadores desse sistema possuem *taps* nominais. Esse sistema-teste foi elaborado a partir de dados do sistema da Eletrobras Furnas da região Goiás/Brasília.

Nas Tabelas 6.5 e 6.6, apresentadas a seguir, tem-se relatório obtido de [43] para solução de fluxo de potência com carga pesada, utilizando o modelo usual de transformadores com *tap* variável.

Tabela 6.5: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	PG (MW)	QG (MVar)	PD (MW)	QD (MVar)
001	PV	1.03000	2.46391	350.000	12.5386	0.00000	0.00000
002	PQ	1.02944	-0.37416	0.00028	0.00011	0.00000	0.00000
003	PQ	1.00468	-5.08197	0.00013	0.00029	47.0000	31.0000
004	PQ	1.04630	-7.20463	-0.0002	0.00011	106.000	70.0000
005	PQ	1.04599	-5.79773	0.00005	0.00005	31.0000	20.0000
006	PQ	1.03852	-2.80521	0.00011	0.00003	17.0000	12.0000
007	PQ	1.03978	-5.82662	0.00001	0.00002	15.0000	14.0000
008	PQ	1.03910	-7.78879	-0.0000	0.00004	39.0000	24.0000
009	PV	1.01000	-7.78879	0.00000	-23.513	0.00000	0.00000
010	PQ	0.97781	-9.51638	-0.0000	0.00002	42.0000	30.0000
011	PQ	0.98889	-9.39545	0.00001	0.00002	40.0000	28.0000
012	PQ	0.99918	-8.22682	-0.0000	0.00013	101.000	56.0000
013	PQ	0.99580	-8.63436	0.00003	0.00002	59.0000	34.0000
014	PQ	1.07288	-7.37928	-0.0002	0.00029	57.0000	39.0000
015	PQ	0.99426	-5.84790	0.00005	0.00002	0.00000	0.00000
016	VTETA	1.03000	0.00000	209.403	-29.993	0.00000	0.00000

Tabela 6.6: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha /
Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual

DE	PARA	I (A)	F_ativo (MW)	F_reativo (MVar)	tap (p.u.)	Defasamento (graus)
001	002	3.75586	350.0000	12.53869	1.000	0.000
002	001	3.75586	-350.0000	4.80374	1.000	0.000
002	003	69.04537	175.0001	-2.40182	1.000	0.000
003	002	62.46714	-173.622	-70.1489	1.000	0.000
002	003	69.04537	175.0001	-2.40182	1.000	0.000
003	002	62.46714	-173.622	-70.1489	1.000	0.000
003	012	32.07189	209.3021	-15.0850	1.000	0.000
012	003	29.21064	-208.259	-18.6666	1.000	0.000
003	014	41.11614	57.00024	42.45163	0.910	0.000
014	003	37.41569	-57.0002	-38.9997	0.910	0.000
003	015	20.63582	16.97175	-4.45679	1.000	0.000
015	003	18.70279	-16.9397	-25.8021	1.000	0.000
003	015	20.63582	16.97175	-4.45679	1.000	0.000
015	003	18.70279	-16.9397	-25.8021	1.000	0.000
004	005	14.14467	-36.0603	-10.4834	1.000	0.000
005	004	14.06160	36.14347	-18.1236	1.000	0.000
004	005	14.14467	-36.0603	-10.4834	1.000	0.000
005	004	14.06160	36.14347	-18.1236	1.000	0.000
004	015	47.24648	-33.8795	-49.0330	1.090	0.000
015	004	51.49866	33.87952	51.60429	1.090	0.000
005	006	17.99628	-103.286	16.24737	1.000	0.000
006	005	16.42369	103.8076	-31.9564	1.000	0.000
006	007	12.06317	88.59550	-20.5821	1.000	0.000
007	006	12.43960	-88.1552	0.11759	1.000	0.000
006	016	34.09785	-209.403	40.53868	1.000	0.000
016	006	34.09785	209.4030	-29.9935	1.000	0.000
007	008	9.77058	73.15527	-14.1175	1.000	0.000
008	007	9.51841	-72.9218	-3.24274	1.000	0.000
008	009	23.28084	0.00000	24.19114	1.000	0.000
009	008	23.28084	0.00000	-23.5136	1.000	0.000
010	008	48.44868	-33.9217	47.88524	0.903	0.000
008	010	43.74916	33.92176	-44.9483	0.903	0.000
010	011	40.95823	-8.07824	-58.7628	1.000	0.000
011	010	45.13347	8.10916	-2.40055	1.000	0.000
011	012	41.81905	-48.1091	-54.9362	1.000	0.000
012	011	45.70412	48.21534	-17.2010	1.000	0.000
012	013	26.14920	29.52191	-10.0661	1.000	0.000
013	012	24.06846	-29.4999	-31.8742	1.000	0.000
012	013	26.14920	29.52191	-10.0661	1.000	0.000
013	012	24.06846	-29.4999	-31.8742	1.000	0.000

Nas Tabelas 6.7 e 6.8 apresentadas a seguir, tem-se os resultados obtidos utilizando-se o modelo proposto.

Tabela 6.7: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	PG (MW)	QG (MVar)	PD (MW)	QD (MVar)
001	PV	1.03000	2.32430	350.000	12.2570	0.00000	0.00000
002	PQ	1.02948	-0.51365	0.00027	0.00010	0.00000	0.00000
003	PQ	1.00479	-5.22111	0.00012	0.00028	47.0000	31.0000
004	PQ	1.04780	-7.21690	-0.0002	0.00012	106.000	70.0000
005	PQ	1.04695	-5.80560	0.00005	0.00005	31.0000	20.0000
006	PQ	1.03868	-2.80478	0.00011	0.00003	17.0000	12.0000
007	PQ	1.03936	-5.81513	0.00001	0.00002	15.0000	14.0000
008	PQ	1.03824	-7.77046	-0.0000	0.00004	39.0000	24.0000
009	PV	1.01000	-7.77046	-0.0000	-22.816	0.00000	0.00000
010	PQ	0.97996	-9.67654	-0.0000	0.00002	42.0000	30.0000
011	PQ	0.99036	-9.54694	0.00001	0.00002	40.0000	28.0000
012	PQ	0.99982	-8.37020	-0.0000	0.00013	101.000	56.0000
013	PQ	0.99645	-8.77723	0.00002	0.00002	59.0000	34.0000
014	PQ	1.06955	-7.76464	-0.0002	0.00025	57.0000	39.0000
015	PQ	0.99379	-5.97810	0.00006	0.00002	0.00000	0.00000
016	VTETA	1.03000	0.00000	209.401	-30.627	0.00000	0.00000

Tabela 6.8: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto

DE	PARA	I (A)	F_ativo (MW)	F_reativo (MVar)	tap (p.u.)	Defasamento (graus)
001	002	3.48277	350.0000	12.25706	1.000	0.000
002	001	3.48277	-350.000	5.08438	1.000	0.000
002	003	68.94234	175.0001	-2.54214	1.000	0.000
003	002	62.37146	-173.623	-70.0280	1.000	0.000
002	003	68.94234	175.0001	-2.54214	1.000	0.000
003	002	62.37146	-173.623	-70.0280	1.000	0.000
003	012	30.67023	209.5544	-17.1278	1.000	0.000
012	003	27.96970	-208.509	-16.6395	1.000	0.000
003	014	45.66392	62.91637	47.27949	0.910	0.000
014	003	41.55416	-62.9163	-43.0476	0.910	0.000
003	015	21.10291	16.84621	-3.75709	1.000	0.000
015	003	19.10737	-16.8132	-26.4812	1.000	0.000
003	015	21.10291	16.84621	-3.75709	1.000	0.000
015	003	19.10737	-16.8132	-26.4812	1.000	0.000
004	005	14.27259	-36.1868	-9.74254	1.000	0.000
005	004	14.04714	36.27072	-18.9252	1.000	0.000
004	005	14.27259	-36.1868	-9.74254	1.000	0.000
005	004	14.04714	36.27072	-18.9252	1.000	0.000

004	015	44.71351	-30.9647	-46.5160	1.090	0.000
015	004	48.73773	30.96473	48.76993	1.090	0.000
005	006	19.24821	-103.541	17.85044	1.000	0.000
006	005	17.62148	104.0677	-33.5226	1.000	0.000
006	007	12.03709	88.33418	-19.6589	1.000	0.000
007	006	12.24552	-87.8974	-0.83637	1.000	0.000
006	016	34.71260	-209.401	41.18163	1.000	0.000
016	006	34.71260	209.4017	-30.6275	1.000	0.000
007	008	10.00820	72.89742	-13.1636	1.000	0.000
008	007	9.59421	-72.6657	-4.19123	1.000	0.000
008	009	22.59104	0.00000	23.45489	1.000	0.000
009	008	22.59104	0.00000	-22.8169	1.000	0.000
010	008	52.03465	-37.4762	51.61526	0.903	0.000
008	010	46.98729	37.47628	-48.1606	0.903	0.000
010	011	39.84970	-8.33432	-57.1605	1.000	0.000
011	010	43.88842	8.36187	-4.26578	1.000	0.000
011	012	40.97451	-48.3618	-53.1584	1.000	0.000
012	011	44.63080	48.46605	-19.1569	1.000	0.000
012	013	26.15087	29.52188	-10.1017	1.000	0.000
013	012	24.07159	-29.4999	-31.8935	1.000	0.000
012	013	26.15087	29.52188	-10.1017	1.000	0.000
013	012	24.07159	-29.4999	-31.8935	1.000	0.000

Os valores dos *taps* dos três transformadores destacados na Figura 6.39 são diferentes do nominal. Comparando-se as Tabelas 6.5 e 6.7, observa-se diferenças em todas as grandezas apresentadas. Nos módulos das tensões, verifica-se diferenças na segunda casa decimal de algumas barras, como a 11. Com relação aos ângulos das tensões, cita-se, como exemplo, o ângulo da tensão da barra 2, que vale $-0,37^\circ$, utilizando-se o modelo usual, e $-0,51^\circ$, utilizando-se o modelo proposto. Comparando-se as potências geradas, as maiores variações são observadas para potência reativa. Como exemplo, a potência reativa gerada pela barra 9 vale $-23,51$ MVar, utilizando-se o modelo usual, e $-22,81$ MVar, utilizando-se o modelo proposto.

Com relação às correntes e aos fluxos nas linhas de transmissão, diferenças também são observadas, comparando-se as Tabelas 6.6 e 6.8. Como exemplo, a corrente da barra 3 para a barra 14 vale $41,11$ A, utilizando-se o modelo usual, e $45,66$ A, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência ativa nessa linha vale $57,00$ MW, utilizando-se o modelo usual, e $62,91$ MW, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência reativa vale $42,45$ MVar, utilizando-se o modelo usual, e $47,27$ MVar, utilizando-se o modelo proposto.

Na Figura 6.40 mostra-se curvas referentes ao algoritmo de fluxo de potência continuado [43], comparando-se os modelos usual e proposto de transformador com *tap* variável. Observa-se maior diferença entre os modelos nas proximidades do ponto de máximo carregamento e na região anormal de operação.

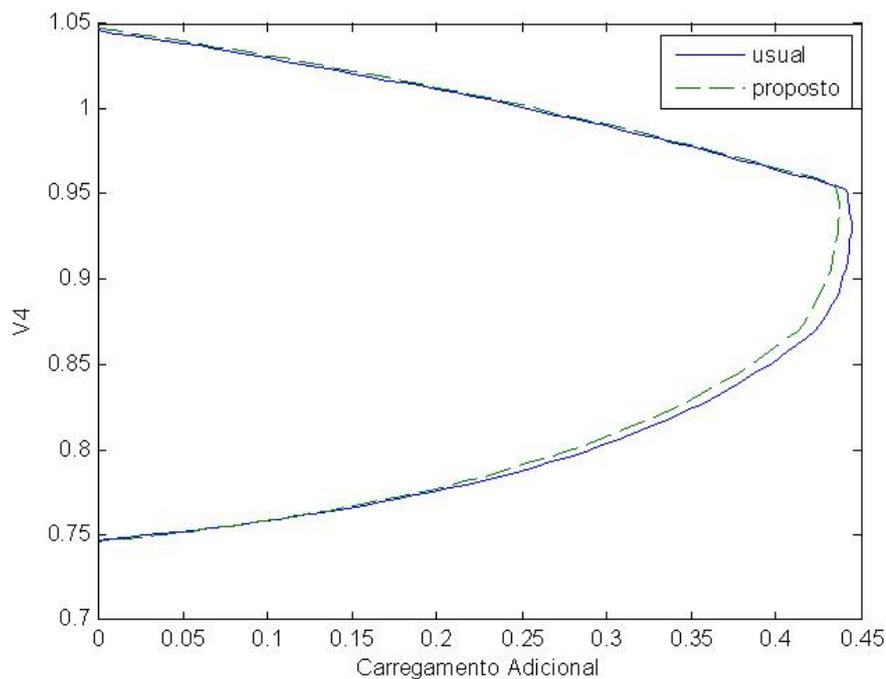


Figura 6.40: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 4 / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

Nas Figuras 6.41 e 6.42, apresenta-se o número de iterações para ser obtido cada ponto das curvas do fluxo de potência continuado apresentado na Figura 6.40, através dos modelos usual e proposto, respectivamente. Verifica-se que o número de iterações necessárias para se obter cada ponto das curvas apresentadas na Figura 6.40 é praticamente o mesmo utilizando cada modelo de transformador, havendo diferenças em poucos pontos.

