

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ATRAVÉS DE UM MODELO  
IMPLICITAMENTE ACOPLADO PARA ALÍVIO DE  
SOBRECARGAS EM REDES DE TRANSMISSÃO**

Dissertação submetida à  
Faculdade de Engenharia de  
Ilha Solteira -UNESP- como  
parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Elétrica.

**Autor: Eduardo Shiguelo Hoji**

Orientador: Antonio Padilha Feltrin

Ilha Solteira – SP  
Março de 2006.

*À minha família, base sólida  
e segura durante todas as  
etapas da minha vida.*

## **Agradecimentos**

“À Deus, primeiramente, por conceder-me saúde e disposição para enfrentar e transpor mais uma etapa em minha vida;

À meus pais, Paulo Mitsuo Hoji e Nanci Akiko Nakayama Hoji, por todo apoio, carinho e dedicação incondicional ao longo de tantos anos;

Aos meus irmãos, Willian Shoiti Hoji e Fernanda Yoko Hoji, pelo apoio, amizade, compreensão e pelos eternos votos de sucesso;

À Rosana Sanae Onodera, pela compreensão e pelo carinho dedicado nos momentos difíceis;

Ao Prof. Antonio Padilha Feltrin, pela orientação na realização deste trabalho, pela dedicação, amizade e confiança creditadas;

Ao Prof. José Roberto Sanchez Mantovani, pelo companheirismo, dedicação e pelas sugestões e críticas, essenciais para a conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Carlos Roberto Minussi, pelas sugestões valiosas;

Ao Eng. Luis Fernando Naporano Delboni, da CTEEP, pela parceria e pelo material fornecido, que tornou possível realizar os testes e concluir este trabalho;

À Fábio Cassucci Gaino e à Delberis Araújo Lima, pelas sugestões e pela ajuda, especialmente nas etapas inicial e final da realização deste trabalho;

Aos demais companheiros do LaPSEE, mais do que colegas de trabalho e estudo, a definição perfeita de verdadeiros amigos;

Aos companheiros de República, pela amizade e pelo apoio, em todos os momentos no cumprimento desta etapa;

À FEPISA, pelo apoio financeiro, indispensável para a realização deste trabalho;

À todos aqueles que esqueci, meu pedido de perdão e meus agradecimentos sinceros.”

## Resumo

A reestruturação dos mercados de energia para fornecer livre acesso ao sistema de transmissão e o conseqüente aumento no número de transações de compra e venda de energia tem causado congestionamento nos sistemas de transmissão. Como conseqüência, as redes têm sofrido sobrecargas nas linhas de maneira mais freqüente.

Uma maneira prática de se melhorar a capacidade de transferência de potência ativa em uma linha de transmissão é a redução de seu fluxo reativo. Esse controle pode ser feito através de alterações nos controles das fontes de potência reativa e nos taps de transformadores. A definição de quais ações serão tomadas de modo a minimizar o fluxo reativo e aliviar, ou mesmo eliminar, a sobrecarga em uma determinada linha, pode ser realizada através da análise de sensibilidade.

Uma vez que se está interessado na resposta do sistema às variações de injeções de reativos, utilizamos a matriz  $Lc$  do método CRIC (Calcul de Reseaux Implicitelement Couples) de fluxo de potência. Também foi utilizado o modelo constante do método CRIC. A metodologia desenvolvida consiste da manipulação da matriz  $Lc$  com outras sensibilidades de primeira ordem, de modo a se obter as sensibilidades entre fluxo reativo nas linhas e injeção de reativos nas barras e fluxo reativo nas linhas e taps dos transformadores. As sensibilidades obtidas fornecem as barras e transformadores mais indicados para alívio de uma determinada sobrecarga e são úteis principalmente em casos emergenciais, nos quais não seja necessária a instalação de novas fontes de reativos.

Os resultados obtidos são comparados com os obtidos através de uma metodologia semelhante, que utiliza a matriz jacobiana do método de Newton. Foram utilizados para os testes o sistema Cigré de 32 barras, e o sistema Sul-Sudeste brasileiro em duas configurações de carga diferentes.

## Abstract

The restructuring of energy markets to supply free access to the transmission system and the consequent increase of the number of power transactions has been causing congestions in the transmission systems. As consequence, the networks have been suffering overloads in the lines in a more frequent way.

A practice way of improving the transfer capability of active power in a transmission line is to decrease its reactive power flow. That control can be made through changes in the reactive power sources injections and in the transformer ratios of transformers. The definition of which actions will be taken to minimize the reactive flow and to alleviate, or even to eliminate, the overload in a determined line can be accomplished through the sensibility analysis.

Once it is interested in the answer of the system to the variations of reactive power injections, we used the matrix  $Lc$  from the CRIC (Calcul of Reseaux Implicitement Couples) power flow method. The constant model of CRIC is also used. The developed methodology consists of the manipulation of the matrix  $Lc$  with other first order sensibilities, in order to obtain the sensibilities among reactive flow in the lines and reactive power injections in the buses and reactive flow in the lines and transformer ratios of the transformers. The obtained sensibilities indicate the buses and transformers for relieving a certain overload and they are mainly useful in emergency cases, which it is not necessary the installation of new sources of reagents.

The obtained results are compared with the obtained through a similar methodology, that uses the of Newton's method jacobian matrix. The methodologies were tested using the 32-bus Cigré network and the South-southeast Brazilian system in two different load configurations.

# São

<b>Introdução</b> .....	14
-------------------------	----

<b>Objetivo</b> .....	17
-----------------------	----

2.1 O Problema do Congestionamento da Transmissão .....	17
---	----

2.2 Capacidade de Transferência Disponível (ATC) .....	19
--	----

2.3 Métodos de Controle do Fluxo.....	20
---------------------------------------	----

2.3.1 Controle do Fluxo Reativo .....	21
---------------------------------------	----

2.4 Abordagens Encontradas na Literatura .....	24
--	----

<b>Métodos</b> .....	27
----------------------	----

3.1 Fatores de Sensibilidade .....	27
------------------------------------	----

3.1.1 Alguns trabalhos utilizando fatores de sensibilidade .....	29
--	----

3.2 A matriz Jacobiana do Fluxo de Potência .....	31
---	----

3.3 O Método Implicitamente Acoplado (CRIC) .....	32
---	----

3.3.1 Obtenção da matriz de sensibilidades reativas $L_c$ .....	33
---	----

3.4 CRIC: Modelo Constante .....	37
----------------------------------	----

3.5 Fatores de sensibilidade para barras .....	38
--	----

3.6 Fatores de sensibilidade para transformadores .....	40
---	----

<b>Casos</b> .....	43
--------------------	----

4.1 Sistema Cigré 32 barras .....	44
-----------------------------------	----

4.1.1 Eliminação de sobrecarga em linha de transmissão .....	45
--	----

4.1.1.1 Sensibilidades das variáveis de barras.....	46
---	----

4.1.1.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	48
4.1.1.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	51
4.1.2	Eliminação de sobrecarga em transformadores .....	55
4.1.2.1	Sensibilidades das variáveis de barras.....	55
4.1.2.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	58
4.1.2.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	60
4.2	Sistema Sul-Sudeste brasileiro .....	64
4.2.1	Eliminação de sobrecarga na LT Embaguaçu - Parelheiros.....	66
4.2.1.1	Sensibilidades das variáveis de barras.....	67
4.2.1.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	69
4.2.1.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	71
4.2.2	Eliminação de sobrecarga na LT Araraquara – São Carlos.....	76
4.2.2.1	Sensibilidades das variáveis de barras.....	77
4.2.2.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	79
4.2.2.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	81
4.2.3	Eliminação de sobrecarga no trafo de Jupia 440/138 kV .....	84
4.2.3.1	Sensibilidades das variáveis de barras.....	84
4.2.3.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	86
4.2.3.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	88
4.2.4	Eliminação de sobrecarga no trafo de Santa Bárbara 440/138 kV .....	91
4.2.4.1	Sensibilidades das variáveis de barras.....	91
4.2.4.2	Sensibilidades das variáveis de transformadores.....	93
4.2.4.3	Análise do nível de tensão após as ações corretivas.....	95
4.3	Avaliação do tempo de processamento .....	100

<b>Objeto</b>	.....	102
---------------	-------	-----

<b>Objeto</b>	.....	105
---------------	-------	-----

# **Índice**

<b>1</b> – Máquina síncrona representada pelo modelo clássico .....	21
<b>2</b> – Modelo equivalente $\pi$ de uma linha de transmissão.....	22
<b>3</b> – Sistema de duas barras .....	34
<b>3</b> – Modelo de transformador com tap variável .....	40
<b>4</b> – Sistema teste Cigré 32 barras. ....	45
<b>4</b> – Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras no caso base. ....	51
<b>4</b> – Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras com sobrecarga na linha 24-25. ....	52
<b>4</b> – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25. ....	52
<b>4</b> – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25. ....	53
<b>5</b> – Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25. ....	55
<b>6</b> – Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras com sobrecarga no transformador 13-26. ....	60
<b>7</b> – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26. ....	61
<b>7</b> – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26. ....	62
<b>8</b> – Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26. ....	63
<b>8</b> – Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26. ....	64
<b>9</b> – Rede de Transmissão da CTEEP. ....	66
<b>10</b> – Perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEEP no caso base de fevereiro de 2006. ....	72
<b>11</b> – Perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEEP com sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006. ....	72
<b>12</b> – Perfis de tensão após as alterações dos suportes de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006. ....	73
<b>13</b> – Perfis de tensão após a alteração do suporte de reativos da barra de Botucatu para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006. ....	74



<b>41</b> - Perfis de tensão após as alterações dos taps dos transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006. ....	75
<b>42</b> - Perfis de tensão após as alterações dos taps dos transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006. ....	76
<b>45</b> Perfil de tensão com sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005. ....	81
<b>46</b> - Perfis de tensão após as alterações dos suport es de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005. ....	82
<b>47</b> - Perfis de tensão após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005. ....	83
<b>48</b> Perfil de tensão no caso base de julho de 2005. ....	88
<b>49</b> Perfis de tensão após as alterações dos suport es de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	89
<b>0</b> - Perfis de tensão após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	90
<b>1</b> - Perfil de tensão com sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	96
<b>2</b> Perfis de tensão após as alterações dos suport es de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	97
<b>3</b> - Perfis de tensão com problemas após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	99
<b>3</b> - Perfis de tensão sem problemas após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005. ....	100



<b>1</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	46
<b>2</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	46
<b>3</b> – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	47
<b>4</b> – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	48
<b>5</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	49
<b>6</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	49
<b>7</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	49
<b>8</b> – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras. ....	50
<b>9</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha 24-25 através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	53
<b>10</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha 24-25 através da alteração dos taps de transformadores. ....	54
<b>11</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	56
<b>12</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	56
<b>13</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	57
<b>14</b> – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	57
<b>15</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	58

<b>46</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	58
<b>47</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	59
<b>48</b> – Alteração de taps necessária para e eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras. ....	59
<b>49</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26 através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	61
<b>0</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26 através da alteração dos taps de transformadores. ....	63
<b>1</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	67
<b>2</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRI C-constante para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	67
<b>3</b> – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	68
<b>4</b> – Suporte de reativo necessário para e eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	69
<b>5</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	70
<b>6</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	70
<b>7</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	70
<b>8</b> – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu – Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	71
<b>9</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu-Parelheiros através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	74
<b>0</b> – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu-Parelheiros através da alteração dos taps de transformadores. ....	75
<b>1</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	77
<b>2</b> – Sensibilidades de barras pelo método CRI C-constante para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	78
<b>3</b> – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	78
<b>4</b> – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	78
<b>5</b> – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	79

1- Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	79
2- Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	80
3- Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	80
4- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	81
5- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos através da alteração dos taps de transformadores. ....	82
6 – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	84
7- Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	85
8- Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	85
9- Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	86
10 – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	86
11- Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	87
12- Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	87
13- Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	87
14- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	89
15- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV através da alteração dos taps de transformadores. ....	90
16 – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	91
17- Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	92
18- Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	92
19- Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	93
20 – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	93

6- Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	94
5- Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	94
8- Alteração de taps necessária para e eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	95
9- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV através da alteração do suporte de reativos das barras. ....	96
0- Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV através da alteração dos taps dos transformadores. ....	98
4 - Tempos de processamento dos cálculos dos fatores de sensibilidade para os casos do sistema Sul-Sudeste brasileiro. ....	100

# 1 Introdução

---

A reestruturação dos sistemas elétricos, para criar competição e fornecer livre acesso ao sistema de transmissão, levou a um aumento no número de transações de compra e venda de energia. Se para atender a todas essas transações algum limite na capacidade da rede é violado, diz-se que o sistema de transmissão está congestionado.

A presença de congestionamento nos sistemas de energia pode impedir o uso de fontes mais baratas para suprir a demanda, além de facilitar a manipulação do mercado. Como consequência, as redes de transmissão têm sofrido sobrecargas nas linhas de maneira cada vez mais freqüente [1]. Em países em desenvolvimento, este cenário é agravado pelo aumento da demanda e pelas restrições para instalação de novas linhas de transmissão, principalmente as de natureza ambiental.

O comitê estrutural do NERC (North American Electric Reliability Council) adotou medidas de alívio do carregamento da transmissão (TLR – Transmission Loading Relief) como procedimentos primários a serem usados no gerenciamento de congestionamentos.

Porém, em algumas situações é impossível evitar que ocorram sobrecargas no sistema. É preciso realizar ações corretivas, de maneira a aliviar a sobrecarga e evitar contingências no sistema. Essas ações devem ser realizadas o mais rápido possível.

Muitos trabalhos tratam o problema de congestionamento através de realocação da geração e do corte de carga. Os cancelamentos de transações de energia e reconfiguração do sistema de transmissão são outras propostas para solução do problema. Obviamente, todas estas ações resultam em impacto financeiro sobre os agentes do sistema, mas um impacto maior pode ser causado se for permitido que o congestionamento do sistema cause sobrecargas ou viole outras restrições de segurança [1].

Contudo, com a reestruturação dos mercados de energia, as empresas transmissoras não podem atuar nos níveis de geração e de carga. Assim, o alívio das sobrecargas deve ser realizado atuando-se sobre os fluxos reativos nas linhas de transmissão. Esse controle pode ser feito principalmente através de alterações nas injeções de potência reativa nas barras e nos taps de transformadores.

A definição das ações que serão tomadas de modo a minimizar o fluxo reativo e aliviar, ou mesmo eliminar, a sobrecarga em uma determinada linha, pode ser realizada utilizando análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade permite conhecer como um sistema reage às variações dos seus parâmetros. Assim, é possível estabelecer uma relação entre alguns parâmetros do sistema e o fluxo reativo na linha sobrecarregada.

Os fatores de sensibilidade encontram aplicação em uma variedade de problemas em sistemas de potência. Estudos de colapso de tensão, alívio de sobrecargas e fluxo de potência ótimo são algumas das aplicações possíveis.

Neste trabalho apresenta-se uma aplicação dos fatores de sensibilidade ao problema do alívio de sobrecargas. A idéia é calcular fatores de sensibilidade para barras e transformadores, e classificá-los em uma lista de dispositivos capazes de aliviar a sobrecarga, atuando de maneira a reduzir o fluxo reativo na linha sobrecarregada. Para as barras, é obtida a sensibilidade entre a variação do fluxo reativo na linha e a variação das injeções de reativos nas barras. Para os transformadores, a sensibilidade é em relação às variações dos taps.

Neste trabalho são propostos dois métodos: um é baseado na matriz de sensibilidade  $L_c$  do modelo implicitamente acoplado (CRIC) [2] e o outro utiliza a matriz  $L_c$  do modelo constante do método CRIC [3]. Estas matrizes apresentam as mesmas características estruturais da submatriz  $L$  da matriz jacobiana do método de fluxo de potência de Newton. Os fatores de sensibilidade são obtidos através de manipulações da matriz de maneira a obter as sensibilidades desejadas. A partir das indicações, são realizadas alterações nos parâmetros dos elementos da rede, e seus efeitos são analisados através da solução do fluxo de potência. O processo é empírico e a definição da alteração necessária em cada parâmetro ocorre quando a sobrecarga é eliminada. Contudo, há casos em que a barra cujo suporte de reativos atinge seu limite de tensão ou de geração de reativos, ou que o transformador cujo tap está sendo alterado atinge o limite de sua relação de transformação. Nesses casos, não ocorre a eliminação da sobrecarga.

Os métodos apresentados neste trabalho serão tratados aqui pelo nome dos métodos de fluxo de potência em que são baseados, ou seja, o método que utiliza a matriz CRIC será referenciado por “CRIC” e o método que utiliza o modelo CRIC-constante, por “CRIC-constante”. Os fatores de sensibilidade obtidos e seus efeitos no alívio das sobrecargas são comparados com os fatores de sensibilidade calculados quando se utiliza a matriz jacobiana do fluxo de potência de Newton, desenvolvido por [4] e utilizado e testado em [5], que para efeitos de diferenciação dos métodos e facilidade de compreensão do texto, neste trabalho será referenciado por “Newton”.

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O capítulo 2 trata das sobrecargas nas linhas de transmissão. A teoria da Capacidade de Transferência Disponível (ATC) e seus conceitos básicos são apresentados. A seguir, são apresentados e discutidos alguns métodos de controle do fluxo de potência reativa. Por fim, são descritas algumas abordagens do problema de sobrecargas encontradas na literatura.

O capítulo 3 refere-se à análise de sensibilidade. São introduzidos o conceito de sensibilidade e a metodologia de análise utilizando-se aproximação por série de Taylor. São apresentadas as equações de formação das matrizes de sensibilidade reativa do método implicitamente acoplado (CRIC) e do modelo constante e a metodologia para definição das ações corretivas a serem tomadas em casos de sobrecargas. Abordagens encontradas na literatura ao uso de fatores de sensibilidade e da matriz de sensibilidade  $L_c$  são apresentados nas seções correspondentes, dentro deste capítulo.

No capítulo 4 são apresentados os testes. Foram realizados testes com um sistema de pequeno porte, o Cigré 32 barras, e um sistema real de grande porte, o sistema Sul-Sudeste brasileiro, cujos objetivos são mostrar a eficácia das ações corretivas extraídas dos fatores de sensibilidade obtidos e realizar uma comparação com os resultados obtidos do método “Newton”.

O capítulo 5 contém as considerações finais do trabalho, seguidas de algumas sugestões para melhoria da metodologia desenvolvida.



## **2 Sobrecargas em Linhas de Transmissão**

---

A reestruturação do mercado de energia elétrica para aumentar a competição ocasionou um aumento no número de transações de compra e venda de energia. Um dos efeitos primários deste aumento é o congestionamento do sistema de transmissão.

Neste cenário, variações súbitas de demanda, falhas em equipamentos e contingências podem causar sobrecargas em algumas linhas de transmissão do sistema. As ações para o alívio destas sobrecargas devem ser tomadas de maneira a levar o sistema aos limites de segurança no menor tempo possível. Existem situações em que é possível prever essas sobrecargas, possibilitando o uso de ferramentas como o cálculo da Capacidade de Transferência Disponível (ATC – Available Transfer Capability).

Neste capítulo é realizada, inicialmente, uma descrição sobre o problema do congestionamento em sistemas de transmissão. Em seguida, é apresentada uma revisão sobre o cálculo da ATC considerando o limite térmico das linhas [5] e [6]. A seguir, são descritas algumas metodologias para controle do fluxo de potência, utilizadas na solução do problema de sobrecargas em linhas de transmissão. Finalmente, são apresentadas algumas abordagens encontradas na literatura para este problema.

### **2.1 O Problema do Congestionamento da Transmissão**

O problema do congestionamento da transmissão refere-se à insuficiência na capacidade de transmissão do sistema. Sob considerações apenas de mercado, os compradores procuram pelo menor preço. Quando os limites físicos do sistema de transmissão são considerados, nem sempre essas transações podem ser realizadas sem

violar algum limite de segurança do sistema. O congestionamento é causado, então, pela incapacidade do sistema em atender transferências de potência simultâneas entre os agentes do mercado [7].

O congestionamento pode ser reduzido pelo cancelamento das transações, realocação da geração, reconfiguração da transmissão ou pela redução de cargas [1].

Devido ao custo causado, todos os agentes de mercado têm interesse no alívio do congestionamento da transmissão. Isto porque, se não realizadas as ações corretivas necessárias, podem ocorrer sobrecargas e outros tipos de violação de limites de segurança do sistema de transmissão, o que levaria a custos ainda mais elevados.

O comitê estrutural do NERC (North American Electric Reliability Council) adotou medidas de alívio do carregamento da transmissão (TLR – Transmission Loading Relief) como procedimentos primários a serem usados no gerenciamento de congestionamentos. Estes procedimentos estão separados em níveis, que são descritos em [1].

Em [8] é apresentado um estudo sobre as ineficiências dos procedimentos adotados pelo NERC para alívio da transmissão. Segundo os autores, os procedimentos mostram a preocupação quanto à segurança de operação, mas cria oportunidade para manipulações que podem levar a uma operação ineficiente do sistema, ao aumento de preços, menor transparência de mercado e maior volatilidade.

Os efeitos das restrições da rede de transmissão sobre as transações entre os diferentes agentes no novo esquema de funcionamento dos mercados elétricos, para identificar os elementos que permitam uma implementação prática num mercado elétrico são mostrados em [9]. A proposta do trabalho é empreender um estudo que apresente um processo de otimização no horizonte de 24 horas em sistemas hidrotérmicos que permita analisar o custo devido à presença de congestionamentos do sistema de transmissão. Estes custos são repassados aos agentes do mercado por meio do cálculo adequado do preço *Spot* para cada ponto do sistema.

O estudo realizado em [7] aborda os impactos do congestionamento do sistema de transmissão sobre os agentes e sobre o mercado como um todo. Foram investigados os impactos das tentativas de manipulação do mercado por parte de agentes isolados e o papel da demanda variável com o preço na minimização da manipulação do sistema.

Em [10] é apresentado um modelo para análise do gerenciamento de congestionamentos. É utilizado um mecanismo baseado no fluxo para alocar a potência reativa fornecida pelos geradores em redes de transmissão com várias transferências de

potência. O esquema proposto determina a alocação do congestionamento entre as transações, propõe um esquema de alívio do congestionamento e determina os níveis de transmissão adequados para cada transação para utilização do sistema de transmissão.

## 2.2 Capacidade de Transferência Disponível (ATC)

Um problema muito comum em redes de transmissão refere-se aos altos carregamentos de linhas durante os horários de pico de consumo. De modo a evitar contingências no sistema, é importante conhecer-se a priori quais linhas estão sujeitas a sofrerem sobrecarga e realizar ações de maneira a aliviar ou, se possível, eliminar estas sobrecargas.

O cálculo da ATC determina em que linha ocorre sobrecarga devido a uma transferência de potência entre áreas do sistema e qual é a transferência possível entre as áreas de modo que não ocorram sobrecargas. Sua teoria é baseada nos fatores de distribuição LODF (Line Outage Distribution Factor), PTDF (Power Transfer Distribution Factor), e OTDF (Outage Transfer Distribution Factor), que medem os efeitos que uma transferência de potência ou a saída de um elemento da rede causam no sistema de potência [11].

Para análise pré-contingência dos sistemas utiliza-se o PTDF, que mede a variação do carregamento das linhas do sistema devido a mudanças em uma transferência de potência entre áreas, expressa em porcentagem (até 100%) da mudança na transferência de potência. Os PTDFs podem ser determinados pela avaliação da sensibilidade linearizada no ponto de operação inicial do sistema  $(P_{jk}^0, Q_{jk}^0)$ , como na equação (2.1):

$$\rho_{jk,i \rightarrow s} = \Delta P_{jk} / \Delta P_i \quad (2.1)$$

Sendo:

$\rho_{jk,i \rightarrow s}$  PTDF da linha  $j-k$  devido a uma transferência de potência entre as barras  $i$  e  $s$ .

$\Delta P_{jk}$  Variação do fluxo na linha  $j-k$ .

$\Delta P_i$  Variação da injeção de potência na barra  $i$ .