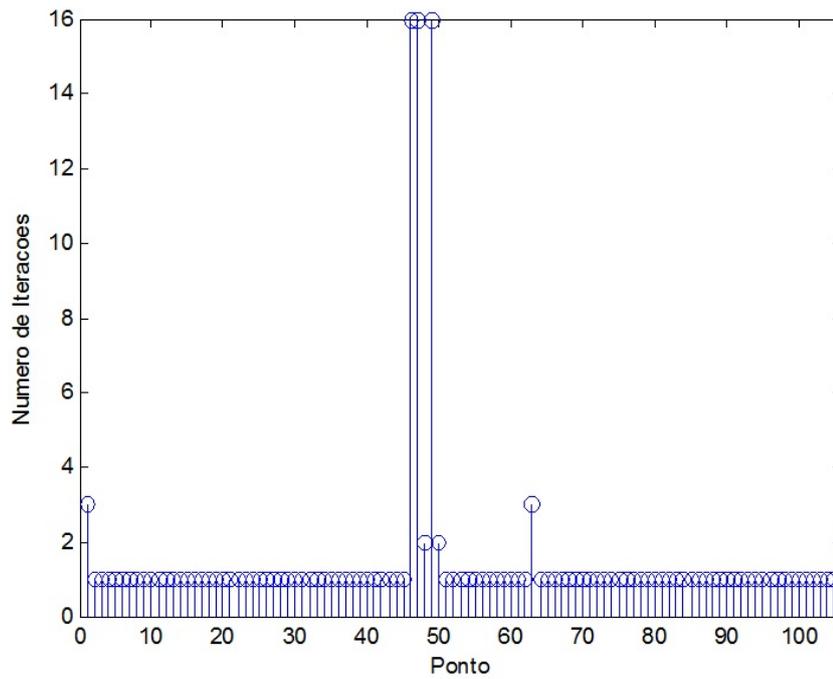


Figura 6.41: Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Contínuo / Modelo Usual / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

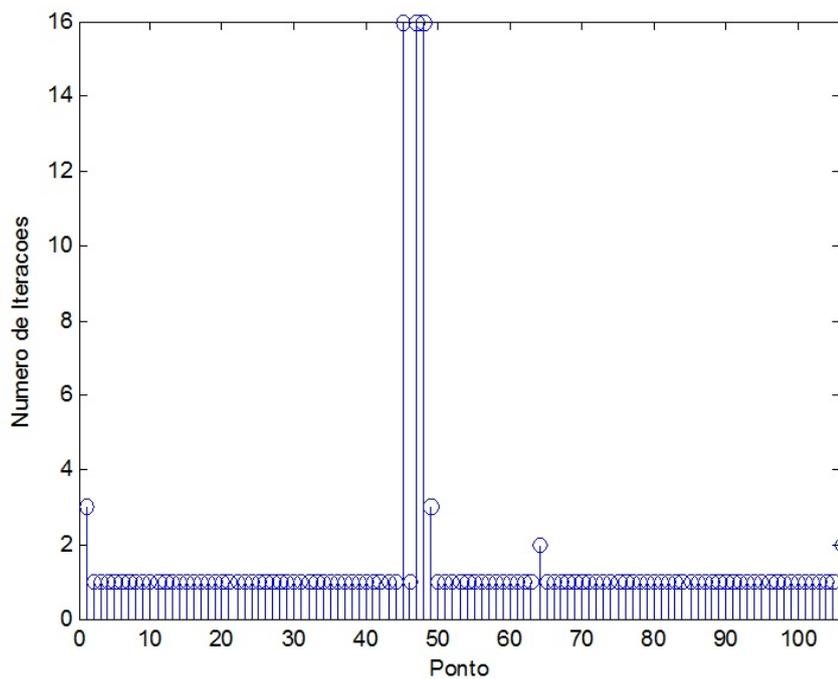


Figura 6.42: Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Contínuo / Modelo Proposto / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

Nas Tabelas 6.9 e 6.10 é apresentado o relatório obtido do algoritmo para solução de fluxo de potência [43], utilizando o modelo usual de transformadores com *tap* variável.

Tabela 6.9: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	PG (MW)	QG (MVar)	PD (MW)	QD (MVar)
001	VTETA	1.01000	0.00000	913.254	-249.517	0.00000	0.00000
002	PV	1.02000	10.4674	1000.00	45.00280	0.00000	0.00000
003	PQ	1.01894	4.64871	1000.00	-400.000	0.00000	0.00000
004	PQ	0.96183	-19.801	0.00000	0.00000	680.000	130.000
005	PQ	1.06762	-5.5741	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
006	PQ	0.98282	2.60381	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
007	PQ	0.89689	-0.7995	0.00000	0.00000	150.000	32.0000
008	PQ	0.94382	4.07133	0.00000	0.00000	90.0000	17.0000
009	PQ	1.06516	-0.9030	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
010	PQ	1.05433	-17.768	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
011	PQ	1.08713	3.90123	-0.0000	-0.00000	0.00000	0.00000
012	PQ	1.09184	4.84344	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
013	PQ	1.02421	7.70395	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
014	PQ	1.02962	-6.8714	400.000	-475.000	0.00000	0.00000
015	PV	1.02000	-2.3730	400.000	-178.357	0.00000	0.00000
016	PQ	0.99721	15.8191	700.000	220.0000	0.00000	0.00000
017	PV	1.02000	7.49344	800.000	125.2008	0.00000	0.00000
018	PQ	1.06914	-5.8689	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
019	PQ	0.97742	-5.4137	0.00000	-0.00000	235.000	57.0000
020	PQ	1.08665	-21.035	-0.0000	-0.00000	0.00000	0.00000
021	PQ	1.00776	-22.854	0.00000	0.00000	940.000	50.0000
022	PQ	1.11216	-12.450	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
023	PQ	1.05580	-18.288	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
024	PQ	0.94196	-20.673	0.00000	0.00000	790.000	330.000
025	PQ	1.11274	-18.935	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
026	PQ	1.03113	-20.919	0.00000	0.00000	700.000	49.0000
027	PQ	1.09474	-21.063	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
028	PQ	1.10176	-10.010	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
029	PQ	1.10418	-10.809	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
030	PQ	1.03289	8.74083	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
031	PQ	1.08813	0.72844	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
032	PQ	0.99184	-23.160	0.00000	0.00000	1100.00	400.000
033	PQ	0.97955	2.21733	0.00000	-0.00000	400.000	125.000

Tabela 6.10: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha /
Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual

DE	PARA	I (A)	F_ativo (MW)	F_reativo (MVar)	tap (p.u.)	Defasamento (graus)
004	010	83.96163	-342.8706	-65.1659	0.920	0.000
010	004	77.24470	343.22723	77.93721	0.920	0.000
004	010	82.59003	-337.1293	-64.8340	0.920	0.000
010	004	75.98282	337.45287	77.39741	0.920	0.000
005	001	284.24386	-913.2542	347.9240	1.024	0.000
001	005	291.06572	913.25421	-249.517	1.024	0.000
005	018	121.87199	460.15182	-175.502	1.000	0.000
018	005	123.17564	-459.9416	160.7538	1.000	0.000
005	018	119.95698	453.10240	-172.422	1.000	0.000
018	005	121.25882	-452.8987	157.3773	1.000	0.000
006	007	18.30896	72.96984	20.16215	1.080	0.000
007	006	19.77367	-72.96984	-15.5669	1.080	0.000
006	007	19.32774	77.03016	21.28406	1.080	0.000
007	006	20.87396	-77.03016	-16.4331	1.080	0.000
006	013	57.78866	-133.0264	-37.08159	1.000	0.000
013	006	59.82519	135.20899	37.87120	1.000	0.000
006	030	63.59815	-146.3920	-39.8724	1.000	0.000
030	006	65.80294	149.23807	43.77523	1.000	0.000
006	033	29.58969	62.99867	16.05997	1.000	0.000
033	006	29.22868	-62.9017	-17.3704	1.000	0.000
006	033	31.49140	66.41987	19.44786	1.000	0.000
033	006	31.16331	-66.3348	-20.9100	1.000	0.000
009	003	440.1488	-1000.00	517.3136	1.000	0.000
003	009	440.1488	1000.000	-400.000	1.000	0.000
009	018	71.51920	1497.884	-164.306	1.000	0.000
018	009	77.17467	-1487.53	202.7835	1.000	0.000
009	031	328.0876	-497.884	-353.007	1.000	0.000
031	009	335.5457	499.5655	274.5221	1.000	0.000
011	012	74.67686	-270.763	-95.5793	1.000	0.000
012	011	79.63046	271.0839	7.60316	1.000	0.000
012	002	3.77062	-1000.00	53.23497	1.070	0.000
002	012	4.03456	1000.000	45.00280	1.070	0.000
013	008	19.65957	90.00000	22.98945	1.070	0.000
008	013	21.03574	-90.0000	-17.0000	1.070	0.000
013	030	96.05466	-225.208	-60.8606	1.000	0.000
030	013	96.33363	225.9857	63.74307	1.000	0.000
018	010	181.1534	918.2014	-93.6182	1.000	0.000
010	018	170.4094	-903.323	-69.2245	1.000	0.000
018	022	239.3941	646.6296	-380.431	1.000	0.000
022	018	260.3605	-639.904	167.7512	1.000	0.000

018	023	190.0087	908.71729	-108.607	1.000	0.000
023	018	180.7766	-894.1465	-75.1758	1.000	0.000
019	018	60.53864	73.19586	-60.7744	0.920	0.000
018	019	55.69555	-73.17100	61.74234	0.920	0.000
019	030	34.62060	-153.9997	1.87028	1.000	0.000
030	019	39.71723	161.62878	10.13577	1.000	0.000
019	030	34.65835	-154.1960	1.90418	1.000	0.000
030	019	39.74940	161.83449	10.18654	1.000	0.000
020	022	207.2146	-616.8517	-207.348	1.000	0.000
022	020	225.3077	625.08887	-134.140	1.000	0.000
020	023	226.6002	-323.7113	127.3091	1.000	0.000
023	020	210.6076	325.47324	-329.904	1.000	0.000
021	020	28.33641	-325.4522	-14.6326	0.930	0.000
020	021	26.35286	325.73247	25.02707	0.930	0.000
021	020	28.01924	-321.8175	-14.2893	0.930	0.000
020	021	26.05789	322.10030	24.56718	0.930	0.000
021	020	25.52757	-292.7302	-21.0780	0.930	0.000
020	021	23.74064	292.73023	30.44545	0.930	0.000
022	025	159.5490	594.28992	-194.210	1.000	0.000
025	022	160.0299	-588.9262	-94.2035	1.000	0.000
023	010	43.97082	-222.4041	35.24893	1.000	0.000
010	023	39.41355	222.64317	-86.1100	1.000	0.000
024	023	195.3173	-395.5803	-165.027	0.910	0.000
023	024	177.7387	396.12906	184.9682	0.910	0.000
024	023	194.8197	-394.4196	-164.972	0.910	0.000
023	024	177.2859	394.94844	184.8634	0.910	0.000
025	027	210.2308	508.76631	117.6515	1.000	0.000
027	025	200.5133	-507.0267	-232.5634	1.000	0.000
026	025	35.49974	-353.1533	-24.6689	0.930	0.000
025	026	33.01476	353.35723	37.01478	0.930	0.000
026	025	34.86650	-346.8466	-24.3310	0.930	0.000
025	026	32.42584	347.04335	36.45676	0.930	0.000
027	028	269.5197	-594.3572	-214.197	1.000	0.000
028	027	273.8988	602.82639	-265.602	1.000	0.000
028	014	468.9513	-399.5514	530.9565	1.000	0.000
014	028	468.9513	400.00000	-475.000	1.000	0.000
028	025	196.8783	625.54541	-240.222	1.000	0.000
025	028	202.6391	-620.2406	-96.9195	1.000	0.000
028	029	65.23555	181.11773	-110.206	1.000	0.000
029	028	69.18257	-180.9098	-23.74355	1.000	0.000
028	031	163.4110	-1009.938	85.07515	1.000	0.000
031	028	152.6615	1025.2480	-209.835	1.000	0.000
029	015	203.7844	-400.0000	254.5180	1.000	0.000
015	029	203.7844	400.00000	-178.357	1.000	0.000

029	022	137.3973	580.90981	-230.774	1.000	0.000
022	029	143.5405	-579.4741	160.59990	1.000	0.000
030	016	175.1171	-698.6870	-127.8406	1.070	0.000
016	030	187.3753	700.00000	220.0000	1.070	0.000
031	012	72.90437	-725.5276	-34.96367	1.000	0.000
012	031	76.82557	728.91609	-60.83812	1.000	0.000
031	017	76.21011	-799.2859	-29.72329	1.080	0.000
017	031	82.30692	800.00000	125.2008	1.080	0.000
032	027	148.4154	-357.3780	-131.9757	0.920	0.000
027	032	136.5422	357.75262	147.1976	0.920	0.000
032	027	158.9341	-384.0527	-137.6288	0.920	0.000
027	032	146.2194	384.61124	153.9250	0.920	0.000
032	027	148.6393	-358.5692	-130.3954	0.920	0.000
027	032	136.7482	359.02013	145.6382	0.920	0.000
033	011	92.59239	-270.7634	-86.7195	0.910	0.000
011	033	84.25908	270.76340	95.57938	0.910	0.000

Nas Tabelas 6.11 e 6.12 apresenta-se os resultados obtidos utilizando-se o modelo proposto.