A variação na injeção de potência na barra  $i$  ( $\Delta P_i$ ) leva o sistema a um novo ponto de operação  $(P_{jk}^*, Q_{jk}^*)$ . A quantidade de potência transferida entre as barra  $i$  e  $s$  que pode levar cada linha  $j-k$  ao limite térmico ( $\Delta P_i^{*jk}$ ) é calculada pela equação (2.2):

$$\Delta P_i^{*jk} = \begin{cases} \frac{P_{jk}^* - P_{jk}^0}{\rho_{jk,i \rightarrow s}} & \rho_{jk,i \rightarrow s} > 0 \\ -\frac{P_{jk}^* - P_{jk}^0}{\rho_{jk,i \rightarrow s}} & \rho_{jk,i \rightarrow s} < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

A ATC será o menor valor de  $\Delta P_i^{*jk}$  para todas as linhas  $j-k$ . Assim, a máxima transferência factível considerando os limites térmicos das linhas será:

$$ATC_{i \rightarrow s}^{t\acute{e}rmico} = \min \{ \Delta P_i^{*jk} : \text{todas as linhas } jk \} \quad (2.3)$$

### 2.3 Métodos de Controle do Fluxo

O controle do fluxo nas linhas é realizado com base nas equações básicas do fluxo de potência e nas relações entre potência ativa e ângulo da tensão ( $P-\theta$ ) e potência reativa e magnitude de tensão ( $Q-V$ ). Possíveis ações de controle do fluxo ativo são realocação da geração, ajustes nas transferências de potência entre áreas, ajustes nos ângulos dos defasadores, chaveamento da rede e corte de carga [12]. Para controle do fluxo reativo, algumas ações que podem ser tomadas são o ajuste da excitação de campo de geradores ou motores síncronos, o uso de capacitores shunt nas barras, ajustes nos taps de transformadores e o uso de compensadores estáticos reativos [13].

Em sistemas desverticalizados as transmissoras não podem interferir nos níveis de geração nem nas transferências entre áreas e o corte de carga é tido como última opção para solução do problema. Assim, não serão descritos aqui os efeitos das ações de controle do fluxo ativo. Os efeitos de cada ação para controle do fluxo reativo são apresentados a seguir.

### 2.3.1 Controle do Fluxo Reativo

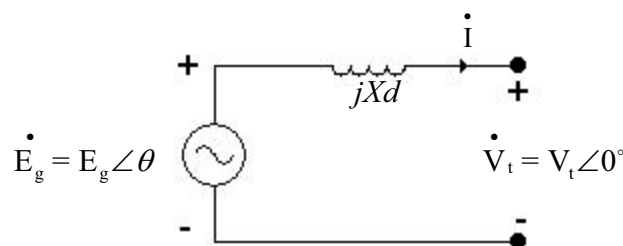
A coordenação do despacho de reativos apresenta várias vantagens para um sistema de potência [13]:

- Redução de custos devido à redução de perdas do sistema;
- Melhoria no perfil de tensão;
- Melhor controle da tensão;
- Melhoria na segurança do sistema;
- Aumento na capacidade de transferência do sistema;
- Melhoria na operação do sistema.

A redução do fluxo reativo permite aumentar a capacidade de transferência de potência real sem a necessidade de novos equipamentos, tornando-se um grande atrativo para as empresas de transmissão. A seguir, são descritos os princípios de funcionamento de alguns métodos para controle da potência reativa.

Uma máquina síncrona superexcitada (funcionando como motor ou como gerador) produz potência reativa e age, sob o ponto de vista da rede, como um capacitor em paralelo [14]. Considerando a máquina síncrona representada pelo modelo clássico, como mostrado na figura 2.1, a corrente do gerador é dada pela equação (2.4). As potências complexa, ativa e reativa fornecidas pela máquina são dadas pelas equações (2.5), (2.6) e (2.7) respectivamente:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_g e^{j\theta} - \dot{V}_t}{jX_d} \quad (2.4)$$



**Figura 2.1** – Máquina síncrona representada pelo modelo clássico.

$$\dot{S} = \dot{V}_t \dot{I}^* = \dot{V}_t \left( \frac{\dot{E}_g e^{-j\theta} - \dot{V}_t}{-jX_d} \right) = \frac{V_t E_g (j \cos \theta + \text{sen} \theta) - j V_t^2}{X_d} \quad (2.5)$$

$$P = \text{Re}\{\dot{S}\} = \frac{V_t E_g \text{sen} \theta}{X_d} \quad (2.6)$$

$$Q = \text{Im}\{\dot{S}\} = \frac{V_t (E_g \cos \theta - V_t)}{X_d} \quad (2.7)$$

Sendo:

$E_g, \theta$  Magnitudes e ângulo da tensão interna da máquina;

$V_t$  Tensão terminal da máquina;

$x_d$  Reatância síncrona de eixo direto.

A equação (2.7) mostra que a potência reativa Q fornecida pela máquina aumenta com o aumento da tensão de excitação  $E_g$ . Ocorre também uma pequena redução no ângulo  $\theta$ , de modo a manter a potência ativa P, na equação (2.6), constante. Geralmente, os ângulos de potência são inferiores a  $30^\circ$ , o que torna o  $\cos \theta$  praticamente insensível às suas variações, não havendo grandes variações em Q.

O uso de capacitores shunt envolve a instalação de bancos de capacitores nas barras. Cada banco fornece reativos na barra em que foi instalado. Assim, reduz a corrente de linha necessária para fornecer potência reativa a uma carga. A figura 2.2 ilustra o modelo equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão.

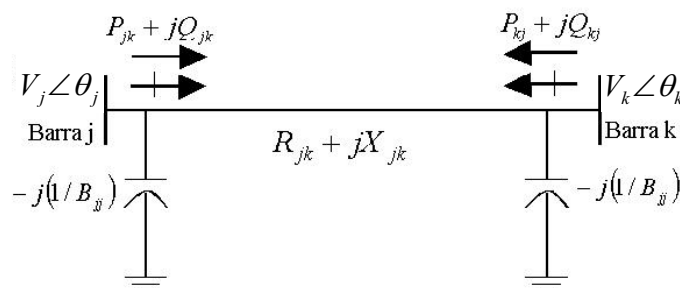


Figura 2.2 – Modelo equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão.

A admitância da linha  $j-k$  é dada pela equação (2.8). O fluxo de potência complexa da barra  $j$  para a barra  $k$  ( $S_{jk}$ ) é dado pela equação (2.9):

$$Y_{jk} \angle -\alpha_{jk} = G_{jk} + jB_{jk} = 1/(R_{jk} + jX_{jk}) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} S_{jk} &= P_{jk} + jQ_{jk} \\ &= V_j^2 G_{jk} - V_j V_k Y_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk}) \\ &\quad + j[V_j^2 B_{jj} - V_j^2 B_{jk} - V_j V_k Y_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk})] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Sendo:

- $V_j, V_k$       Magnitudes de tensão das barras  $j$  e  $k$ ;
- $\theta_j, \theta_k$       Ângulos de tensão das barras  $j$  e  $k$ ;
- $Y_{jk}$             Magnitude da admitância da linha  $j-k$ ;
- $-\alpha_{jk}$         Ângulo da admitância da linha  $j-k$ .

A equação (2.9) é equivalente à equação (2.5) incluindo-se considerações de resistência e capacitância shunt. Sabendo que o fluxo de potência reativa flui da barra de maior tensão para a barra de menor tensão, a instalação de um banco de capacitores na barra  $k$  e a conseqüente elevação de sua tensão ( $V_k$ ) leva à redução do fluxo reativo da barra  $j$  para a barra  $k$  ( $Q_{jk}$ ). A parte imaginária da equação (2.9) fornece a parcela reativa do fluxo da linha  $j-k$  e comprova a hipótese apresentada.

Os compensadores estáticos de reativos são indutores e capacitores chaveados eletronicamente e operam da mesma maneira que os capacitores shunt, porém, podem atuar como fontes de potência reativa indutiva ou capacitiva quando o sistema opera sob carregamento alto.

O controle do fluxo reativo através da regulação de transformadores é feito pelo ajuste da relação de transformação. Os transformadores possuem uma faixa de ajuste de amplitude de tensão e taps em seu enrolamento para variar a relação de transformação. A mudança de tap controla a magnitude da tensão da barra controlada. A exemplo do que ocorre com a colocação de bancos de capacitores, faz-se uso do acoplamento  $Q-V$ .

## 2.4 Abordagens Encontradas na Literatura

Na literatura especializada são encontradas diversas abordagens ao problema de sobrecargas em linhas de transmissão. As ações tomadas para a solução do problema referem-se principalmente à realocação da geração e ao corte de carga. A compensação de reativos e os dispositivos FACTS também são utilizados como instrumentos de controle de fluxo.

Em [15] as sobrecargas nas linhas são aliviadas através de realocação da geração e cortes de carga. São apresentados dois modelos matemáticos: um baseado no modelo Newton-Raphson e outro para uso com o método desacoplado rápido de fluxo de potência. Em ambos, as variações das injeções de potência nas barras são definidas de modo a diminuir a corrente nas linhas utilizando fatores de sensibilidade.

Em [12] é apresentado um modelo baseado em fatores de sensibilidade e um modelo utilizando programação linear para correção da geração de potência ativa. No primeiro, é utilizado um fator de variação da geração e outro fator a ser usado quando ocorre uma contingência (LODF – Line Outage Distribution Factors). No segundo, é apresentada a possibilidade de incluírem-se os custos da geração e encontrar a configuração de “despacho econômico dentro dos limites de sobrecarga”.

Um método de realocação da geração para controle preventivo utilizando redes neurais artificiais e margens de energia transitória é proposto em [16]. Um paradigma híbrido de dois estágios é usado para obter as sensibilidades de margem de energia em relação à geração e depois para obter as alterações na geração.

Um sistema inteligente dedicado a uso on-line e baseado em fatores de sensibilidade é proposto em [17]. A determinação dos coeficientes é realizada através de um programa de estimação de estados e de um banco de dados da topologia da rede. Alterações nas injeções de potência ativa nas barras e corte de carga são as ações tomadas.

Em [18] é apresentado um algoritmo para alívio de sobrecargas e violações de tensão através de realocação corretiva da geração. São utilizadas as decomposições entre potência ativa e reativa e entre otimização sem limites de segurança e otimização para satisfazer os limites de segurança. Dessa maneira, escolhendo-se um índice adequado, assegura-se que o alívio de uma violação existente não cause outra violação no sistema.

Em [19] é introduzido o conceito de otimização local, onde uma região fixa, chamada de região de trabalho, em torno da linha sobrecarregada é previamente definida, e



as ações de controle são tomadas apenas dentro dessa região. Assim, o tamanho do problema a ser resolvido é praticamente independente do tamanho do sistema. É também proposto um esquema na tentativa de evitar cortes de carga desnecessários.

Os princípios do método desacoplado de fluxo de potência são utilizados no processo de otimização apresentado em [20], na tentativa de obter melhorias no tempo de processamento. A abordagem envolve a solução do problema de otimização sem limites, seguido de realocação corretiva da geração ativa e reativa realizadas separadamente.

Em [21] é apresentada uma metodologia que emprega um algoritmo genético composto de módulos de despacho de potência ativa e reativa. O conceito de otimização local é utilizado. A realocação da geração de ativos só é realizada se ocorre algum problema de tensão devido a alterações na geração de reativos.

Em [22] o controle dos fluxos ativos nas linhas é realizado através de ajustes nos transformadores defasadores em uma metodologia utilizando fluxo de potência ótimo. Os defasadores são ordenados de acordo com a análise de contingência e a análise de sensibilidade. O ajuste dos defasadores e o cálculo do fluxo de potência ótimo são feitos utilizando um método baseado em regras, visto que o FPO não pode ser utilizado diretamente para resolver problemas de defasamento.

Um método baseado em programação não-linear é apresentado em [23]. São utilizados o conceito de otimização local adaptativa, e técnicas de vetores esparsos. São adicionadas heurísticas, de modo a considerar alguns aspectos operacionais dos sistemas de potência. O problema de otimização não-linear é formulado para minimizar uma função quadrática que inclui a diferença entre o fluxo ativo atual da linha sobrecarregada e seu respectivo limite.

Em [5] as mudanças nos níveis de geração de reativos e nos taps de transformadores para reduzir o fluxo reativo nas linhas são definidas através de fatores de sensibilidade baseados na matriz jacobiana do sistema, utilizando a metodologia apresentada em [4]. A matriz jacobiana não sofre redução para determinação dos fatores de sensibilidade, sendo possível sua aplicação para determinação de sensibilidades relativas a geração de potência ativa.

O funcionamento dos dispositivos FACTS e sua eficiência no controle do fluxo são apresentados em [24]. São destacadas as aplicações do UPFC (Unified Power Flow Controller) para compensação dinâmica e para controle dos fluxos ativo e reativo em tempo real.

Em [25] é apresentada uma metodologia para alocação ótima de dispositivos FACTS para gerenciamento de congestionamentos utilizando considerações estáticas baseadas na redução do índice de desempenho do fluxo ativo. Este índice apresenta valores pequenos quando as linhas estão dentro de seus limites, e valores altos quando sobrecarregadas, e são derivadas de acordo com o parâmetro de controle do dispositivo. As alterações nos níveis de geração e os cortes de carga são baseados em uma filosofia na qual a disposição do usuário em pagar é um indicador da importância de sua transferência.

Em [26] são apresentados estudos do uso de chaveamento de linhas de transmissão e de modificação da topologia de subestações como forma de controle de fluxo de potência ativa em situações de sobrecarga de linhas de transmissão ou transformadores. A seleção dos candidatos ao chaveamento é dividida em duas partes: a primeira consiste em utilizar uma análise linear rápida para selecionar os candidatos que aliviam totalmente a sobrecarga e a segunda realiza a partir desses candidatos a análise CA para verificação dos limites de tensão e fluxos.

## 3 Análise de Sensibilidade

---

O conceito de sensibilidade é amplamente conhecido e utilizado na resolução de vários problemas em sistemas de potência, permitindo entender como as variações no sistema afetam seu estado. Esta propriedade faz dos fatores de sensibilidade uma ferramenta útil inclusive na determinação de ações de controle corretivo a serem comandadas por um operador no centro de monitoração e controle de um sistema de transmissão.

Para esta tomada de decisões, uma aproximação utilizando sensibilidades de primeira ordem já fornece uma boa estimativa do comportamento do sistema. Além disso, é necessário que o método seja rápido, pois em muitos casos se trata de uma situação emergencial.

Neste capítulo são introduzidos o conceito de sensibilidade e a metodologia de análise utilizando-se aproximação por série de Taylor. São apresentadas as matrizes de sensibilidades reativas dos métodos implicitamente acoplado (CRIC) e CRIC constante, e a metodologia para definição das ações corretivas a serem tomadas em casos de sobrecargas.

### 3.1 Fatores de Sensibilidade

Considere um sistema em regime permanente  $\mathbf{x}^0$ , correspondendo aos valores nominais  $\mathbf{u}^0$  e  $\mathbf{p}^0$  dos vetores  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{p}$ . A equação deste sistema será:

$$f(\mathbf{x}^0, \mathbf{u}^0, \mathbf{p}^0) = 0 \quad (3.1)$$

sendo:

- $\mathbf{x}$  vetor de estado do sistema, composto pelas magnitudes e ângulos de tensão.
- $\mathbf{u}$  vetor de variáveis de controle.
- $\mathbf{p}$  vetor dos parâmetros do sistema.

Uma perturbação  $\Delta \mathbf{x}$  nas variáveis  $\mathbf{x}$  devido a alterações  $\Delta \mathbf{u}$  e  $\Delta \mathbf{p}$  nos vetores de variáveis de controle  $\mathbf{u}$  e nos parâmetros  $\mathbf{p}$  permite representar o sistema da seguinte maneira:

$$f_v(\mathbf{x}^0 + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}^0 + \Delta \mathbf{u}, \mathbf{p}^0 + \Delta \mathbf{p}) = 0 \quad (3.2)$$

Deve-se enfatizar que as variações consideradas são variações estáticas. Expandindo  $f_v$  numa série de Taylor em torno do ponto de regime e admitindo que as perturbações sejam pequenas de modo que seja possível desprezar os termos de ordens superiores à unidade, ou seja, retendo-se apenas à linearidade do modelo, obtém-se:

$$\frac{\partial f_v}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_v}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_v}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f_v}{\partial u_2} \Delta u_2 + \dots + \frac{\partial f_v}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial f_v}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots = 0 \quad (3.3)$$

para  $v = 1, 2, \dots, 2n$

Ou ainda:

$$\frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x} + \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} + \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} = 0 \quad (3.4)$$

Isolando-se  $\Delta \mathbf{x}$  em (3.4):

$$\Delta \mathbf{x} = - \left[ \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{x}} \right]^{-1} \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} - \left[ \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{x}} \right]^{-1} \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \quad (3.5)$$

Definindo as matrizes de sensibilidade  $S_u$  e  $S_p$ :

$$\begin{aligned} S_u &= - \left[ \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{x}} \right]^{-1} \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{u}} \\ S_p &= - \left[ \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{x}} \right]^{-1} \frac{\partial f_v}{\partial \mathbf{p}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Estas matrizes informam o quanto  $\mathbf{x}$  é sensível em relação às variações de  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{p}$ .

Apesar de não fornecer a sensibilidade exata, a aproximação por série de Taylor de primeira ordem oferece uma boa estimativa do comportamento de qualquer sistema que possa ser representado por um conjunto de equações, inclusive sistemas de energia elétrica. Além disso, suas fórmulas de sensibilidade são similares para qualquer parâmetro, sendo necessária apenas uma pequena fração de tempo para desenvolver a primeira ordem para outro parâmetro, pois assumem uma matriz jacobiana constante. Esta propriedade torna estas fórmulas de sensibilidade muito atraentes para determinar ações de controle emergenciais. Uma explicação mais ampla sobre a teoria da perturbação e análise de sensibilidade pode ser encontrada em [27].

### 3.1.1 Alguns trabalhos utilizando fatores de sensibilidade

Um trabalho pioneiro na utilização de fatores de sensibilidade em sistemas de potência é apresentado em [28]. Os autores abordaram o problema do despacho ótimo e mostraram que a sensibilidade pode ser aplicada a vários casos diferentes e que através das equações de balanço de potência é possível estabelecer mudanças nas variáveis dependentes quando na ocorrência de perturbações nas variáveis de controle.

Em [29] é apresentada uma formulação matemática para análise de sensibilidade no problema de fluxo de potência ótimo em sistemas de grande porte. Os autores analisaram o impacto do aumento de carga nas barras sobre as perdas ativas no sistema e aplicaram os fatores de participação em problemas de fluxo de potência e despacho econômico.

O problema do controle de reativos para melhoria do perfil de tensão é abordado em [30]. A eficiência das variáveis de controle para resolver os problemas de violação de tensões é medida de acordo com fatores de sensibilidade e com a margem de reserva das variáveis de controle. As sensibilidades são recalculadas a cada alteração nas variáveis de controle e seus efeitos avaliados por um programa de fluxo de potência ótimo.

São utilizados os conceitos de margem de segurança e sensibilidade de margem na análise de segurança de sistemas de energia em [31]. O autor utiliza fórmulas de sensibilidade gerais, e descreve algumas metodologias para análise de sensibilidade. São apresentadas abordagens para os problemas de sobrecargas, colapso de tensão e análise de contingências.

No trabalho apresentado em [32], os autores utilizaram a derivação da sensibilidade linear, usada no controle de despacho de MW, para alívio nas violações de tensão. Três ações são realizadas no processo, derivando-se as ações com relação a variável adequada. A primeira ajusta o despacho ativo para eliminar sobrecargas no sistema. A segunda ajusta o despacho reativo para correção das violações de tensão. A terceira ajusta o despacho ativo para correção de problemas de tensão onde as ações reativas não foram suficientes. Todas estas ações estão definidas em um conjunto *fuzzy*.

Em [33] foram utilizados fatores de sensibilidade para determinar de maneira rápida a margem de capacidade de transferência quando algum parâmetro do sistema é alterado. As fórmulas de sensibilidade são obtidas derivando-se a capacidade de transferência pelo parâmetro alterado, a exemplo de [34], e a diferença entre a transferência do caso base e o caso limite fornece a margem de transferência.

Uma metodologia para o problema de alocação de custos na transmissão, baseado em fatores de sensibilidade extraídos do fluxo de potência de Newton-Raphson, é apresentada em [35]. A proposta dos autores é alocar os custos da transmissão para todos os participantes, baseado na participação de cada um no fluxo e na capacidade de transferência da linha.

Em [36], é proposta uma abordagem para seleção de contingências utilizando análise de sensibilidades do fluxo de potência quadrático (QPF), obtidas da derivação das variáveis de estado do QPF em relação às variáveis de controle. Com isso, os autores propõem uma maneira de minimizar os erros de seleção utilizando fatores linearizados.

No modelo apresentado em [37] utilizam-se fatores de sensibilidade para determinar novas soluções no problema do fluxo de potência ótimo perturbado. Assim, a obtenção da solução após ocorrerem perturbações é obtida de maneira direta, sem a necessidade de fatores de penalidade e correção, como nos programas convencionais de fluxo de potência ótimo. A técnica de sensibilidade é baseada nas informações de segunda ordem e nas condições de otimalidade.

Em [38] se propõe uma abordagem ao problema de congestionamento entre zonas em ambiente competitivo. No método proposto utilizam-se dois índices de sensibilidade: um para potência ativa e outro para reativa, que relacionam os fluxos nas linhas com as injeções nas barras. Por se tratar de ambiente competitivo, a seleção e a participação dos elementos da rede no alívio do congestionamento é definida não apenas por suas sensibilidades, mas também através de seu custo.

Na referência [39] é proposto um método para alívio de congestionamentos em mercados tipo “pool” baseado na oferta. As transferências de potência bilaterais mais baratas e capazes de remover o congestionamento são determinadas através de análise de sensibilidade em um processo iterativo e os custos do aumento da geração para redução do congestionamento são divididos entre as partes congestionadas.

### 3.2 A matriz Jacobiana do Fluxo de Potência

A matriz Jacobiana do fluxo de potência de Newton é uma matriz quadrada, de ordem igual a duas vezes o número de barras do sistema ( $nb$ ), caso não haja ajustes das variáveis de controle de alguns equipamentos do sistema, e é formada pelas derivadas parciais das injeções de potência ativa e reativa ( $P_i$  e  $Q_i$ ) em cada barra em relação às variações da magnitude ( $V_i$ ) e ângulo ( $\theta_i$ ) de tensão nas barras. A equação (3.7) mostra a estrutura e a lei de formação desta matriz:

$$Ja = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_N} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_N} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ & & & \vdots & & & & \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_N} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ & & & \vdots & & & & \end{bmatrix}_{(2nb, 2nb)} \quad (3.7)$$

A matriz jacobiana é formada por quatro submatrizes ( $H$ ,  $N$ ,  $M$ ,  $L$ ) [37], representadas por:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial P}{\partial \theta}; & N &= \frac{\partial P}{\partial V} \\ M &= \frac{\partial Q}{\partial \theta}; & L &= \frac{\partial Q}{\partial V} \end{aligned} \quad (3.8)$$

As dimensões dessas submatrizes no estudo de fluxo de potência convencional são determinadas através do número de barras PV e PQ e elas possuem as mesmas características de esparsidade da matriz de admitâncias da rede ( $Y_{bus}$ ). As linhas e colunas referentes às barras PV devem ser eliminadas das submatrizes correspondentes às variações de tensão.

### 3.3 O Método Implicitamente Acoplado (CRIC)

Os métodos desacoplados baseiam-se no desacoplamento  $P\theta - QV$  e são obtidos considerando-se o fato de as sensibilidades  $\partial P/\partial\theta$  e  $\partial Q/\partial V$  serem mais intensas que as sensibilidades  $\partial P/\partial V$  e  $\partial Q/\partial\theta$  [40].

O desacoplamento permite a separação entre os subproblemas  $P\theta$  e  $QV$ , sendo os efeitos das submatrizes jacobianas  $M$  e  $N$  desprezados. Apesar das aproximações não alterarem a rede, os efeitos das aproximações podem ser vistos nos resultados do problema de fluxo de potência, principalmente para sistemas altamente carregados. Além disso, as sensibilidades oferecidas por estes métodos podem apresentar erros.