Tabela 6.11: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	PG (MW)	QG (MVar)	PD (MW)	QD (MVar)
001	VTETA	1.01000	0.00000	914.059	-237.278	0.00000	0.00000
002	PV	1.02000	10.2672	1000.00	44.40197	0.00000	0.00000
003	PQ	1.01706	4.80253	1000.00	-400.000	0.00000	0.00000
004	PQ	0.95709	-19.962	0.00000	0.00000	680.000	130.000
005	PQ	1.06539	-5.4608	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
006	PQ	0.98213	2.60856	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
007	PQ	0.89730	-0.5525	0.00000	0.00000	150.000	32.0000
008	PQ	0.94506	4.34794	0.00000	0.00000	90.0000	17.0000
009	PQ	1.06338	-0.7688	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
010	PQ	1.05010	-17.726	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
011	PQ	1.08699	4.06303	-0.0000	-0.00000	0.00000	0.00000
012	PQ	1.09156	4.99883	-0.0000	-0.00000	0.00000	0.00000
013	PQ	1.02449	7.74500	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
014	PQ	1.02563	-6.7486	400.000	-475.000	0.00000	0.00000
015	PV	1.02000	-2.2546	400.000	-169.807	0.00000	0.00000
016	PQ	0.99602	15.4195	700.000	220.0000	0.00000	0.00000
017	PV	1.02000	7.15591	800.000	135.6568	0.00000	0.00000
018	PQ	1.06683	-5.7568	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
019	PQ	0.97517	-5.2716	0.00000	-0.00000	235.000	57.0000
020	PQ	1.08202	-21.017	-0.0000	-0.00000	0.00000	0.00000
021	PQ	1.00317	-22.996	0.00000	0.00000	940.000	50.0000
022	PQ	1.10845	-12.368	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
023	PQ	1.05146	-18.249	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
024	PQ	0.93581	-20.910	0.00000	0.00000	790.000	330.000
025	PQ	1.10770	-18.902	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
026	PQ	1.02607	-21.062	0.00000	0.00000	700.000	49.0000
027	PQ	1.08926	-21.051	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
028	PQ	1.09807	-9.9104	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
029	PQ	1.10076	-10.717	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
030	PQ	1.03326	8.78561	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
031	PQ	1.08704	0.86973	-0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
032	PQ	0.98522	-23.364	0.00000	0.00000	1100.00	400.000
033	PQ	0.97869	2.21657	0.00000	-0.00000	400.000	125.000

Tabela 6.12: Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha /
Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto

DE	PARA	I (A)	F_ativo (MW)	F_reativo (MVar)	tap (p.u.)	Defasamento (graus)
004	010	92.72699	-373.9817	-71.07893	0.920	0.000
010	004	85.30883	374.41023	86.42387	0.920	0.000
004	010	91.21220	-367.7195	-70.7169	0.920	0.000
010	004	83.91522	368.10825	85.81206	0.920	0.000
005	001	265.2818	-892.8872	325.2129	1.024	0.000
001	005	271.6486	892.88721	-231.782	1.024	0.000
005	018	115.0786	460.56237	-167.943	1.000	0.000
018	005	116.3791	-460.3531	153.2571	1.000	0.000
005	018	113.2716	453.49706	-164.980	1.000	0.000
018	005	114.5704	-453.2943	149.99945	1.000	0.000
006	007	16.84721	67.76486	18.41594	1.080	0.000
007	006	18.19499	-67.76486	-14.4565	1.080	0.000
006	007	17.78465	71.53556	19.44067	1.080	0.000
007	006	19.20743	-71.53556	-15.2609	1.080	0.000
006	013	59.14712	-134.0537	-38.14611	1.000	0.000
013	006	61.18377	136.27934	39.20737	1.000	0.000
006	030	64.95684	-147.4284	-40.9158	1.000	0.000
030	006	67.16180	150.32594	45.14708	1.000	0.000
006	033	31.13893	64.02267	17.39245	1.000	0.000
033	006	30.77819	-63.9215	-18.6794	1.000	0.000
006	033	33.14157	67.45948	20.90515	1.000	0.000
033	006	32.81373	-67.3708	-22.3420	1.000	0.000
009	003	441.13346	-1000.00	517.7488	1.000	0.000
003	009	441.13346	1000.000	-400.0000	1.000	0.000
009	018	65.17172	1499.461	-155.216	1.000	0.000
018	009	70.53328	-1489.06	194.6367	1.000	0.000
009	031	337.77978	-499.461	-362.532	1.000	0.000
031	009	345.23221	501.1857	284.8482	1.000	0.000
011	012	73.05958	-268.707	-93.58404	1.000	0.000
012	011	77.96512	269.0227	5.56386	1.000	0.000
012	002	1.37844	-936.719	44.60126	1.070	0.000
002	012	1.47493	936.7193	41.59218	1.070	0.000
013	008	18.21978	84.30474	21.16583	1.070	0.000
008	013	19.49516	-84.3047	-15.9242	1.070	0.000
013	030	97.12333	-226.279	-61.8030	1.000	0.000
030	013	97.40239	227.0641	64.73252	1.000	0.000
018	010	183.88071	918.4328	-84.4697	1.000	0.000
010	018	171.92907	-903.456	-74.9564	1.000	0.000
018	022	233.62045	646.6553	-371.896	1.000	0.000
022	018	254.33755	-639.953	160.5737	1.000	0.000

018	023	192.2603	908.86614	-99.3084	1.000	0.000
023	018	181.7453	-894.2012	-80.8380	1.000	0.000
019	018	61.81686	77.73123	-61.9622	0.920	0.000
018	019	56.87151	-77.70397	63.02382	0.920	0.000
019	030	36.14285	-153.0349	-0.11177	1.000	0.000
030	019	41.26495	160.58635	11.76622	1.000	0.000
019	030	36.18315	-153.2299	-0.08054	1.000	0.000
030	019	41.29950	160.79072	11.81909	1.000	0.000
020	022	207.5415	-616.9110	-208.206	1.000	0.000
022	020	226.1656	625.22001	-129.166	1.000	0.000
020	023	224.7817	-323.7015	125.5238	1.000	0.000
023	020	208.8749	325.46398	-326.231	1.000	0.000
021	020	31.17569	-350.8705	-15.77553	0.930	0.000
020	021	28.99339	351.19925	27.96777	0.930	0.000
021	020	30.82674	-346.9519	-15.4053	0.930	0.000
020	021	28.66887	347.28365	27.46090	0.930	0.000
021	020	28.08541	-315.5929	-22.7242	0.930	0.000
020	021	26.11943	315.59290	33.71191	0.930	0.000
022	025	159.4785	594.58838	-186.512	1.000	0.000
025	022	158.8672	-589.1859	-98.6255	1.000	0.000
023	010	41.74117	-222.4677	32.52413	1.000	0.000
010	023	37.33608	222.70721	-82.9513	1.000	0.000
024	023	218.11769	-436.6383	-182.155	0.910	0.000
023	024	198.48709	437.31569	206.7713	0.910	0.000
024	023	217.56195	-435.3571	-182.0955	0.910	0.000
023	024	197.98138	436.00994	206.6491	0.910	0.000
025	027	214.68930	508.97543	122.6561	1.000	0.000
027	025	204.99346	-507.2088	-235.930	1.000	0.000
026	025	39.02837	-380.7351	-26.59561	0.930	0.000
025	026	36.29638	380.97448	41.08707	0.930	0.000
026	025	38.33219	-373.9359	-26.2313	0.930	0.000
025	026	35.64893	374.16678	40.46440	0.930	0.000
027	028	268.18470	-594.3211	-215.761	1.000	0.000
028	027	273.66833	602.85762	-258.156	1.000	0.000
028	014	470.85452	-399.5479	531.39281	1.000	0.000
014	028	470.85452	400.00000	-475.000	1.000	0.000
028	025	195.70519	625.56322	-233.431	1.000	0.000
025	028	200.77936	-620.2256	-99.67425	1.000	0.000
028	029	66.07328	181.50493	-112.917	1.000	0.000
029	028	70.38493	-181.2930	-20.10243	1.000	0.000
028	031	157.88210	-1010.377	73.11201	1.000	0.000
031	028	148.94141	1025.7146	-196.138	1.000	0.000
029	015	195.49258	-400.0000	244.78541	1.000	0.000
015	029	195.49258	400.00000	-169.8070	1.000	0.000

029	022	132.7503	581.29309	-224.6829	1.000	0.000
022	029	138.8570	-579.8550	155.1052	1.000	0.000
030	016	166.6165	-654.5487	-125.019	1.070	0.000
016	030	178.2796	655.70355	206.0782	1.070	0.000
031	012	75.72067	-727.5662	-42.08875	1.000	0.000
012	031	80.31005	730.97730	-53.1781	1.000	0.000
031	017	82.41585	-742.3171	-43.2954	1.080	0.000
017	031	89.00912	742.93553	125.9803	1.080	0.000
032	027	163.7135	-389.8055	-143.950	0.920	0.000
027	032	150.6164	390.25720	162.3047	0.920	0.000
032	027	175.3164	-418.9006	-150.1169	0.920	0.000
027	032	161.2911	419.57404	169.7660	0.920	0.000
032	027	163.9605	-391.1048	-142.227	0.920	0.000
027	032	150.8437	391.64848	160.6062	0.920	0.000
033	011	99.59710	-296.5972	-92.69486	0.910	0.000
011	033	90.63336	296.59727	103.2973	0.910	0.000

Os valores dos *taps* dos transformadores destacados na Figura 6.43 são diferentes do nominal. Comparando-se as Tabelas 6.9 e 6.11, observa-se diferenças em todas as grandezas apresentadas. Para os módulos das tensões, verifica-se diferenças na segunda casa decimal de algumas barras, como a 4. Com relação aos ângulos das tensões, cita-se, como exemplo, o ângulo da tensão da barra 2, que vale 10,46°, utilizando-se o modelo usual, e 10,26°, utilizando-se o modelo proposto. Comparando-se as potências geradas, as maiores variações são observadas para potência reativa. Como exemplo, a potência ativa gerada pela barra 1 vale 913,25 W, utilizando-se o modelo usual, e 914,05 W, utilizando-se o modelo proposto. A potência reativa gerada pela mesma barra vale -249,51 MVar, utilizando-se o modelo usual, e -237,27 MVar, utilizando-se o modelo proposto.

Com relação às correntes e fluxos nas linhas de transmissão, diferenças também são observadas comparando-se a Tabela 6.10 com a 6.12. Como exemplo, a corrente da barra 9 para a barra 31 vale 328,08 A, utilizando-se o modelo usual, e 337,77 A, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência ativa da linha 2 para a linha 12, vale 1000 MW, utilizando-se o modelo usual, e 936,71 MW, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência reativa, pela mesma linha, vale 45 MVar, utilizando-se o modelo usual, e 41,59 MVar, utilizando-se o modelo proposto.

Na Figura 6.44 mostra-se as curvas referentes ao algoritmo de fluxo de potência continuado [43], apresentando comparação entre os modelos usual e proposto de transformador com *tap* variável. Observa-se diferença entre os modelos em todas as partes das curvas, principalmente na região normal de operação.

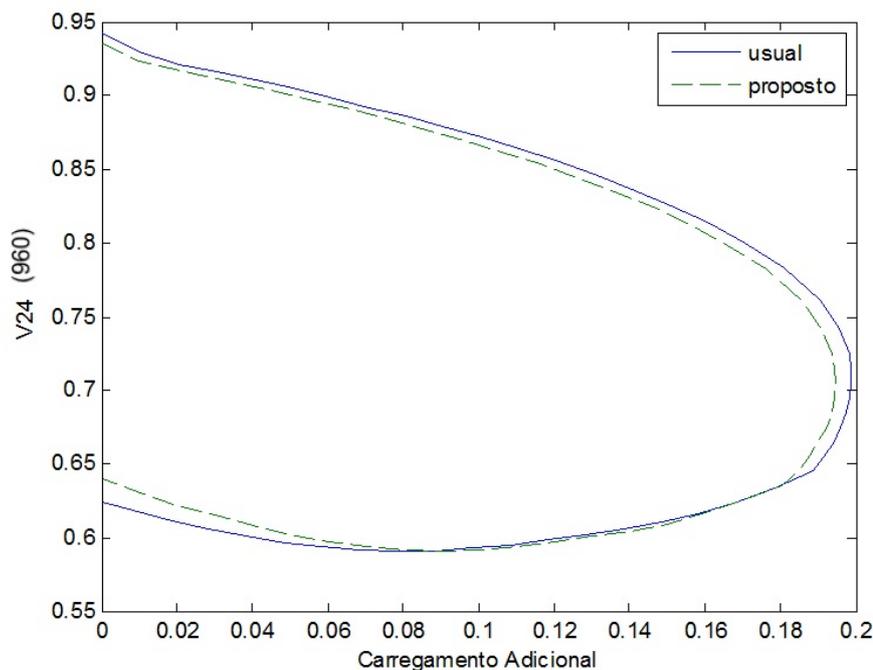


Figura 6.44: Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 960 / Sistema Teste Brasileiro de 33 Barras

Nas Figuras 6.45 e 6.46, apresenta-se o número de iterações para ser obtido cada ponto das curvas do fluxo de potência continuado apresentado na Figura 6.44, através dos modelos usual e proposto, respectivamente. Verifica-se que o número de iterações necessárias para se obter cada ponto das curvas é praticamente o mesmo utilizando cada modelo de transformador, havendo diferenças em poucos pontos.

No que se refere especificamente ao tempo computacional, para obtenção das curvas do fluxo de potência continuado, as diferenças entre os dois modelos é desprezível, para os sistemas de 16 e de 33 barras. Destaca-se que, em cada iteração utilizando o modelo proposto, deve ser computado o fator adicional $\frac{a^2 + 1}{2}$, utilizado no cálculo de cada impedância, não existente no modelo

usual, conforme pode ser observado comparando-se a Figura 3.9 com a 4.8. Alternativamente, pode ser inserida barra fictícia para representar o modelo proposto, como detalhado na Seção 6.2.4.3.1. O cálculo do fator adicional ou a inserção da barra fictícia, todavia, nem sempre é predominante na performance computacional, uma vez que o número de pontos para se obter a curva referente ao fluxo de potência continuado é, na maioria das situações, menor para o modelo proposto (carregamento inferior) comparado ao usual. Outro ponto de destaque na avaliação do desempenho computacional é o próprio número de iterações para se obter cada ponto das curvas apresentadas nas Figuras 6.40 e 6.44.

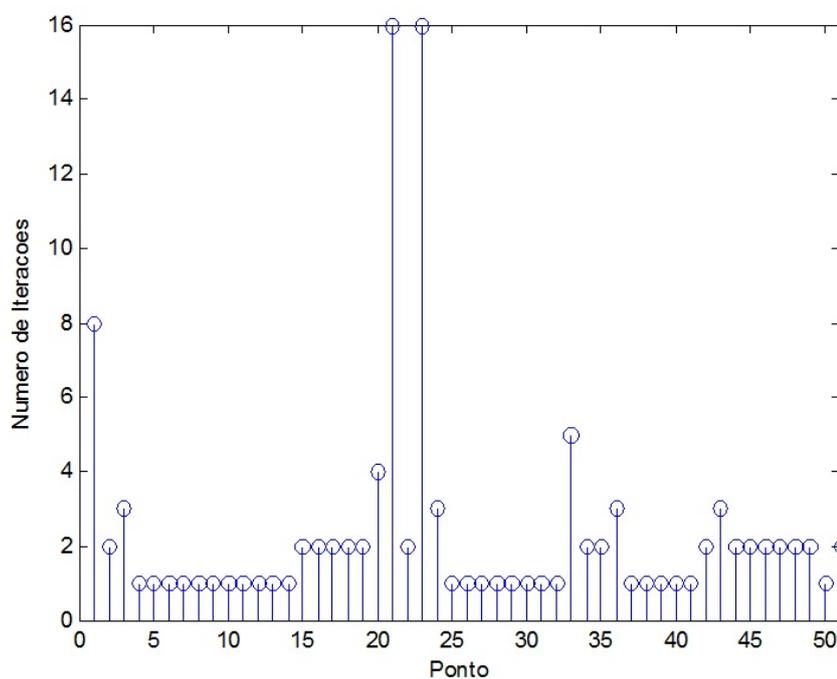


Figura 6.45: Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Continuado / Modelo Usual / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

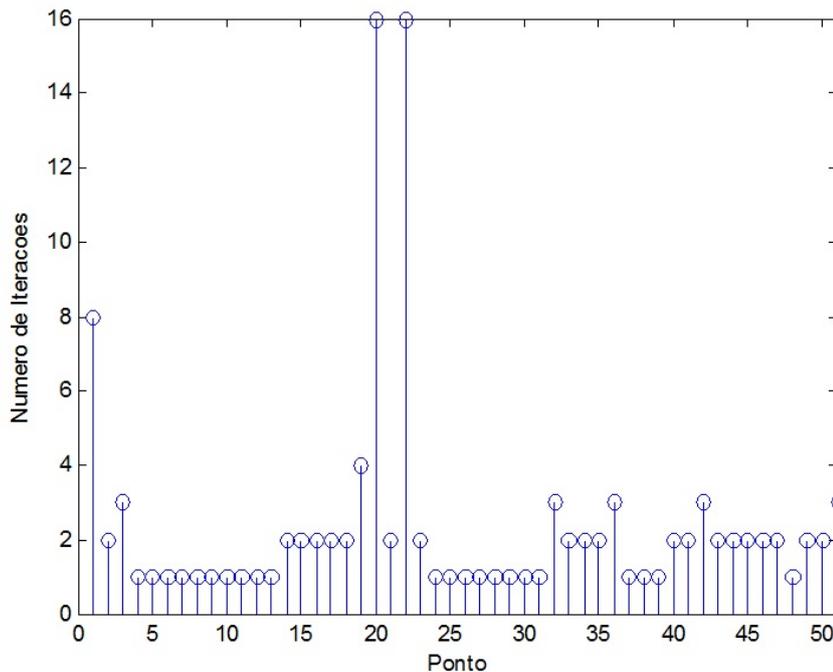


Figura 6.46: Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Contínuo / Modelo Proposto / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

6.2.4.3

Controle de Tensão por Meio de Transformador com Tap Variável

6.2.4.3.1

Representação do Modelo Proposto

As simulações de controle de tensão nos sistemas de 16 e de 33 barras foram efetuadas utilizando-se o programa ANAREDE. Para representar o modelo proposto seria necessário alterar a forma como é montada a matriz admitância nodal e como são calculadas as derivadas das potências em relação ao *tap*, como detalhado nas Seções 4.3 e 5.2.2, respectivamente. Assim, seriam necessárias alterações no código do programa. Alternativamente, podem ser inseridas barras adicionais nos sistemas-teste, conforme detalhado a seguir.

Considerando-se um transformador com *tap* variável situado entre duas barras quaisquer k e m , tem-se a representação do transformador conforme Figura 3.4, que é utilizada mundialmente pelos programas de fluxo de carga, como o ANAREDE. O modelo proposto pode ser representado inserindo-se barra virtual v entre a barra k e o transformador ideal, com impedância da linha entre essas barras

valendo $\frac{\dot{Z}}{2}$, sendo esse também o novo valor da impedância entre o transformador ideal e a barra m . Assim, o transformador ficará representado conforme Figura 4.3. Obviamente, o fluxo de potência da barra k para a barra m é igual ao fluxo de potência da barra k para a barra v , no modelo proposto. Essa informação é importante na comparação entre os fluxos de potência fornecidos em simulações utilizando-se os diferentes modelos de representação do transformador.

A seguir serão apresentadas as diferenças obtidas quando se compara o modelo usual com o modelo proposto em simulações nas quais foi utilizado o programa ANAREDE. No Apêndice VI apresenta-se resultados de simulações obtidos através dos programas ORGANON e PSAT, que também utilizam o modelo usual para representar transformador com *tap* variável.

6.2.4.3.2

Controle de Tensão no Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

No sistema de 16 barras apresentado na Figura 6.39, considera-se que os transformadores localizados entre as barras 3 e 14, 4 e 15, e 10 e 8, controlam as tensões das barras 14, 15 e 8 respectivamente, em 1,03 p.u.. Como detalhado na seção anterior, para efetuar simulação utilizando-se o modelo proposto, são inseridas três barras fictícias (barras 17, 18 e 19), conforme apresentado na Figura 6.47, como forma alternativa a se alterar o código fonte do programa.

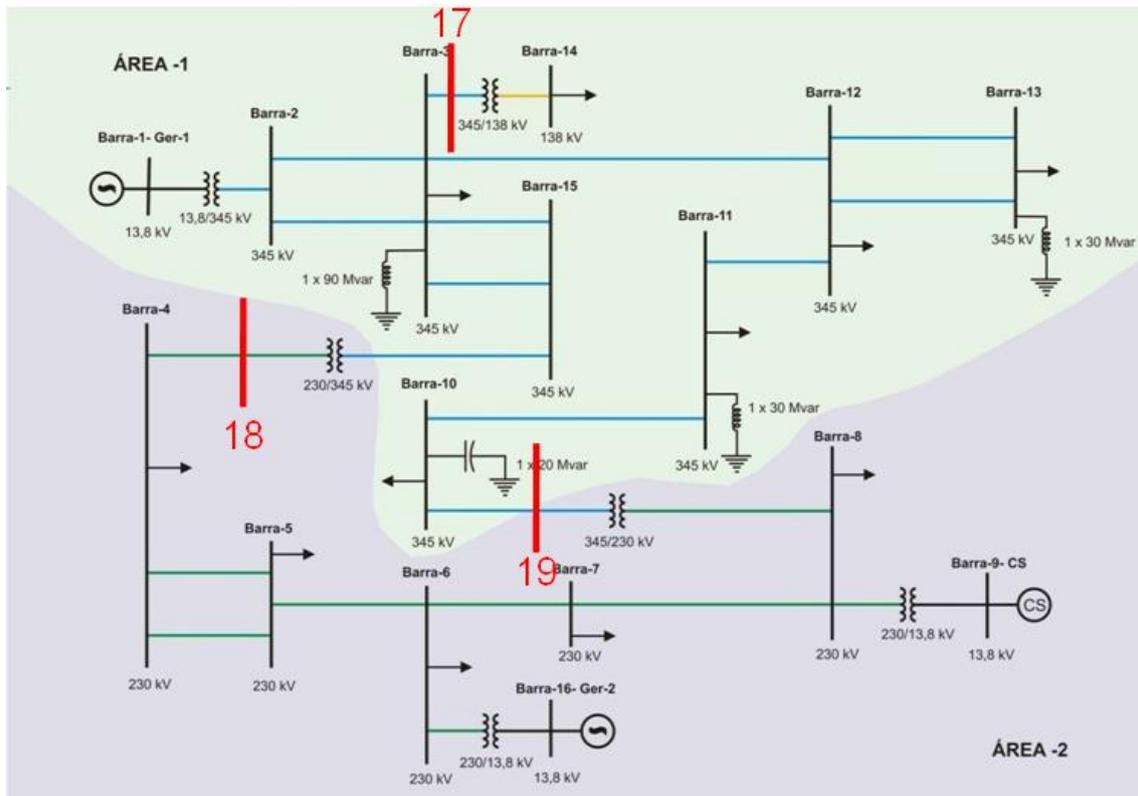


Figura 6.47: Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras com Barras Fictícias

Na Tabela 6.13 apresenta-se o relatório fornecido pelo programa ANAREDE com os resultados referentes ao modelo usual.