Buscando minimizar esses efeitos, J. Carpentier [2] desenvolveu um novo processo de desacoplamento ativo – reativo. O método implicitamente acoplado (CRIC – Constrained Reactive Implicit Coupling) possui duas idéias básicas, uma teórica e outra prática.

A idéia teórica consiste em manter constantes as injeções de potência ativa durante o semiciclo reativo no cálculo do fluxo de potência. A idéia prática baseia-se no fato de que, quando as magnitudes de tensão variam, são introduzidos erros muito pequenos se considerarem constantes os fluxos ativos nas linhas ao invés das injeções de potência ativa nas barras.

No trabalho original, Carpentier preocupa-se principalmente com o fluxo de potência ótimo, enfatizando a melhoria na linearização do subproblema  $QV$ .

Em [41] é apresentada uma metodologia para planejamento de reativos em sistemas de energia utilizando programação linear sucessiva. As sensibilidades para o processo de otimização são fornecidas pela matriz  $L$  do método CRIC ( $Lc$ ), devido ao menor número de restrições e da boa qualidade das sensibilidades para o processo linear apresentadas.



Um modelo de fluxo de potência desacoplado com matrizes constantes baseado na filosofia CRIC é apresentado em [3]. O estudo aplica-se ao problema do fluxo de potência quando o acoplamento entre os subproblemas ativo e reativo não é desprezível. Além do CRIC, os métodos de Newton desacoplado e o desacoplado rápido são analisados e seus resultados comparados.

Em [42] é proposto um método de cálculo da margem de potência reativa para o colapso de tensão baseado em otimização. O desacoplamento CRIC permite a separação dos subproblemas ativo e reativo, levando a um problema apenas de tensão e mantendo um compromisso com a precisão e a eficiência.

O autor de [43] apresenta uma abordagem estática para detecção e prevenção do problema de instabilidade de tensão, baseada na análise modal da matriz de sensibilidade do modelo implicitamente acoplado. A metodologia consiste da obtenção dos menores autovalores e seus autovetores à direita e a esquerda da matriz, a partir dos quais são obtidas informações sobre a participação de elementos do sistema na perda da estabilidade.

O trabalho de [44] traz uma abordagem ao problema de mercado de potência reativa. O autor apresenta um método baseado na capacidade de geração e nos custos para simulação e análise desses mercados. O conceito do CRIC é utilizado para decompor o problema em subproblemas ativo e reativo. Um fluxo de potência ótimo com limites reativos de segurança baseado em programação linear determina o incremento ótimo nas magnitudes de tensão.

Em [45] é apresentado um método para auxiliar na restauração de sistemas de potência em que o problema é dividido em duas fases principais, uma “CC” e outra “CA”. O modelo CRIC é empregado na sensibilidade entre potência reativa e tensão, na fase “CA”, permitindo o trabalho com a potência reativa de maneira praticamente independente da parte ativa.

### 3.3.1 Obtenção da matriz de sensibilidades reativas $L_c$

A obtenção da matriz de sensibilidades reativas  $L_c$  baseia-se nas idéias apresentadas por J. Carpentier [2]. A formulação apresentada a seguir foi extraída de [46].

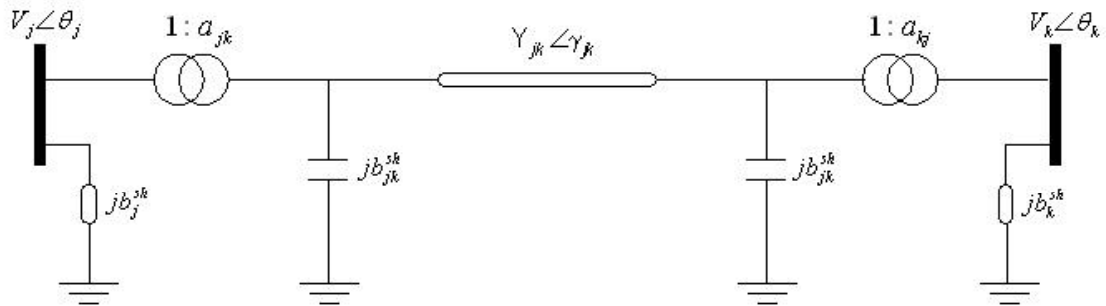
Considere o bipolo da figura (3.1). Os fluxos de potência ativa e reativa nesta linha são dados pelas expressões (3.9), (3.10), (3.11) e (3.12).

$$P_{jk} = (a_{jk} \cdot V_j)^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk}) + a_{jk} \cdot V_j \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) \quad (3.9)$$

$$P_{kj} = V_k^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk}) + a_{jk} \cdot V_j \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\theta_{kj} - \alpha_{jk}) \quad (3.10)$$

$$Q_{jk} = (a_{jk} \cdot V_j)^2 \cdot (Y_{jk} \cdot \text{cos}(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - a_{jk} \cdot V_j \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \text{cos}(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) \quad (3.11)$$

$$Q_{kj} = V_k^2 \cdot (Y_{jk} \cdot \text{cos}(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - a_{jk} \cdot V_j \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \text{cos}(\theta_{kj} - \alpha_{jk}) \quad (3.12)$$



**Figura 3.1** – Sistema de duas barras.

Sendo:

$Y_{jk}, \gamma_{jk}$  Admitância e ângulo das perdas no bipolo;

$a_{jk}, a_{kj}$  Tap's não-nominais dos transformadores em fase dos lados  $j$  e  $k$  do bipolo;

$b_{jk}^{sh}$  Susceptância shunt do bipolo;

$b_j^{sh}, b_k^{sh}$  Susceptância shunt das barras  $j$  e  $k$ ;

$V_j, \theta_j$  Módulo e ângulo de tensão da barra  $j$ .

$$\theta_{jk} = \theta_j - \theta_k$$

$$\alpha_{jk} = 90^\circ - \gamma_{jk}$$

As injeções de potência reativa nas barras  $j$  e  $k$  são fornecidas pelas equações (3.13) e (3.14), respectivamente:

$$Q_j = -V_j \cdot \sum_{j \neq k} a_{jk} \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) + V_j^2 \cdot \left[ \sum_{j \neq k} a_{jk}^2 \cdot (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_j^{sh} \right] \quad (3.13)$$

$$Q_k = -V_k \cdot \sum_{j \neq k} a_{jk} \cdot V_j \cdot Y_{jk} \cdot \cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk}) + V_k^2 \cdot \left[ \sum_{j \neq k} (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_k^{sh} \right] \quad (3.14)$$

Considerando a hipótese de  $P_{jk}$  constante, é possível escrever as expressões (3.15) e (3.16), em que a abertura angular do bipolo é função apenas de  $V_j, V_k, a_{jk}$ :

$$\text{sen}(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) = \frac{P_{jk} - a_{jk}^2 \cdot V_j^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \quad (3.15)$$

$$\text{sen}(\theta_{kj} - \alpha_{jk}) = \frac{P_{kj} - V_k^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \quad (3.16)$$

Usando relações trigonométricas, é possível escrever as expressões (3.17) e (3.18):

$$\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) = \sqrt{1 - \left( \frac{P_{jk} - a_{jk}^2 \cdot V_j^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \right)^2} \quad (3.17)$$

$$\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk}) = \sqrt{1 - \left( \frac{P_{kj} - V_k^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \right)^2} \quad (3.18)$$

E, substituindo as equações (3.17) e (3.18) nas equações (3.13) e (3.14), obtemos as expressões (3.19) e (3.20), em que as injeções de potência reativa nas barras  $j$  e  $k$  estão em função exclusivamente do vetor de tensões.

$$Q_j = V_j^2 \cdot \left[ \sum_{j \neq k} a_{jk}^2 \cdot (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_j^{sh} \right] - V_j \cdot \sum_{j \neq k} a_{jk} \cdot V_k \cdot Y_{jk} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{P_{jk} - a_{jk}^2 \cdot V_j^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \right)^2} \quad (3.19)$$

$$Q_k = V_k^2 \cdot \left[ \sum_{j \neq k} (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_k^{sh} \right] - V_k \cdot \sum_{j \neq k} a_{jk} \cdot V_j \cdot Y_{jk} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{P_{kj} - V_k^2 \cdot Y_{jk} \cdot \text{sen}(\alpha_{jk})}{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k} \right)^2} \quad (3.20)$$

Diferenciando parcialmente as expressões (3.19) e (3.20) em relação às tensões  $V_j$  e  $V_k$ , obtemos as equações de sensibilidade (3.21), (3.22), (3.23) e (3.24), responsáveis pela formação da matriz de sensibilidades relativas  $L_c$  do método CRIC.

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_j} = 2 \cdot V_j \cdot \left[ \sum_{j \neq k} a_{jk}^2 \cdot (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_j^{sh} \right] - \sum_{j \neq k} a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot \left[ \frac{V_k + 2 \cdot a_{jk} \cdot V_j \cdot \text{sen}(\alpha_{jk}) \cdot \text{sen}(\theta_{jk} - \alpha_{jk})}{\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk})} \right] \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_k} = - \frac{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j}{\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk})} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_j} = 2 \cdot V_k \cdot \left[ \sum_{j \neq k} (Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - b_k^{sh} \right] - \sum_{j \neq k} Y_{jk} \cdot \left[ \frac{a_{jk} \cdot V_j + 2 \cdot V_k \cdot \text{sen}(\alpha_{jk}) \cdot \text{sen}(\theta_{kj} - \alpha_{jk})}{\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk})} \right] \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_j} = - \frac{a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_k}{\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk})} \quad (3.24)$$

A matriz  $L_c$  possui as mesmas características estruturais da submatriz  $L$  da matriz jacobiana, com alto grau de esparsidade e é de fácil obtenção, uma vez que é necessária apenas a substituição de valores em equações.

### 3.4 CRIC: Modelo Constante

Em geral, as redes de transmissão de alta tensão apresentam baixos valores para a razão  $R/X$  das linhas, ou seja,  $R \ll X$ . Além disso, os ângulos das barras nas extremidades de uma linha possuem valores muito próximos e as tensões são mantidas próximas de 1 p.u.. Estas considerações permitem realizar algumas aproximações:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_{jk}) &\cong 1 \\ B_{jk} &\gg G_{jk} \cdot \sin(\theta_{jk}) \\ V_j &= 1 \text{ p.u.} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Aplicando as aproximações (3.25) nas equações do método CRIC, obtém-se as equações da versão constante do método CRIC. A matriz  $Lc$  deste método é obtida através das equações (3.26) e (3.27):

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_j} = -2 \cdot BSH_j + \sum_{j \neq k} \frac{a_{jk}}{x_{jk}} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_k} = -\frac{a_{jk}}{x_{jk}} \quad (3.27)$$

Sendo:

$G_{jk}, B_{jk}$  admitância e susceptância da linha  $j-k$ ;

$BSH_j$  Soma de todas as susceptâncias shunt ligadas à barra  $j$ ;

$x_{jk}$  Reatância série da linha ou do transformador  $j-k$ .

As equações (3.26) e (3.27) são, a menos dos taps  $a_{jk}$ , as mesmas equações que formam a matriz  $B''$  do método de fluxo de potência desacoplado rápido, na versão BX, apresentado em [3]. Neste método, as relações de transformação que aparecem nas equações são tomadas como unitárias.

### 3.5 Fatores de sensibilidade para barras

Os cálculos dos fatores de sensibilidade que indicam as barras e os transformadores capazes de aliviar ou eliminar a sobrecarga foram baseados na formulação apresentada em [4], e utilizada e testada em [5]. Contudo, buscamos aqui apenas a relação entre o fluxo reativo na linha e o suporte de reativos nas barras e os resultados apresentados em [5] referem-se a sensibilidades entre o fluxo ativo na linha e o suporte de reativos nas barras.