14	138	0	1.030	>	57.0Mw	39.0Mvar				
BARRA-14			-8.2							
40.6% MVA/Vd			165		3 BARRA-3	1	-57.0	-39.0		
.....										
15	345	0	1.014							
BARRA-15			-6.6							
9.3% MVA/Vd			200		3 BARRA-3	1	-16.6	8.7		
9.3% MVA/Vd			200		3 BARRA-3	2	-16.6	8.7		
12.3% MVA/Vd			300		4 BARRA-4	1	33.3	-17.4		002
.....										
AREA - 2										
4	230	0	0.923	>	106.0Mw	70.0Mvar				
BARRA-4			-7.9							
31.0% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	1	-36.3	-44.1		
31.0% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	2	-36.3	-44.1		
13.7% MVA/Vd			300		15 BARRA-15	1	-33.3	18.3	0.900I	001
.....										
5	230	0	0.952	>	31.0Mw	20.0Mvar				
BARRA-5			-6.3							
22.5% MVA/Vd			200		4 BARRA-4	1	36.5	22.5		
22.5% MVA/Vd			200		4 BARRA-4	2	36.5	22.5		
64.4% MVA/Vd			200		6 BARRA-6	1	-104.1	-65.0		
.....										
6	230	0	0.991	>	17.0Mw	12.0Mvar				
BARRA-6			-3.0							
59.7% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	1	104.8	54.7		
48.1% MVA/Vd			200		7 BARRA-7	1	88.1	-36.3		
47.6% MVA/Vd			450		16 GERADOR-2	1	-209.9	-30.5	1.000F	
.....										
7	230	0	1.003	>	15.0Mw	14.0Mvar				
BARRA-7			-6.4							
44.6% MVA/Vd			200		6 BARRA-6	1	-87.6	18.5		
39.7% MVA/Vd			200		8 BARRA-8	1	72.6	-32.5		
.....										
8	230	0	1.012	>	39.0Mw	24.0Mvar				
BARRA-8			-8.5							
36.7% MVA/Vd			200		7 BARRA-7	1	-72.3	16.8		
9.7% MVA/Vd			100		9 C. SINCRONO	1	0.0	9.9	1.000F	
23.0% MVA/Vd			260		10 BARRA-10	1	33.3	-50.6		001
.....										
9	14	1	1.000						>	-9.7Mvar
C. SINCRONO			-8.5							
9.7% MVA/Vd			100		8 BARRA-8	1	0.0	-9.7		
.....										
16	14	2	1.000						>	209.9Mw 41.9Mvar
GERADOR-2			0.0							
47.6% MVA/Vd			450		6 BARRA-6	1	209.9	41.9		

©CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - ANAREDE V09.06.02

Verifica-se que somente a tensão da barra 14 foi controlada em 1,03 p.u., com *tap* do transformador situado entre as barras 3 e 14 valendo 0,937 p.u. As tensões das barras 15 e 8 não foram controladas ($V_{15} = 1,014 p.u.$ e $V_8 = 1,012 p.u.$), uma vez que os *taps* dos transformadores situados entre as barras 4 e 15, e 10 e 8 atingiram o valor mínimo de 0.9 p.u..

Na Tabela 6.14 apresenta-se o relatório com o resultado da simulação utilizando-se o modelo proposto de transformador com *tap* variável.

14	138	0	1.030	>	57.0Mw	39.0Mvar			
BARRA-14			-8.0						
40.6% MVA/Vd			165		17 VIRTUAL1	1	-57.0	-38.9	
.....									
15	345	0	1.011						
BARRA-15			-6.3						
9.8% MVA/Vd			200		3 BARRA-3	1	-17.5	9.2	
9.8% MVA/Vd			200		3 BARRA-3	2	-17.5	9.2	
13.0% MVA/Vd			300		18 VIRTUAL2	1	34.9	-18.4	002
.....									
17	1	0	0.974						
VIRTUAL1			-6.8						
7.2% MVA/Vd			999		3 BARRA-3	1	-57.0	-41.0	
43.6% MVA/Vd			165		14 BARRA-14	1	57.0	40.8	0.931*
.....									
AREA - 2									
4	230	0	0.922	>	106.0Mw	70.0Mvar			
BARRA-4			-7.8						
31.0% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	1	-35.5	-44.8	
31.0% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	2	-35.5	-44.8	
4.3% MVA/Vd			999		18 VIRTUAL2	1	-35.0	19.6	
.....									
5	230	0	0.952	>	31.0Mw	20.0Mvar			
BARRA-5			-6.2						
22.3% MVA/Vd			200		4 BARRA-4	1	35.7	23.2	
22.3% MVA/Vd			200		4 BARRA-4	2	35.7	23.2	
64.1% MVA/Vd			200		6 BARRA-6	1	-102.4	-66.3	
.....									
6	230	0	0.991	>	17.0Mw	12.0Mvar			
BARRA-6			-3.0						
59.2% MVA/Vd			200		5 BARRA-5	1	103.2	55.9	
49.5% MVA/Vd			200		7 BARRA-7	1	90.1	-38.9	
47.6% MVA/Vd			450		16 GERADOR-2	1	-210.2	-29.0	1.000F
.....									
7	230	0	1.005	>	15.0Mw	14.0Mvar			
BARRA-7			-6.4						
45.8% MVA/Vd			200		6 BARRA-6	1	-89.5	21.4	
41.0% MVA/Vd			200		8 BARRA-8	1	74.5	-35.4	
.....									
8	230	0	1.016	>	39.0Mw	24.0Mvar			
BARRA-8			-8.6						
37.8% MVA/Vd			200		7 BARRA-7	1	-74.2	19.8	
12.4% MVA/Vd			100		9 C. SINCRONO	1	0.0	12.6	1.000F
25.2% MVA/Vd			260		19 VIRTUAL3	1	35.1	-56.4	
.....									
9	14	1	1.000	>					-12.4Mvar
C. SINCRONO			-8.6						
12.4% MVA/Vd			100		8 BARRA-8	1	0.0	-12.4	
.....									
16	14	2	1.000	>				210.2Mw	40.5Mvar
GERADOR-2			0.0						
47.6% MVA/Vd			450		6 BARRA-6	1	210.2	40.5	
.....									
18	1	0	0.915						
VIRTUAL2			-7.0						
4.3% MVA/Vd			999		4 BARRA-4	1	35.0	-18.9	
14.5% MVA/Vd			300		15 BARRA-15	1	-34.9	18.9	0.900I
.....									
19	1	0	0.914						
VIRTUAL3			-8.6						
28.0% MVA/Vd			260		8 BARRA-8	1	-35.1	56.4	0.900I
7.3% MVA/Vd			999		10 BARRA-10	1	35.2	-56.4	001

Assim como no modelo usual, somente a tensão da barra 14 foi controlada em 1,03 p.u., com *tap* do transformador situado entre as barras 3 e 14 valendo 0,931 p.u. As tensões das barras 15 e 8 não foram controladas ($V_{15} = 1,011 p.u.$ e $V_8 = 1,016 p.u.$), uma vez que os *taps* dos transformadores situados entre as barras 4 e 15, e 10 e 8 atingiram valor mínimo de 0.9 p.u..

Comparando-se as Tabelas 6.13 e 6.14, observa-se diferenças em todas as grandezas apresentadas. Verifica-se, como exemplo, que o módulo da tensão da barra 11, tem valor de 0,971 p.u., utilizando-se o modelo usual, e 0,962, utilizando-se o modelo proposto. Com relação ao ângulo das tensões, ainda para a barra 11, tem-se o valor de $-10,1^\circ$, utilizando-se o modelo usual, e $-9,7^\circ$, utilizando-se o modelo proposto.

Com relação aos fluxos nas linhas de transmissão, diferenças também são observadas. Como exemplo, o fluxo de potência ativa da barra 11 para a barra 10, vale 8,7 MW, utilizando-se o modelo usual, e 6,9 MW, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência reativa, nessa mesma linha, vale 7,4 MVar, utilizando-se o modelo usual, e 14,1 MVar, utilizando-se o modelo proposto.

6.2.4.3.3

Controle de Tensão no Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

Na Tabela 6.15, apresenta-se informações referentes aos transformadores do sistema-teste brasileiro de 33 barras, apresentado na Figura 6.43. Nota-se que, para efetuar simulação utilizando-se o modelo proposto de transformador com *tap* variável, é necessário que sejam inseridas 21 barras adicionais para modelar os transformadores com *taps* variáveis, sejam aqueles que controlam ou não tensões de barras, devido a apresentarem valor do *tap* diferente do nominal. Nas simulações, cujos resultados serão apresentados a seguir, as barras controladas, destacadas na Tabela 6.15, terão tensões controladas em 1 p.u..

Tabela 6.15: Informações sobre os Transformadores do Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

Barras entre as quais o transformador está localizado	Número de transformadores	Barra controlada	Barras virtuais
824 e 800	1	-	2501
814 e 895	2	814	2502 e 2503
960 e 959	2	960	2504 e 2505
939 e 938	3	939	2506, 2507 e 2508
915 e 1030	3(*)	-	-
965 e 964	2	965	2509 e 2510
1210 e 976	3	1210	2511, 2512 e 2513
904 e 995	5(*)	-	-
810 e 856	4(*)	-	-
1060 e 925	4(**)	-	2514
897 e 808	1	-	2515
2458 e 896	1	2458	2516
839 e 840	2	840	2517 e 2518
898 e 848	1	848	2519
1047 e 919	1	-	2520
934 e 933	1	934	2521

(*) Transformador com *tap* nominal.

(**) Único transformador é apresentado no arquivo de dados. Este refere-se a uma "associação" dos quatro apresentados em [46] e [47].

Na Tabela 6.16 apresenta-se o relatório da simulação utilizando-se o programa ANAREDE, com resultados referentes ao modelo usual de transformador com *tap* variável.

964	500	0	1.024						
CAXIAS---500									
34.8%	MVA/vd	1688		955	CNOVOS---500	1	-591.4	-108.4	
51.7%	MVA/vd	672		965	CAXIAS---230	1	353.4	39.3	
50.7%	MVA/vd	672		965	CAXIAS---230	2	347.1	38.7	
30.8%	MVA/vd	1688		976	GRAVATAI-500	1	510.3	153.3	
28.3%	MVA/vd	2182		995	ITA-----500	1	-619.3	-122.9	
.....									
965	230	0	1.000	>	700.0Mw	49.0Mvar			
CAXIAS---230									
52.7%	MVA/vd	672		964	CAXIAS---500	1	-353.2	-24.7	0.981*
51.7%	MVA/vd	672		964	CAXIAS---500	2	-346.8	-24.3	0.981*
.....									
976	500	0	1.002						
GRAVATAI-500									
33.3%	MVA/vd	1688		964	CAXIAS---500	1	-508.1	-241.8	
37.3%	MVA/vd	1688		995	ITA-----500	1	-593.5	-214.4	
57.6%	MVA/vd	672		1210	GRAVATAI-230	1	357.8	150.2	002
61.7%	MVA/vd	672		1210	GRAVATAI-230	2	384.7	157.2	002
57.7%	MVA/vd	672		1210	GRAVATAI-230	3	359.1	148.7	002
.....									
995	500	0	1.032						
ITA-----500									
27.5%	MVA/vd	1625		904	ITA-----3GR	1	-399.8	229.0	1.000F
28.5%	MVA/vd	2182		964	CAXIAS---500	1	625.4	-140.0	
35.9%	MVA/vd	1688		976	GRAVATAI-500	1	603.5	-161.0	
8.8%	MVA/vd	2182		1030	MACHADIN-500	1	177.4	-89.8	
46.8%	MVA/vd	2110		1060	SSANTIAG-500	1	-1006.6	161.8	002
.....									
1030	500	0	1.033						
MACHADIN-500									
32.1%	MVA/vd	1254		915	MACHADIN-1GR	1	-400.0	115.8	1.000F
25.9%	MVA/vd	2182		955	CNOVOS---500	1	577.2	-88.7	
7.9%	MVA/vd	2182		995	ITA-----500	1	-177.2	-27.1	
.....									
AREA - B									
808	14	1	1.000	>	1000.0Mw	78.4Mvar			
SCAXIAS--4GR									
74.6%	MVA/vd	1344		897	SCAXIAS--500	1	1000.0	78.4	
.....									
810	14	1	1.000	>	1000.0Mw	15.1Mvar			
SSEGREGO-4GR									
79.4%	MVA/vd	1260		856	SEGREGO--500	1	1000.0	15.1	
.....									
CASCAVEL-230									
50.5%	MVA/vd	150		840	CASCAVEL-138	1	73.0	19.3	0.986*
53.3%	MVA/vd	150		840	CASCAVEL-138	2	77.0	20.3	0.986*
69.0%	MVA/vd	189		898	FCHOPIIM--230	1	-128.4	20.2	
76.2%	MVA/vd	189		1047	SOSORIO--230	1	-142.3	18.9	
21.9%	MVA/vd	319		2458	CASCAVEL-230	1	57.7	-39.2	
20.9%	MVA/vd	356		2458	CASCAVEL-230	2	62.9	-39.6	
.....									
840	138	0	1.000	>	150.0Mw	32.0Mvar			
CASCAVEL-138									
49.7%	MVA/vd	150		839	CASCAVEL-230	1	-73.0	-15.6	
52.5%	MVA/vd	150		839	CASCAVEL-230	2	-77.0	-16.4	
.....									
848	138	0	1.000	>	90.0Mw	17.0Mvar			
FCHOPIIM--138									
61.1%	MVA/vd	150		898	FCHOPIIM--230	1	-90.0	-17.0	
.....									
856	500	0	1.004						
SEGREGO--500									
79.4%	MVA/vd	1260		810	SSEGREGO-4GR	1	-1000.0	89.9	1.000F
65.3%	MVA/vd	2273		933	AREIA----500	1	1489.3	-28.5	001
22.5%	MVA/vd	2182		1060	SSANTIAG-500	1	-489.3	-61.4	
.....									
896	500	0	0.982						
CASCAVELO500									
22.0%	MVA/vd	1637		897	SCAXIAS--500	1	-279.6	-217.5	
60.1%	MVA/vd	600		2458	CASCAVEL-230	1	279.6	217.5	
.....									
897	500	0	0.997						
SCAXIAS--500									
74.6%	MVA/vd	1344		808	SCAXIAS--4GR	1	-1000.0	24.2	1.000F
19.4%	MVA/vd	1637		896	CASCAVELO500	1	280.1	149.4	
31.3%	MVA/vd	2370		1060	SSANTIAG-500	1	719.9	-173.6	
.....									
898	230	0	0.997						
FCHOPIIM--230									
70.0%	MVA/vd	189		839	CASCAVEL-230	1	130.3	-20.7	
62.0%	MVA/vd	150		848	FCHOPIIM--138	1	90.0	22.3	0.985*
68.2%	MVA/vd	324		1047	SOSORIO--230	1	-220.3	-1.6	
.....									
919	14	1	1.000	>	700.0Mw	26.2Mvar			
SOSORIA4-4GR									
88.9%	MVA/vd	788		1047	SOSORIO--230	1	700.0	26.2	
.....									

Tabela 6.17: Relatório do ANAREDE para Solução do Fluxo de Potência /
Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09.06.02

DADOS-BARRA			CARGA			GERACAO		
DA BARRA	TENSAO	PARA	BARRA	Mw	Mvar	Mw	Mvar	Mvar
NUM.	MOD	NUM.	NUM.	FLUXO	FLUXO	FLUXO	FLUXO	FLUXO
NUM.	ANG	ANG	NOME	NC	MW	Mvar	Mvar	TAP
NOME	ANG	ANG	NOME	NC	MW	Mvar	Mvar	DEFAS
								TIE
AREA - A								
800	14	2	1.000				572.5Mw	68.4Mvar
GBMUNHOZ-3GR			0.0					
34.4% MVA/vd	1676	2501	VIRTUAL1	1	572.5	68.4		
.....								
814	230	0	1.000		680.0Mw	130.0Mvar		
BATEIAS--230			-20.3					
3.5% MVA/vd	9999	2502	VIRTUAL2	1	-342.8	-65.3		
3.4% MVA/vd	9999	2503	VIRTUAL3	1	-337.2	-64.7		
.....								
824	500	0	0.994					
GBMUNHOZ-500			-3.7					
5.8% MVA/vd	9999	2501	VIRTUAL1	1	-572.5	-31.1		
13.3% MVA/vd	2182	933	AREIA---500	1	288.5	15.6		
13.1% MVA/vd	2182	933	AREIA---500	2	283.9	15.5		
.....								
895	500	0	0.955					
BATEIAS--500			-17.9					
61.5% MVA/vd	600	2502	VIRTUAL2	1	343.2	80.1		
60.5% MVA/vd	600	2503	VIRTUAL3	1	337.5	79.3		
44.9% MVA/vd	2110	933	AREIA---500	1	-899.1	-105.1		
11.2% MVA/vd	2110	959	CURITIBA-500	1	218.3	-54.3		
.....								
904	14	1	1.000				400.0Mw	-168.6Mvar
ITA-----3GR			-4.5					
26.7% MVA/vd	1625	995	ITA-----500	1	400.0	-168.6		
.....								
915	14	1	1.000				400.0Mw	-36.5Mvar
MACHADIN-1GR			0.2					
32.0% MVA/vd	1254	1030	MACHADIN-500	1	400.0	-36.5		
.....								
933	500	0	0.994					
AREIA---500			-3.9					
13.4% MVA/vd	2182	824	GBMUNHOZ-500	1	-288.4	-29.6		
13.2% MVA/vd	2182	824	GBMUNHOZ-500	2	-283.9	-29.7		
75.5% MVA/vd	2273	856	SEGREDO--500	1	-1702.0	103.0		002
43.8% MVA/vd	2110	895	BATEIAS--500	1	916.8	34.1		
38.4% MVA/vd	672	2521	VIRTUAL21	1	-158.8	201.6		002
32.4% MVA/vd	2110	955	CNOVOS---500	1	610.3	-300.6		
41.8% MVA/vd	2182	959	CURITIBA-500	1	906.0	21.3		
.....								
938	500	0	0.985					
BLUMENAU-500			-21.6					
49.3% MVA/vd	672	2506	VIRTUAL6	1	325.4	27.0		
48.8% MVA/vd	672	2507	VIRTUAL7	1	321.8	26.5		
44.6% MVA/vd	672	2508	VIRTUAL8	1	293.5	32.3		
33.4% MVA/vd	2037	955	CNOVOS---500	1	-638.3	-205.4		
26.1% MVA/vd	1266	959	CURITIBA-500	1	-302.4	119.5		
.....								
939	230	0	1.000		940.0Mw	50.0Mvar		
BLUMENAU-230			-23.8					
3.3% MVA/vd	9999	2506	VIRTUAL6	1	-325.1	-14.6		
3.2% MVA/vd	9999	2507	VIRTUAL7	1	-321.4	-14.3		
2.9% MVA/vd	9999	2508	VIRTUAL8	1	-293.5	-21.1		
.....								
955	500	0	1.028					
CNOVOS---500			-11.1					
28.4% MVA/vd	2110	933	AREIA---500	1	-603.7	128.5		
31.0% MVA/vd	2037	938	BLUMENAU-500	1	649.0	-37.4		
34.0% MVA/vd	1688	964	CAXIAS---500	1	579.9	-114.3		
27.9% MVA/vd	2182	1030	MACHADIN-500	1	-625.3	23.1		
.....								
959	500	0	0.956					
CURITIBA-500			-18.5					
10.8% MVA/vd	2110	895	BATEIAS--500	1	-218.0	13.2		
42.9% MVA/vd	2182	933	AREIA---500	1	-888.6	-108.0		
34.2% MVA/vd	1266	938	BLUMENAU-500	1	304.2	-281.4		
69.0% MVA/vd	672	2504	VIRTUAL4	1	402.1	186.4		
69.0% MVA/vd	672	2505	VIRTUAL5	1	400.4	189.8		
.....								
960	230	0	1.000		790.0Mw	330.0Mvar		
CURITIBA-230			-21.0					
4.3% MVA/vd	9999	2504	VIRTUAL4	1	-395.8	-163.3		
4.3% MVA/vd	9999	2505	VIRTUAL5	1	-394.2	-166.7		
.....								

964	500	0	1.018								
CAXIAS---	500		-18.5								
34.0%	MVA/vd	1688		955	CNOVOS---	500	1	-573.9	-111.5		
52.0%	MVA/vd	672		2509	VIRTUAL9		1	353.4	39.6		
51.1%	MVA/vd	672		2510	VIRTUAL10		1	347.1	39.0		
30.7%	MVA/vd	1688		976	GRAVATAI-500		1	503.6	155.5		
28.9%	MVA/vd	2182		995	ITA-----500		1	-630.1	-122.7		
.....											
965	230	0	1.000	>	700.0MW	49.0Mvar					
CAXIAS---	230		-20.9								
3.5%	MVA/vd	9999		2509	VIRTUAL9		1	-353.2	-24.7		
3.5%	MVA/vd	9999		2510	VIRTUAL10		1	-346.8	-24.3		
.....											
976	500	0	0.996								
GRAVATAI-500			-21.0								
33.1%	MVA/vd	1688		964	CAXIAS---	500	1	-501.5	-242.8		
37.9%	MVA/vd	1688		995	ITA-----500		1	-600.2	-212.7		
57.9%	MVA/vd	672		2511	VIRTUAL11		1	357.3	149.8		
62.0%	MVA/vd	672		2512	VIRTUAL12		1	384.1	156.8		
58.2%	MVA/vd	672		2513	VIRTUAL13		1	360.2	148.9		
.....											
995	500	0	1.027								
ITA-----500			-7.9								
26.7%	MVA/vd	1625		904	ITA-----3GR		1	-399.8	197.5	1.000F	
29.0%	MVA/vd	2182		964	CAXIAS---	500	1	636.5	-131.0		
36.3%	MVA/vd	1688		976	GRAVATAI-500		1	610.4	-152.3		
10.9%	MVA/vd	2182		1030	MACHADIN-500		1	227.4	-87.9		
50.2%	MVA/vd	2110		1060	SSANTIAG-500		1	-1074.6	173.7		002
.....											
1030	500	0	1.028								
MACHADIN-500			-9.1								
32.0%	MVA/vd	1254		915	MACHADIN-1GR		1	-400.0	103.2	1.000F	
28.2%	MVA/vd	2182		955	CNOVOS---	500	1	627.0	-77.1		
10.2%	MVA/vd	2182		995	ITA-----500		1	-227.0	-26.1		
.....											
2501	1	0	0.997								
VIRTUAL1			-1.8								
34.4%	MVA/vd	1676		800	GBMUNHOZ-3GR		1	-572.5	-49.7	1.000F	
5.8%	MVA/vd	9999		824	GBMUNHOZ-500		1	572.5	49.7		
.....											
2502	1	0	1.001								
VIRTUAL2			-19.2								
3.5%	MVA/vd	9999		814	BATEIAS--230		1	343.0	72.3		
58.4%	MVA/vd	600		895	BATEIAS--500		1	-343.0	-72.3	1.053*	
.....											
2503	1	0	1.001								
VIRTUAL3			-19.2								
3.4%	MVA/vd	9999		814	BATEIAS--230		1	337.3	71.6		
57.4%	MVA/vd	600		895	BATEIAS--500		1	-337.3	-71.6	1.053*	
.....											
2504	1	0	1.016								
VIRTUAL4			-19.8								
63.7%	MVA/vd	672		959	CURITIBA-500		1	-398.6	-173.9	1.083*	
4.3%	MVA/vd	9999		960	CURITIBA-230		1	398.7	174.0		
.....											
2505	1	0	1.016								
VIRTUAL5			-19.8								
63.7%	MVA/vd	672		959	CURITIBA-500		1	-397.0	-177.3	1.083*	
4.3%	MVA/vd	9999		960	CURITIBA-230		1	397.1	177.4		
.....											
2506	1	0	1.002								
VIRTUAL6			-22.8								
48.4%	MVA/vd	672		938	BLUMENAU-500		1	-325.2	-20.7	1.018*	
3.3%	MVA/vd	9999		939	BLUMENAU-230		1	325.2	20.7		
.....											
2507	1	0	1.002								
VIRTUAL7			-22.8								
47.9%	MVA/vd	672		938	BLUMENAU-500		1	-321.6	-20.3	1.018*	
3.2%	MVA/vd	9999		939	BLUMENAU-230		1	321.6	20.3		
.....											
2508	1	0	1.002								
VIRTUAL8			-22.8								
43.8%	MVA/vd	672		938	BLUMENAU-500		1	-293.5	-26.6	1.018*	
2.9%	MVA/vd	9999		939	BLUMENAU-230		1	293.5	26.6		
.....											
2509	1	0	1.002								
VIRTUAL9			-19.7								
52.7%	MVA/vd	672		964	CAXIAS---	500	1	-353.3	-32.3	0.987*	
3.5%	MVA/vd	9999		965	CAXIAS---	230	1	353.3	32.3		
.....											
2510	1	0	1.002								
VIRTUAL10			-19.7								
51.7%	MVA/vd	672		964	CAXIAS---	500	1	-347.0	-31.8	0.987*	
3.5%	MVA/vd	9999		965	CAXIAS---	230	1	347.0	31.8		
.....											