Apenas a análise da matriz  $Lc$  não fornece uma indicação das barras nas quais uma alteração em seu suporte de reativos seja capaz de reduzir o fluxo reativo na linha sobrecarregada. Considere as expressões (3.11) e (3.12), que fornecem o fluxo reativo na linha sob as considerações do método CRIC. Diferenciando parcialmente estas expressões em relação às tensões  $V_j$  e  $V_k$ , obtemos as expressões (3.28), (3.29), (3.30) e (3.31):

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_j} = 2.a_{jk}^2.V_j.(Y_{jk}.\cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - a_{jk}.Y_{jk} \cdot \left[ \frac{V_k + 2.a_{jk}.V_j.\text{sen}(\alpha_{jk}).\text{sen}(\theta_{jk} - \alpha_{jk})}{\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk})} \right] \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_k} = -\frac{a_{jk}.Y_{jk}.V_j}{\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk})} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial Q_{kj}}{\partial V_k} = 2.V_k.(Y_{jk}.\cos(\alpha_{jk}) - b_{jk}^{sh}) - Y_{jk} \cdot \left[ \frac{a_{jk}.V_j + 2.V_k.\text{sen}(\alpha_{jk}).\text{sen}(\theta_{kj} - \alpha_{jk})}{\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk})} \right] \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial Q_{kj}}{\partial V_j} = -\frac{a_{jk}.Y_{jk}.V_k}{\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk})} \quad (3.31)$$

Substituindo valores para cada linha  $j-k$  nas expressões (3.28) a (3.31), é possível construir a matriz da expressão (3.32):

$$Jaf = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{12}}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_{12}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_{12}}{\partial V_{nb}} \\ \frac{\partial Q_{13}}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_{13}}{\partial V_{nb}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_{nl}}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial V_{nb}} \end{bmatrix}_{(nl, nb)} \quad (3.32)$$

A matriz (3.32) apresenta o comportamento dos fluxos reativos em cada linha do sistema devido às variações das tensões nas suas barras terminais. Para encontrar o fator de sensibilidade desejado, é necessária a inversão da matriz  $Lc$ . O alto grau de esparsidade dessa matriz permite o uso de técnicas de esparsidade, como o método de Zollenkopf [47], utilizado no processo de fatoração da matriz. Invertendo a matriz  $Lc$ , obtemos a matriz apresentada na equação (3.33):

$$Lc^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_{nb}}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial V_1}{\partial Q_2} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial V_{nb}}{\partial Q_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_1}{\partial Q_{nb}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{nb}} & \dots & \frac{\partial V_{nb}}{\partial Q_{nb}} \end{bmatrix}_{(nb, nb)} \quad (3.33)$$

Multiplicando-se a matriz da equação (3.32) pela transposta da matriz da equação (3.33), encontramos os fatores de sensibilidade ( $FS$ ) entre o fluxo reativo nas linhas e a injeção de reativo nas barras:

$$FS = Jaf \times (Lc^{-1})^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{jk}}{\partial V_m} & \frac{\partial V_m}{\partial Q_i} \end{bmatrix}_{(nl, nb)}$$

$$\therefore FS = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix}_{(nl, nb)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{12}}{\partial Q_1} & \frac{\partial Q_{12}}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial Q_{12}}{\partial Q_{nb}} \\ \frac{\partial Q_{13}}{\partial Q_1} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial Q_{13}}{\partial Q_{nb}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_{nl}}{\partial Q_1} & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial Q_{nb}} \end{bmatrix}_{(nl, nb)} \quad (3.34)$$

A matriz da equação (3.34) fornece a sensibilidade entre o fluxo reativo nas linhas e a injeção de reativo nas barras para todas as linhas e todas as barras do sistema. Quando existe apenas uma linha sobrecarregada, é possível realizar o cálculo das expressões (3.28) a (3.31) apenas em relação à linha com problemas. Assim, a matriz (3.32) resume-se a um vetor de dimensão  $nb$ , bem como a matriz da equação (3.34). Esta medida reduz o tempo de execução do programa, especialmente para sistemas de grande porte.

### 3.6 Fatores de sensibilidade para transformadores

Outra maneira de controlar-se o fluxo reativo nas linhas de transmissão é através do ajuste da relação de transformação em transformadores. Assim como para as barras, é desejável uma indicação de quais os transformadores mais efetivos no alívio ou na eliminação da sobrecarga.

Considere o modelo de transformador com tap variável apresentado na figura 3.2, onde o terminal  $j$  (barra “de”) representa a barra que tem a tensão alterada pelo valor do tap do transformador, e o terminal  $k$  (barra “para”) representa a barra com a tensão de controle. A alteração no tap deste transformador altera a magnitude da tensão da barra  $j$ , e conseqüentemente a o fluxo reativo na linha  $j-k$ . Assim, as injeções de reativo nas barras  $j$  e  $k$  são alteradas.

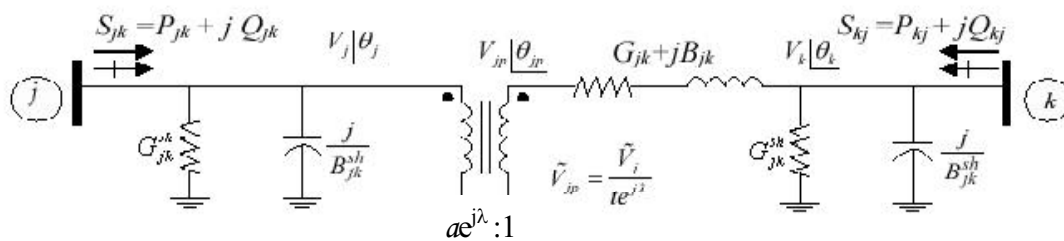


Figura 3.2 – Modelo de transformador com tap variável.

As derivadas das injeções de potência reativa nas barras  $j$  e  $k$  em relação à variação do tap situado no circuito são dadas pelas equações (3.35) [46]:



$$\frac{\partial Q_i}{\partial a_{jk}} = -2 \cdot a_{jk} \cdot V_j^2 \cdot Y_{jk} \cdot \cos(\alpha_{jk}) - \left[ \frac{Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k + 2 \cdot a_{jk} \cdot Y_{jk} \cdot V_j^2 \cdot \text{sen}(\alpha_{jk}) \cdot \text{sen}(\theta_{jk} - \alpha_{jk})}{\cos(\theta_{jk} - \alpha_{jk})} \right] \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{jk}} = - \frac{Y_{jk} \cdot V_j \cdot V_k}{\cos(\theta_{kj} - \alpha_{jk})}$$

A substituição de valores nas equações (3.35) para todos os transformadores da rede formam a matriz  $Mtap$ , que relaciona as injeções de potência reativa nas barras com as variações dos taps dos transformadores.

$$Mtap = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial a_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial Q_{nb}}{\partial a_1} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial a_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial Q_{nb}}{\partial a_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial a_{nl}} & \frac{\partial Q_2}{\partial a_{nl}} & \dots & \frac{\partial Q_{nb}}{\partial a_{nl}} \end{bmatrix}_{(nl, nb)} \quad (3.36)$$

Somente a análise da matriz  $Mtap$  não permite identificar quais os transformadores mais efetivos na eliminação de uma sobrecarga. Multiplicando a matriz da equação (3.36) pela transposta da matriz ( $FS$ ) da equação (3.34), obtemos:

$$Jaftap = Mtap \times (FS)^T = \left[ \frac{\partial Q_i}{\partial a_m} \times \frac{\partial Q_{jk}}{\partial Q_i} \right]_{(nl, nl)}$$

$$\therefore Jaftap = \left[ \frac{\partial Q_{jk}}{\partial a_m} \right]_{(nl, nl)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{12}}{\partial a_1} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial a_1} \\ \frac{\partial Q_{12}}{\partial a_2} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial a_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_{12}}{\partial a_{nl}} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial a_{nl}} & \dots & \frac{\partial Q_{nl}}{\partial a_{nl}} \end{bmatrix}_{(nl, nl)} \quad (3.37)$$

A matriz  $Jaftap$ , da equação (3.37) fornece as sensibilidades do fluxo reativo nas linhas em relação à variação dos taps dos transformadores. Esta matriz é quadrada, de

ordem igual ao número de ligações do sistema ( $nl$ ). Na matriz utilizada em [5], a dimensão de *Jaftap* é  $(nl, 2nl)$ , pois apresenta as sensibilidades em relação aos fluxos ativos e reativos. As linhas da matriz *Jaftap* referentes a linhas de transmissão possuem valor nulo, pois não possuem tap. A exemplo do que ocorre com a matriz *FS*, a matriz *Jaftap* também será um vetor, de dimensão  $nl$ , em casos que apenas uma sobrecarga é analisada no sistema.

Obtêm-se, assim, duas sensibilidades que oferecem uma indicação de quais ações podem ser tomadas para eliminação de uma sobrecarga no sistema.

## 4 Testes e Resultados

---

Neste capítulo é apresentada uma avaliação do comportamento dos elementos da rede, de acordo com os fatores de sensibilidade calculados pelos métodos CRIC e CRIC-constante, para alívio de sobrecargas. Os resultados são comparados com os obtidos a partir do método Newton.

O objetivo deste estudo não é a busca de alocação de novas fontes de reativos nos sistemas. Por esta razão, somente as barras PV e as barras PQ que possuem capacitores ou indutores shunt são indicadas.

É realizado um cálculo preliminar da ATC do sistema, devido a uma transferência de potência. Assim, é possível saber a quantidade de potência a ser transmitida sem que ocorram sobrecargas nos sistemas. Porém, o objetivo deste trabalho é fornecer indicações de elementos capazes de atuar em situações de sobrecarga de maneira a aliviá-las, ou mesmo eliminá-las. São realizadas, então, transferências de potência de magnitude maior do que as ATC dos sistemas, de modo a gerar sobrecargas.

A partir do sistema sobrecarregado, são calculados os fatores de sensibilidade que indicam quais elementos de rede devem ter seus parâmetros alterados (suporte de reativos das barras e taps dos transformadores) para que a rede possa voltar a operar dentro dos limites de segurança. As alterações nos parâmetros dos elementos são realizadas manualmente, sendo a primeira variação realizada de acordo com a magnitude do fator de sensibilidade. Após cada alteração, é executado o fluxo de potência, a fim de verificar se os elementos indicados possuem algum efeito sobre a linha sobrecarregada. Neste trabalho foi utilizado o programa ANAREDE [48] para esta tarefa.

Este processo é realizado de maneira empírica, e prossegue até que a sobrecarga seja eliminada ou que o elemento em questão alcance algum de seus limites. É esperado

que, para fatores de sensibilidade positivos seja necessário o aumento da injeção de reativos nas barras ou do tap dos transformadores e, para sensibilidade negativa, seja necessário reduzir estes parâmetros. O módulo dos fatores de sensibilidade quantificam os efeitos dos elementos da rede sobre o fluxo reativo da linha sobrecarregada.

Para cada caso foi realizada uma análise do perfil de tensão do sistema, para verificar se as ações propostas para o alívio das sobrecargas não causam uma variação excessiva nos níveis de tensão do sistema.

Os testes foram realizados com o sistema Cigré 32 barras, encontrado em [6], que tem sido utilizado em estudos publicados sobre capacidade de transferência e sobrecargas, e que permite realizar uma boa avaliação da metodologia proposta, e com o sistema Sul-Sudeste brasileiro [49] em configuração de julho/2005 e fevereiro/2006, ambas com carga pesada. O desempenho foi analisado para alívio de sobrecargas em linhas de transmissão e transformadores, não se considerando sobrecargas múltiplas.

Para o sistema Sul-Sudeste brasileiro são apresentados os tempos de processamento para cálculo das sensibilidades, de maneira a medir o custo computacional de cada método.

Para o sistema Cigré de 32 barras são apresentados todos os fatores de sensibilidade calculados, pois se trata de um sistema de pequeno porte. Para o sistema Sul-Sudeste brasileiro são apresentados apenas os fatores correspondentes às barras e aos transformadores que possuem maiores fatores de sensibilidade, dentro das regiões próximas à sobrecarga.

Para distinção dos métodos, neste trabalho os métodos serão referidos pelo nome do método de fluxo de potência cujas matrizes de sensibilidade são utilizadas, ou seja, o método que utiliza a matriz jacobiana de Newton será tratado por “Newton”, o método que utiliza a matriz  $L_c$  do modelo CRIC de fluxo de potência, será chamado de “CRIC”, e o modelo que considera as aproximações na matriz  $L_c$ , de “CRIC-constante”.