2511	1	0	1.009								
VIRTUAL11			-22.3								
56.6% MVA/vd			672	976	GRAVATAI-500	1	-357.1	-140.6	1.023*		
3.8% MVA/vd			9999	1210	GRAVATAI-230	1	357.1	140.6			002
.....											
2512	1	0	1.009								
VIRTUAL12			-22.3								
60.6% MVA/vd			672	976	GRAVATAI-500	1	-383.8	-146.9	1.023*		
4.1% MVA/vd			9999	1210	GRAVATAI-230	1	383.8	146.9			002
.....											
2513	1	0	1.009								
VIRTUAL13			-22.3								
56.9% MVA/vd			672	976	GRAVATAI-500	1	-359.9	-139.6	1.023*		
3.8% MVA/vd			9999	1210	GRAVATAI-230	1	359.9	139.6			002
.....											
2514	1	0	1.001								
VIRTUAL14			8.9								
57.1% MVA/vd			1402	925	SSANTIAG-3GR	1	-799.6	47.0	1.000F		002
8.0% MVA/vd			9999	1060	SSANTIAG-500	1	799.6	-47.0			002
.....											

AREA - B

808	14	1	1.000					>	1000.0Mw	13.8Mvar	
SCAXIAS--4GR			18.1								
74.4% MVA/vd			1344	2515	VIRTUAL15	1	1000.0	13.8			
.....											
810	14	1	1.000					>	1000.0Mw	55.2Mvar	
SSEGREDO-4GR			8.6								
79.5% MVA/vd			1260	856	SEGREDO--500	1	1000.0	55.2			
.....											
839	230	0	0.996								
CASCADEL-230			12.6								
0.8% MVA/vd			9999	2517	VIRTUAL17	1	73.0	19.3			
0.8% MVA/vd			9999	2518	VIRTUAL18	1	77.0	20.4			
44.3% MVA/vd			189	898	FCHOPIM--230	1	-80.6	21.6			
50.7% MVA/vd			189	1047	SOSORIO--230	1	-93.3	20.2			
12.9% MVA/vd			319	2458	CASCADEL-230	1	10.9	-39.7			
12.4% MVA/vd			356	2458	CASCADEL-230	2	13.1	-41.8			
.....											
840	138	0	1.000					>	150.0Mw	32.0Mvar	
CASCADEL-138			9.9								
49.7% MVA/vd			150	2517	VIRTUAL17	1	-73.0	-15.6			
52.5% MVA/vd			150	2518	VIRTUAL18	1	-77.0	-16.4			
.....											
848	138	0	1.000					>	90.0Mw	17.0Mvar	
FCHOPIM--138			12.8								
61.1% MVA/vd			150	2519	VIRTUAL19	1	-90.0	-17.0			
.....											
856	500	0	1.000								
SEGREDO--500			2.6								
79.5% MVA/vd			1260	810	SSEGREDO-4GR	1	-1000.0	50.1	1.000F		
75.6% MVA/vd			2273	933	AREIA----500	1	1717.3	10.2			001
33.0% MVA/vd			2182	1060	SSANTIAG-500	1	-717.3	-60.2			
.....											
896	500	0	1.001								
CASCADELO500			12.4								
5.0% MVA/vd			1637	897	SCAXIAS--500	1	23.9	-78.8			
13.7% MVA/vd			600	2516	VIRTUAL16	1	-23.9	78.8			
.....											
897	500	0	1.004								
SCAXIAS--500			12.2								
10.0% MVA/vd			9999	2515	VIRTUAL15	1	-1000.0	88.2			
1.5% MVA/vd			1637	896	CASCADELO500	1	-23.9	0.5			
43.2% MVA/vd			2370	1060	SSANTIAG-500	1	1023.9	-88.7			
.....											
898	230	0	0.987								
FCHOPIM--230			16.1								
46.3% MVA/vd			189	839	CASCADEL-230	1	81.4	-28.9			
0.9% MVA/vd			9999	2519	VIRTUAL19	1	90.0	22.5			
53.6% MVA/vd			324	1047	SOSORIO--230	1	-171.4	6.4			
.....											
919	14	1	1.000					>	700.0Mw	4.4Mvar	
SOSOR1A4-4GR			23.9								
88.8% MVA/vd			788	2520	VIRTUAL20	1	700.0	4.4			
.....											
925	14	1	1.000					>	800.0Mw	1.5Mvar	
SSANTIAG-3GR			12.3								
57.1% MVA/vd			1402	2514	VIRTUAL14	1	800.0	1.5			001
.....											
934	230	0	1.000					>	235.0Mw	57.0Mvar	
AREIA----230			-2.8								
2.5% MVA/vd			9999	2521	VIRTUAL21	1	159.0	-193.7			
65.3% MVA/vd			319	1047	SOSORIO--230	1	-196.9	68.3			
65.4% MVA/vd			319	1047	SOSORIO--230	2	-197.1	68.4			
.....											

1047	230	0	0.989							
SOSORIO--230			17.0							
52.5% MVA/Vd	189	839	CASCADEL-230	1	94.5	-26.4				
53.6% MVA/Vd	324	898	FCHOPIIM--230	1	171.9	-5.3				
7.0% MVA/Vd	9999	2520	VIRTUAL20	1	-688.1	79.0				
67.2% MVA/Vd	319	934	AREIA----230	1	210.7	-23.6				
67.3% MVA/Vd	319	934	AREIA----230	2	211.0	-23.6				
.....										
1060	500	0	1.006							
SSANTIAG-500			5.4							
32.8% MVA/Vd	2182	856	SEGREDO--500	1	720.2	9.9				
42.8% MVA/Vd	2370	897	SCAXIAS--500	1	-1016.0	84.8				
8.0% MVA/Vd	9999	2514	VIRTUAL14	1	-799.3	95.5			001	
52.3% MVA/Vd	2110	995	ITA-----500	1	1095.0	-190.2			001	
.....										
1210	230	0	1.000	> 1100.0Mw	400.0Mvar					
GRAVATAI-230			-23.5							
3.8% MVA/Vd	9999	2511	VIRTUAL11	1	-356.9	-131.8				001
4.1% MVA/Vd	9999	2512	VIRTUAL12	1	-383.5	-137.4				001
3.8% MVA/Vd	9999	2513	VIRTUAL13	1	-359.7	-130.8				001
.....										
2458	230	0	1.000							
CASCADEL-230			12.5							
12.4% MVA/Vd	319	839	CASCADEL-230	1	-10.9	38.0				
11.8% MVA/Vd	356	839	CASCADEL-230	2	-13.0	40.0				
0.8% MVA/Vd	9999	2516	VIRTUAL16	1	23.9	-78.0				
.....										
2515	1	0	1.001							
VIRTUAL15			15.2							
74.4% MVA/Vd	1344	808	SCAXIAS--4GR	1	-1000.0	37.2	1.000F			
10.0% MVA/Vd	9999	897	SCAXIAS--500	1	1000.0	-37.2				
.....										
2516	1	0	1.005							
VIRTUAL16			12.4							
13.6% MVA/Vd	600	896	CASCADELO500	1	23.9	-78.4	1.009*			
0.8% MVA/Vd	9999	2458	CASCADEL-230	1	-23.9	78.4				
.....										
2517	1	0	0.990							
VIRTUAL17			11.2							
0.8% MVA/Vd	9999	839	CASCADEL-230	1	-73.0	-17.4				
50.5% MVA/Vd	150	840	CASCADEL-138	1	73.0	17.4	0.984*			
.....										
2518	1	0	0.990							
VIRTUAL18			11.2							
0.8% MVA/Vd	9999	839	CASCADEL-230	1	-77.0	-18.4				
53.3% MVA/Vd	150	840	CASCADEL-138	1	77.0	18.4	0.984*			
.....										
2519	1	0	0.981							
VIRTUAL19			14.4							
62.6% MVA/Vd	150	848	FCHOPIIM--138	1	90.0	19.7	0.975*			
0.9% MVA/Vd	9999	898	FCHOPIIM--230	1	-90.0	-19.7				
.....										
2520	1	0	0.993							
VIRTUAL20			20.5							
88.8% MVA/Vd	788	919	SOSOR1A4-4GR	1	-694.1	37.3	1.000F			
7.0% MVA/Vd	9999	1047	SOSORIO--230	1	694.1	-37.3				
.....										
2521	1	0	1.011							
VIRTUAL21			-3.3							
37.3% MVA/Vd	672	933	AREIA----500	1	158.9	-197.5	1.030*			001
2.5% MVA/Vd	9999	934	AREIA----230	1	-158.9	197.5				

Assim como no modelo usual, as tensões de todas as barras foram controladas (em 1 p.u.), considerando que os limites dos *taps* dos transformadores não foram atingidos.

Comparando-se as Tabelas 6.16 e 6.17, observa-se diferenças em todas as grandezas apresentadas. Verifica-se, como exemplo, que o módulo da tensão da barra 896, tem valor de 0,982 p.u., utilizando-se o modelo usual, e 1,001, utilizando-se o modelo proposto. Com relação ao ângulo das tensões, ainda para a

barra 896, tem-se o valor de $4,9^\circ$, utilizando-se o modelo usual, e $12,4^\circ$, utilizando-se o modelo proposto.

Com relação aos fluxos nas linhas de transmissão, diferenças consideráveis são observadas. Como exemplo, o fluxo de potência ativa da barra 896 para a barra 2458, vale 279,6 MW, utilizando-se o modelo usual, e 23,9 MW com sentido inverso, utilizando-se o modelo proposto. O fluxo de potência reativa vale 217,5 MVar, utilizando-se o modelo usual, e 78,8 MVar, utilizando-se o modelo proposto. Neste ponto observa-se diferença qualitativa entre os modelos, uma vez que, além de os valores dos fluxos de potência ativa terem valores consideravelmente diferentes, apresentam, também, sentidos opostos.

Além dos modelos diferentes, as consideráveis diferenças observadas são devidas ao número acentuado de transformadores com *taps* variáveis desse sistema, como apresentado na Figura 6.43.

6.2.4.4

Índices de Estabilidade de Tensão

A seguir serão apresentados relatórios com índices de estabilidade de tensão, para cada barra dos sistemas-teste brasileiros de 16 e de 33 barras, utilizando-se os modelos usual e proposto de transformador com *tap* variável. Os relatórios foram obtidos através do programa EstabTen [48]. Cada índice apresentado no relatório é detalhado em [19]. Nas simulações realizadas referentes a cada modelo, foi considerado controle de tensão através de variação do *tap* de transformadores.

6.2.4.4.1

Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras

Na Tabela 6.18 apresenta-se relatório com índices de estabilidade de tensão, para cada barra do sistema-teste brasileiro de 16 barras, utilizando-se o modelo usual de transformador com *tap* variável. O controle de tensão através de variação do *tap* de transformadores é detalhado na Seção 6.2.4.3.2.

Tabela 6.18: Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual

[CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09.06.00

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 1 ***** AREA 1 *****

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
1	GERADOR-1	1.000	G	1	3.520	3.5	0.6	0.3
2	BARRA-2	1.007	P	0	0.000	19.8	76.7	
3	BARRA-3	0.995	LR	0	0.563	13.4	87.4	95.8
10	BARRA-10	0.956	LC	0	0.516	8.6	97.9	94.0
11	BARRA-11	0.971	LR	0	0.488	8.7	96.8	94.4
12	BARRA-12	0.986	L	0	1.155	10.2	94.2	88.7
13	BARRA-13	0.983	LR	0	0.681	8.8	94.4	92.3
14	BARRA-14	1.030	L	0	0.691	6.0	94.4	88.5
15	BARRA-15	1.014	P	0	0.000	10.8	91.1	

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 2 ***** AREA 2 *****

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
4	BARRA-4	0.923	L	0	1.270	11.1	98.9	88.5
5	BARRA-5	0.952	L	0	0.369	14.4	97.9	97.4
6	BARRA-6	0.991	L	0	0.208	42.7	95.7	99.5
7	BARRA-7	1.003	L	0	0.205	14.6	96.3	98.6
8	BARRA-8	1.012	L	0	0.458	12.3	96.6	96.3
9	C. SINCRONO	1.000	Q	1	0.097	4.2	95.3	97.7
16	GERADOR-2	1.000	G	2	2.141	2.1	180.0	0.0

Na Tabela 6.19, apresenta-se relatório com índices de estabilidade de tensão, para cada barra do sistema-teste brasileiro de 16 barras, utilizando-se o modelo proposto de transformador com *tap* variável.

Tabela 6.19: Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto

[CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09.06.00

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 1 ***** AREA 1 *****

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
1	GERADOR-1	1.000	G	1	3.512	3.9	20.6	11.0
2	BARRA-2	1.006	P	0	0.000	20.0	75.9	
3	BARRA-3	0.992	LR	0	0.563	13.6	86.5	95.9
10	BARRA-10	0.945	LC	0	0.516	9.5	97.7	94.6
11	BARRA-11	0.962	LR	0	0.488	9.3	96.3	94.7
12	BARRA-12	0.981	L	0	1.155	10.6	93.5	89.1
13	BARRA-13	0.977	LR	0	0.681	9.1	93.9	92.5
14	BARRA-14	1.030	L	0	0.691	5.8	94.5	88.2
15	BARRA-15	1.011	P	0	0.000	10.7	90.4	
17	VIRTUAL1	0.974	P	0	0.000	7.9	91.5	

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 2 ***** AREA 2 *****

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
4	BARRA-4	0.922	L	0	1.270	11.0	99.0	88.4
5	BARRA-5	0.952	L	0	0.369	14.4	97.9	97.4
6	BARRA-6	0.991	L	0	0.208	42.6	95.7	99.5
7	BARRA-7	1.005	L	0	0.205	14.8	96.5	98.6
8	BARRA-8	1.016	L	0	0.458	12.6	97.1	96.4
9	C. SINCRONO	1.000	Q	1	0.124	4.2	95.5	97.1
16	GERADOR-2	1.000	G	2	2.141	2.1	180.0	0.0
18	VIRTUAL2	0.915	P	0	0.000	10.3	93.6	
19	VIRTUAL3	0.914	P	0	0.000	12.5	96.8	

Como analisado na Seção 6.2.4.3.2, os pontos de operação obtidos por cada modelo de transformador com *tap* variável são diferentes, o que pode ser observado nos diferentes valores das tensões. Conseqüentemente, os índices referentes a cada barra também são diferentes, como pode ser observado comparando-se as Tabelas 6.18 e 6.19. Como exemplo, os índices Beta e Margem (%) para a barra 1, valem 0,6 e 0,3, utilizando-se o modelo usual, e 20,6 e 11, utilizando-se o modelo proposto.

6.2.4.4.2

Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

Na Tabela 6.20 apresenta-se relatório com índices de estabilidade de tensão, para cada barra do sistema-teste brasileiro de 33 barras, utilizando-se o modelo usual de transformador com *tap* variável. O controle de tensão através de variação do *tap* de transformadores é detalhado na Seção 6.2.4.3.3.

Tabela 6.20: Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual

[CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09.06.00
RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO
AREA = 1 AREA UM

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
800	GBMUNHOZ-3GR	1.000	G	2	9.320	9.3	180.0	0.0
814	BATEIAS--230	1.000	L	0	6.923	29.9	127.4	76.9
824	GBMUNHOZ-500	1.000	P	0	0.000	113.3	100.9	
895	BATEIAS--500	0.963	P	0	0.000	37.1	126.3	
904	ITA-----3GR	1.000	G	1	4.465	22.4	90.7	80.1
915	MACHADIN-1GR	1.000	G	1	4.030	15.8	71.8	74.5
933	AREIA----500	1.000	P	0	0.000	109.2	101.4	
938	BLUMENAU-500	0.993	P	0	0.000	31.3	127.8	
939	BLUMENAU-230	1.000	L	0	9.413	28.9	130.0	67.5
955	CNOVOS---500	1.034	P	0	0.000	56.0	107.0	
959	CURITIBA-500	0.963	P	0	0.000	37.9	128.3	
960	CURITIBA-230	1.000	L	0	8.562	30.0	130.2	71.4
964	CAXIAS---500	1.024	P	0	0.000	33.6	119.6	
965	CAXIAS---230	1.000	L	0	7.017	28.5	121.4	75.3
976	GRAVATAI-500	1.002	P	0	0.000	27.7	123.8	
995	ITA-----500	1.032	P	0	0.000	62.7	100.4	
1030	MACHADIN-500	1.033	P	0	0.000	57.1	100.8	

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO
AREA = 2 AREA DOIS

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
808	SCAXIAS--4GR	1.000	G	1	10.031	31.5	66.0	68.1
810	SSEGREDO-4GR	1.000	G	1	10.001	42.5	71.9	76.5
839	CASCAVEL-230	0.997	P	0	0.000	30.7	90.1	
840	CASCAVEL-138	1.000	L	0	1.534	15.1	97.2	89.8
848	FCHOPIM--138	1.000	L	0	0.916	9.8	93.3	90.7
856	SEGREDO--500	1.004	P	0	0.000	106.9	85.4	
896	CASCAVELO500	0.982	P	0	0.000	47.0	84.5	
897	SCAXIAS--500	0.997	P	0	0.000	71.7	77.6	
898	FCHOPIM--230	0.997	P	0	0.000	29.1	75.7	
919	SOSOR1A4-4GR	1.000	G	1	7.005	15.3	50.2	54.1
925	SSANTIAG-3GR	1.000	G	1	8.001	34.7	71.5	76.9
934	AREIA----230	1.000	L	0	2.418	49.9	94.5	95.2
1047	SOSORIO--230	1.001	P	0	0.000	37.7	69.3	
1060	SSANTIAG-500	1.008	P	0	0.000	95.6	81.5	
1210	GRAVATAI-230	1.000	L	0	11.705	26.5	127.8	55.9
2458	CASCAVEL-230	1.000	L	0	4.191	33.1	91.7	87.3

Na Tabela 6.21, apresenta-se relatório com índices de estabilidade de tensão, para cada barra do sistema-teste brasileiro de 33 barras, utilizando-se o modelo proposto de transformador com *tap* variável.

Tabela 6.21: Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V09.06.00

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 1 AREA UM

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
800	GBMUNHOZ-3GR	1.000	G	2	5.765	5.8	180.0	0.0
814	BATEIAS--230	1.000	L	0	6.923	29.8	127.4	76.8
824	GBMUNHOZ-500	0.994	P	0	0.000	111.8	97.7	
895	BATEIAS--500	0.955	P	0	0.000	36.5	126.2	
904	ITA-----3GR	1.000	G	1	4.341	22.3	88.8	80.5
915	MACHADIN-1GR	1.000	G	1	4.017	15.8	71.0	74.6
933	AREIA----500	0.994	P	0	0.000	107.7	98.0	
938	BLUMENAU-500	0.985	P	0	0.000	30.8	127.8	
939	BLUMENAU-230	1.000	L	0	9.413	28.6	130.1	67.1
955	CNOVOS---500	1.028	P	0	0.000	55.3	105.4	
959	CURITIBA-500	0.956	P	0	0.000	37.3	128.3	
960	CURITIBA-230	1.000	L	0	8.562	29.3	130.4	70.7
964	CAXIAS---500	1.018	P	0	0.000	33.2	119.2	
965	CAXIAS---230	1.000	L	0	7.017	28.1	121.2	75.0
976	GRAVATAI-500	0.996	P	0	0.000	27.3	123.6	
995	ITA-----500	1.027	P	0	0.000	62.0	98.9	
1030	MACHADIN-500	1.028	P	0	0.000	56.5	99.2	
2501	VIRTUAL1	0.997	P	0	0.000	196.8	94.0	
2502	VIRTUAL2	1.004	P	0	0.000	30.6	125.3	
2503	VIRTUAL3	1.004	P	0	0.000	30.5	125.2	
2504	VIRTUAL4	1.016	P	0	0.000	30.1	127.8	
2505	VIRTUAL5	1.016	P	0	0.000	30.1	127.8	
2506	VIRTUAL6	1.002	P	0	0.000	27.1	127.2	
2507	VIRTUAL7	1.002	P	0	0.000	27.1	127.2	
2508	VIRTUAL8	1.002	P	0	0.000	26.9	127.0	
2509	VIRTUAL9	1.002	P	0	0.000	28.6	118.9	
2510	VIRTUAL10	1.002	P	0	0.000	28.5	118.8	
2511	VIRTUAL11	1.009	P	0	0.000	24.0	124.1	
2512	VIRTUAL12	1.009	P	0	0.000	24.1	124.2	
2513	VIRTUAL13	1.009	P	0	0.000	24.0	124.1	
2514	VIRTUAL14	1.001	P	0	0.000	81.9	77.8	

RELATORIO - ESTABILIDADE DE TENSAO

AREA = 2 AREA DOIS

Barra	Numero-Nome	Tensao	Equip	Tipo	sinj	Smax	Beta	Margem%
808	SCAXIAS--4GR	1.000	G	1	10.001	31.1	62.8	67.8
810	SSEGREGO-4GR	1.000	G	1	10.015	42.3	69.3	76.3
839	CASCAVEL-230	0.996	P	0	0.000	31.9	83.3	
840	CASCAVEL-138	1.000	L	0	1.534	15.2	94.1	89.9
848	FCHOPIIM--138	1.000	L	0	0.916	9.6	92.9	90.5
856	SEGREGO--500	1.000	P	0	0.000	105.7	81.5	
896	CASCAVELO500	1.001	P	0	0.000	48.1	79.9	
897	SCAXIAS--500	1.004	P	0	0.000	72.0	73.7	
898	FCHOPIIM--230	0.987	P	0	0.000	28.8	73.5	
919	SOSOR1A4-4GR	1.000	G	1	7.000	15.3	48.1	54.3
925	SSANTIAG-3GR	1.000	G	1	8.000	34.6	69.7	76.8
934	AREIA----230	1.000	L	0	2.418	49.5	92.3	95.1
1047	SOSORIO--230	0.989	P	0	0.000	37.2	66.4	
1060	SSANTIAG-500	1.006	P	0	0.000	94.7	77.8	
1210	GRAVATAI-230	1.000	L	0	11.705	26.3	127.7	55.5
2458	CASCAVEL-230	1.000	P	0	0.000	34.5	83.4	
2515	VIRTUAL15	1.001	P	0	0.000	81.6	72.6	
2516	VIRTUAL16	1.005	P	0	0.000	39.4	82.3	
2517	VIRTUAL17	0.990	P	0	0.000	17.3	90.0	
2518	VIRTUAL18	0.990	P	0	0.000	17.5	90.0	
2519	VIRTUAL19	0.981	P	0	0.000	14.1	87.2	
2520	VIRTUAL20	0.993	P	0	0.000	45.2	63.6	
2521	VIRTUAL21	1.011	P	0	0.000	66.3	93.8	

Como analisado na Seção 6.2.4.3.3, os pontos de operação obtidos por cada modelo de transformador com *tap* variável são diferentes, o que pode ser observado nos diferentes valores das tensões obtidas. Conseqüentemente, os índices referentes a cada barra também são diferentes, como pode ser observado nos relatórios nas Tabelas 6.20 e 6.21. Como exemplo, os índices Beta e Margem (%) para a barra 904, valem 90,7 e 80,1, utilizando-se o modelo usual, e 88,8 e 80,5, utilizando-se o modelo proposto.

6.3

Conclusões

Os resultados apresentados neste capítulo mostraram os diferentes resultados obtidos utilizando-se os modelos usual e proposto em testes laboratoriais e em simulações computacionais, tanto em situações em que os *taps* variaram para controlar tensões, quanto em situações em que os *taps* não variaram para controlar as tensões.

Em alguns resultados foram observadas diferenças quantitativas pouco consideráveis, como na comparação entre as curvas com fator de potência constante. Em outros resultados, diferenças mais significativas foram observadas, como na comparação dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e mesmo nos valores das tensões e potências geradas para os sistemas-teste brasileiros.

As diferenças quantitativas já seriam justificativas para a utilização do modelo proposto de transformador com *tap* variável, considerando-se o baixo custo para sua implementação computacional. Todavia, merece maior destaque nesta tese as diferenças qualitativas entre os resultados fornecidos pelos dois modelos com relação: i) à variação do ponto de máximo carregamento com o *tap*; ii) aos efeitos de ações de controle de tensão na região anormal, dependendo do modelo da carga; iii) aos efeitos de ações de controle de tensão através da variação do *tap* na região normal ou anormal, onde nota-se tensões controladas por um modelo e não controladas por outro; iv) às diferenças no sentido do fluxo de potência em linha de transmissão.