#### **4.1 Sistema Cigré 32 barras**

Para o sistema Cigré 32 barras, mostrado na figura 4.1, foram realizados dois testes: um considerando sobrecarga em uma linha de transmissão e outro com sobrecarga em um transformador. Para cada um deles foram analisados os fatores de sensibilidade para barras e para transformadores. Todas as indicações fornecidas pelos métodos foram avaliadas e as ações capazes de eliminar as sobrecargas são mostradas.

O sistema consiste de 32 barras, 25 linhas e 15 transformadores sendo 7 com LTC. A barra 32 é considerada como a barra slack e as barras 15, 16, 18, 22 e 31 são barras PV. No sistema original, as barras 8, 10 e 12 são barras PV, mas para este trabalho, elas estão modeladas como barras PQ.

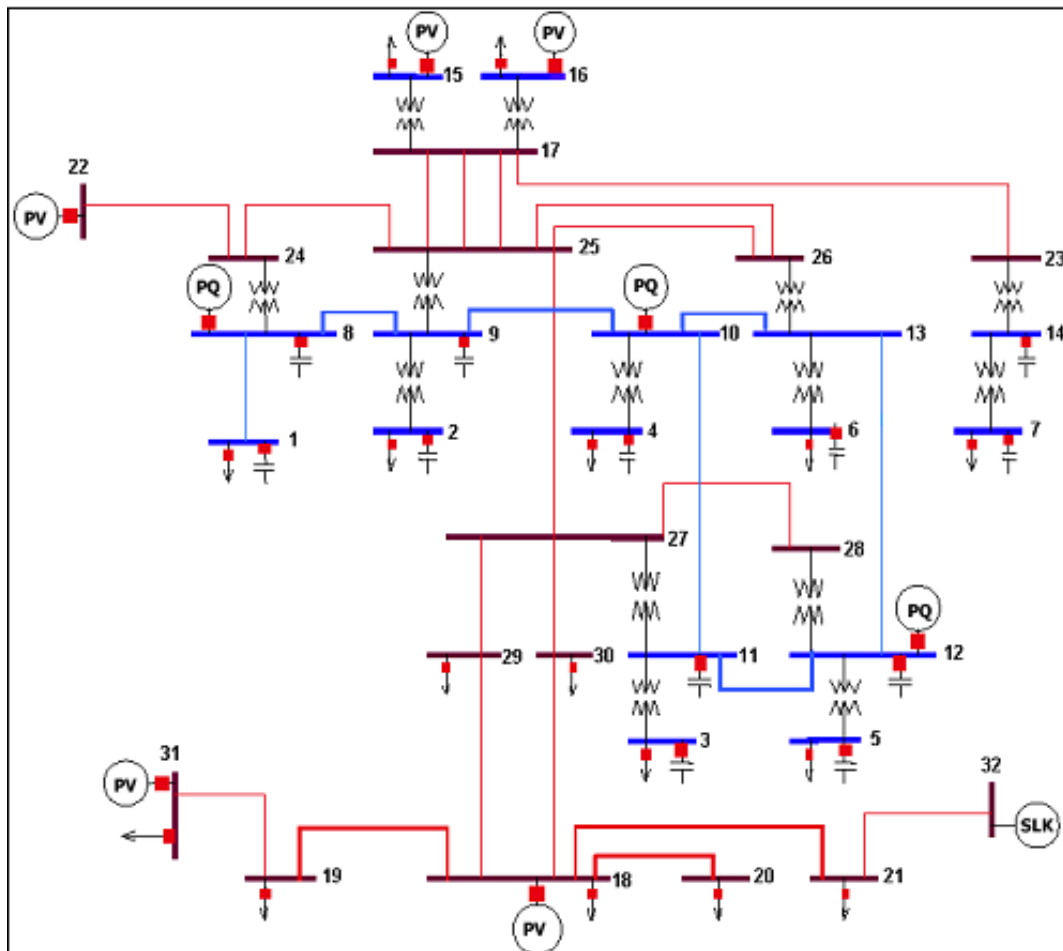


Figura 4.1 – Sistema teste Cigré 32 barras.

#### 4.1.1 Eliminação de sobrecarga em linha de transmissão

Uma transferência de potência de 915 MW da barra 32 para a barra 22 do sistema causa uma sobrecarga na linha 24-25, cujo limite térmico é de 1061,0 MVA. O fluxo na linha após a transferência é de  $(1037,9 + j239,51)MVA = 1065,18 \angle 12,99^\circ MVA$ , o que causa um carregamento de 100,4%.

#### 4.1.1.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentadas as barras indicadas para eliminação da sobrecarga na linha 24-25, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. As indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade, divididas em positivas e negativas, e apresentando melhor classificação as barras que possuem maior magnitude do valor da sensibilidade.

**Tabela 4.1** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	8	0,5265	15	-0,0533
<b>2</b>	1	0,5236	16	-0,0511
<b>3</b>	9	0,1033	14	-0,0396
<b>4</b>	2	0,0982	7	-0,0376
<b>5</b>	4	0,0586	18	-0,0152
<b>6</b>	11	0,0100	31	-0,0147
<b>7</b>	3	0,0095		
<b>8</b>	6	0,0088		
<b>9</b>	5	0,0018		
<b>10</b>	12	0,0017		

Para o método CRIC, as barras 8 e 1 apresentam as maiores magnitudes dos fatores de sensibilidade, e são indicadas como possuindo as sensibilidades mais positivas. Assim, para eliminar a sobrecarga na linha 24-25, segundo as indicações do método CRIC, as alterações mais efetivas seriam aumentar os suportes de reativos das barras 8 e 1.

**Tabela 4.2** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	1	0,1652	7	-0,4923
<b>2</b>	8	0,1628	14	-0,4881
<b>3</b>			15	-0,4528
<b>4</b>			16	-0,4505
<b>5</b>			5	-0,3993
<b>6</b>			6	-0,3938
<b>7</b>			12	-0,3917
<b>8</b>			3	-0,3843
<b>9</b>			11	-0,3809

**Tabela 4.2** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>10</b>	4	-0,3421
<b>11</b>	2	-0,2992
<b>12</b>	9	-0,2966
<b>13</b>	31	-0,2725
<b>14</b>	18	-0,2725

O método CRIC-constante indicou as barras 1 e 8 com sinais positivos, como o CRIC, porém com os menores valores de sensibilidade entre todas as barras. As barras com maior sensibilidade de acordo com este método são 7 e 14.

**Tabela 4.3** – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	1	0,3272	7	-0,5159
<b>2</b>	8	0,2999	14	-0,4675
<b>3</b>			5	-0,4049
<b>4</b>			6	-0,3943
<b>5</b>			3	-0,3859
<b>6</b>			12	-0,3759
<b>7</b>			11	-0,3496
<b>8</b>			4	-0,3337
<b>9</b>			16	-0,3315
<b>10</b>			15	-0,3262
<b>11</b>			2	-0,2733
<b>12</b>			9	-0,2473
<b>13</b>			31	-0,2469
<b>14</b>			18	-0,2466

As barras 1 e 8 possuem sensibilidade positiva segundo o método Newton, a exemplo dos métodos baseados no acoplamento implícito. Porém, este método apresenta a redução do suporte de reativos das barras 7 e 14 como as melhores ações a serem realizadas para eliminar a sobrecarga presente no sistema.

Na tabela 4.4 são mostradas as barras capazes de eliminar a sobrecarga presente no sistema. A primeira coluna refere-se à barra cujo suporte de reativos será alterado; na segunda coluna é apresentada a variação realizada em seu suporte de reativos. As terceira e quarta colunas apresentam as variações dos fluxos ativo e reativo na linha sobrecarregada. Na quinta coluna é apresentada a sensibilidade entre a variação do fluxo reativo na linha

( $\Delta Q_{jk}$ ) pela variação do suporte de reativos na barra  $i$  ( $\Delta Q_i$ ). A sexta coluna mostra o fluxo total e a última coluna apresenta o carregamento da linha 24-25 após a alteração do suporte de reativos nas barras.

O sinal negativo na determinação da sensibilidade deve-se ao fato de que a sensibilidade é definida por  $S_u = -(\Delta x / \Delta u)$ . É importante observar o comportamento do fluxo ativo da linha sobrecarregada, pois há casos em que os fluxos ativo e reativo possuem comportamentos contrários para uma determinada ação, ou seja, enquanto o fluxo reativo é reduzido, ocorre um aumento no fluxo ativo da linha e vice-versa. Este comportamento pode tornar mais difícil eliminar a sobrecarga na linha.

**Tabela 4.4** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

Barras	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	Fluxo (MVA)	Carreg. (%)
1	40,0	2,4	-37,97	0,9493	1059,64	99,87
2	50,0	-1,6	-16,28	0,3256	1060,07	99,91
3	100,0	-2,4	-15,02	0,1502	1059,55	99,86
4	90,0	-2,3	-22,73	0,2526	1058,05	99,72
5	100,0	-2,3	-14,10	0,1410	1059,85	99,89
6	100,0	-2,4	-16,16	0,1616	1059,31	99,84
8	50,0	3,0	-43,64	0,8728	1059,17	99,83
9	70,0	-1,9	-20,42	0,2917	1058,91	99,80
11	120,0	-2,5	-15,90	0,1325	1059,25	99,84
12	120,0	-2,6	-15,90	0,1325	1059,17	99,83

É possível eliminar a sobrecarga na linha 24-25 apenas alterando o suporte de reativo em uma das barras do sistema. As barras 1 e 8 são as mais sensíveis, como indicado pelo método CRIC, e seus comportamentos são definidos corretamente pelos três métodos. Em todas as barras é preciso aumentar o suporte de reativo para eliminar a sobrecarga.

#### 4.1.1.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga na linha 24-25, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. A exemplo das barras, as indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade e os transformadores com fatores



de sensibilidade positivos e negativos estão separados em colunas distintas. Os valores das sensibilidades dos transformadores são dados em 1 MVar para cada variação de 0,01 un. nos tap dos transformadores.

**Tabela 4.5** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	9 – 25	3,0343	8 – 24	-6,8622
<b>2</b>	13 – 26	1,9056	2 – 9	-0,0276
<b>3</b>	11 – 27	1,4786	4 – 10	-0,0171
<b>4</b>	12 – 28	0,4637	14 – 23	-0,0066
<b>5</b>	1 – 8	0,0919	3 – 11	-0,0027
<b>6</b>	7 – 14	0,0108	6 – 13	-0,0025
<b>7</b>	5 – 12	0,0011		

**Tabela 4.6** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	9 – 25	2,5427	8 – 24	-6,3461
<b>2</b>	13 – 26	1,6120	12 – 28	-2,4278
<b>3</b>	11 – 27	1,0485	14 – 23	-1,0964
<b>4</b>	1 – 8	0,1623	7 – 14	-1,0733
<b>5</b>	5 – 12	0,1246	6 – 13	-0,8394
<b>6</b>			3 – 11	-0,8206
<b>7</b>			4 – 10	-0,6399
<b>8</b>			2 – 9	-0,6107

**Tabela 4.7** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	9 – 25	1,9519	8 – 24	-6,3078
<b>2</b>	1 – 8	1,3190	12 – 28	-3,1733
<b>3</b>			7 – 14	-3,0314
<b>4</b>			14 – 23	-2,6702
<b>5</b>			6 – 13	-2,2673
<b>6</b>			3 – 11	-2,2371
<b>7</b>			4 – 10	-1,8484
<b>8</b>			2 – 9	-1,5562
<b>9</b>			5 – 12	-0,8698
<b>10</b>			13 – 26	-0,2146
<b>11</b>			11 – 27	-0,0186

Os métodos CRIC-constante e Newton apresentam classificações semelhantes dos transformadores e os transformadores 8-24 e 9-25 apresentam valores de sensibilidade parecidos de acordo com os três métodos.

Na tabela 4.8 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema. Na primeira coluna são mostradas as linhas em que se encontram os transformadores. A segunda coluna apresenta a variação no tap do transformador. Nas colunas seguintes são apresentadas as variações nos fluxos ativo e reativo na linha. A quarta coluna mostra as sensibilidades dos transformadores, em MVar para cada 0,01 unidade de variação no tap. Na tabela 4.8 são apresentados o fluxo total na linha e o carregamento da linha 24-25, após a alteração dos taps dos transformadores.

**Tabela 4.8** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha 24-25 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Transformador</b> -	<b><math>\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(un.)</b>	<b><math>\Delta P_{jk}</math></b> <b>(MW)</b>	<b><math>\Delta Q_{jk}</math></b> <b>(MVar)</b>	<b><math>-\Delta Q_{jk}/\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(Mvar/0,01un)</b>	<b>Fluxo</b> <b>(MVA)</b>	<b>Carreg.</b> <b>(%)</b>
7 – 14	0,07	0,00	-0,34	0,0486	1065,10	100,39
8 – 24	-0,03	-2,30	-17,92	-5,9733	1059,04	99,82
9 – 25	0,07	-0,70	-24,07	3,4386	1059,34	99,84
11 – 27	0,05	-2,70	-16,65	3,3300	1058,92	99,80
12 – 28	0,20	-1,90	-9,51	0,4755	1061,22	100,02
13 – 26	0,05	-2,80	-14,99	2,9980	1059,17	99,83

Apesar de bem indicado pelos métodos CRIC-constante e Newton, uma mudança de 0,20 (cerca de 18%) no tap do transformador da linha 12 – 28 não é capaz de eliminar a sobrecarga. Uma variação maior em sua relação de transformação poderia ocasionar um aumento excessivo de tensão na barra 12, cuja tensão é controlada por este transformador. Além disso, existem opções melhores. Uma alteração bem menor nos taps dos transformadores 8-24 ou 11-27, por exemplo, seria suficiente para eliminar a sobrecarga.

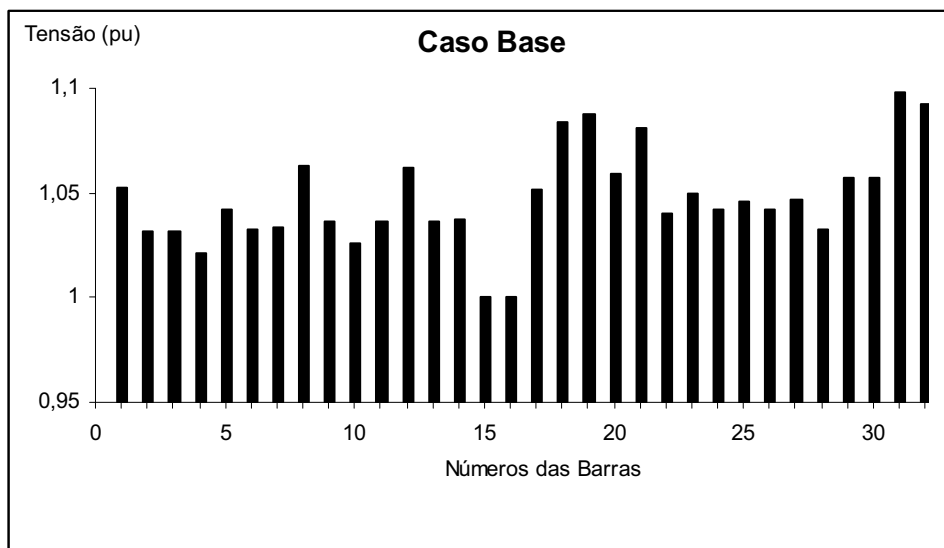
O transformador da linha 7–14 também não é capaz de aliviar a sobrecarga. Ele atinge o limite máximo de seu tap sem mesmo causar uma redução considerável no fluxo reativo da linha.

Apenas o método CRIC apresenta os sinais corretos das sensibilidades. Além disso, ele fornece uma boa linearização para este caso, com valores de sensibilidade bem próximos dos apresentados na tabela 4.8.

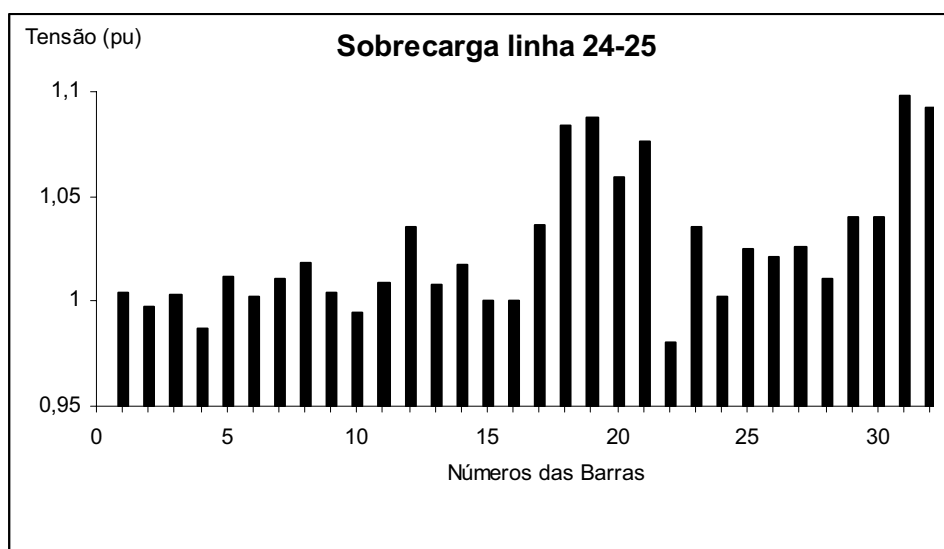
#### 4.1.1.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

As figuras 4.2 e 4.3 mostram o perfil de tensão do sistema Cigré de 32 barras antes e depois da ocorrência da sobrecarga na linha 24-25.

É possível perceber uma redução na tensão da barra 22, devido ao aumento da carga desta barra para causar a sobrecarga no sistema. As tensões das demais barras PQ do sistema também sofrem uma redução. A barra que apresenta maior tensão no sistema após a transferência é a barra 31. Para estas condições, a tensão na barra 22 é de 0.980 pu e na barra 31 é de 1.098 pu.

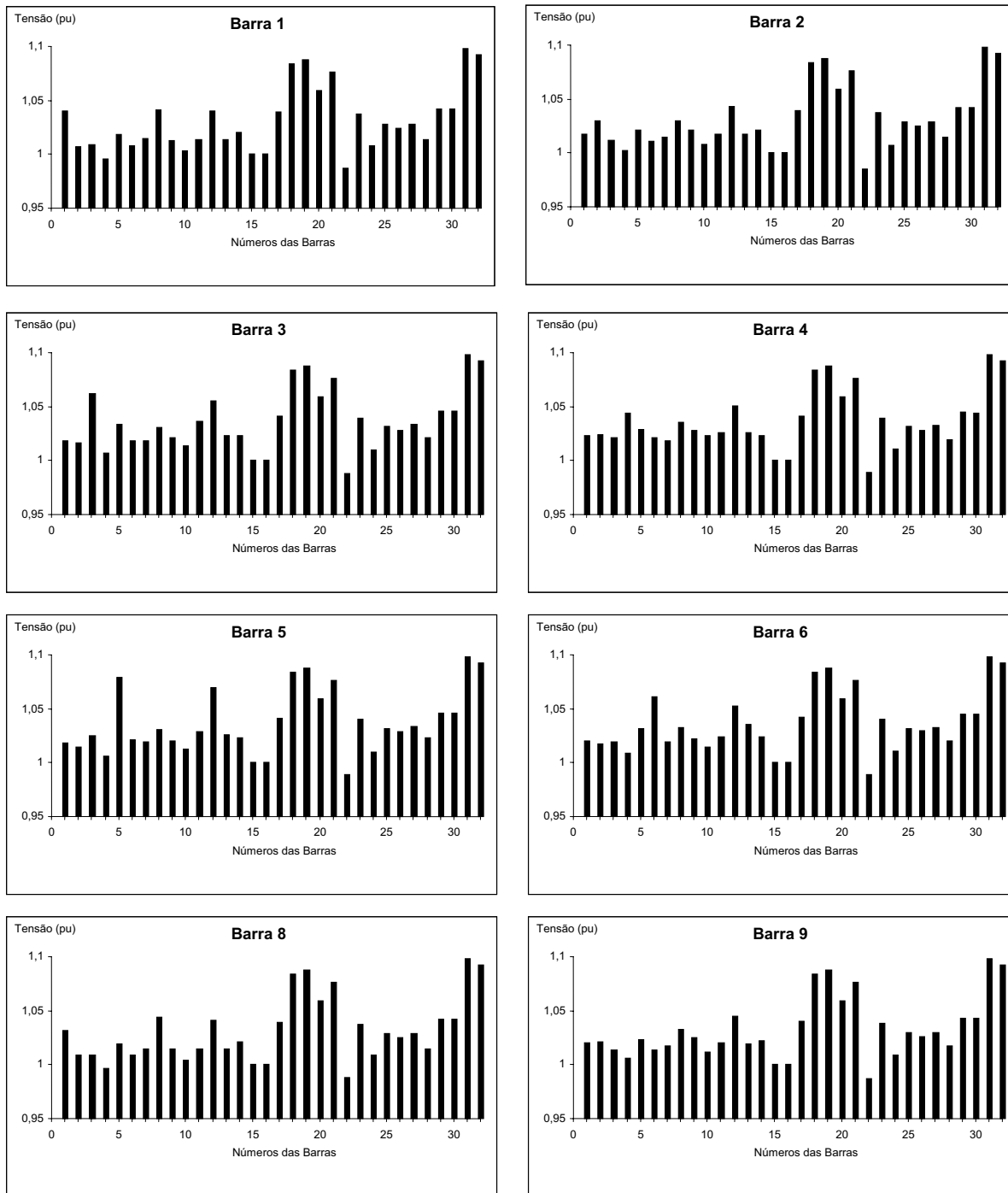


**Figura 4.2** – Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras no caso base.

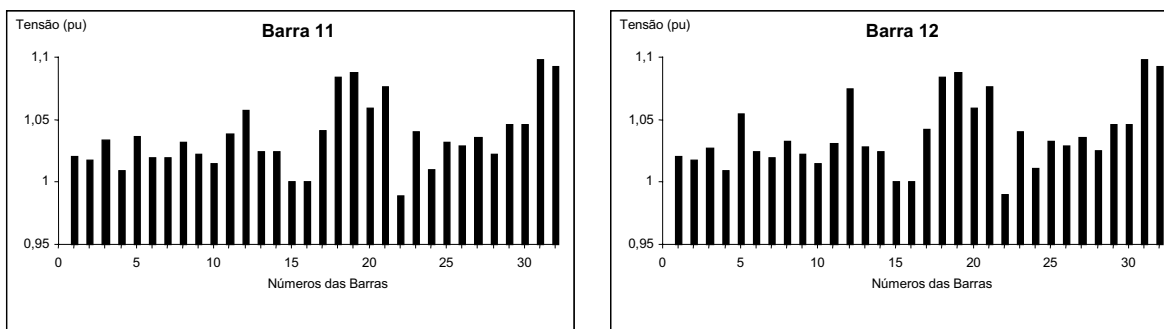


**Figura 4.3** – Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras com sobrecarga na linha 24-25.

Cada ação indicada na tabela 4.4 altera o perfil de tensão do sistema. Como ocorreu uma transferência de potência de grande magnitude, as tensões com a ocorrência da sobrecarga estão bem mais baixas do que no caso base. As figuras 4.4.1 e 4.4.2 ilustram o perfil de tensão do sistema para cada ação apresentada na tabela 4.4.



**Figura 4.4.1** – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25.



**Figura 4.4.2** – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25.

Para verificar se a ação é realizável de maneira segura para o sistema, é necessário que a sobrecarga seja eliminada sem que ocorram grandes variações de tensão em nenhuma das barras. Na figura 4.4, o perfil referente à alteração em uma determinada barra é aquele identificado pelo número da barra na figura.

Nenhuma das ações tomadas causa picos ou afundamentos de tensão no sistema. Contudo, pode-se observar um aumento considerável nas tensões das barras 3, 4, 5 e 6, quando estas sofrem alterações em seus suportes de reativos. A alteração na barra 9 é o que leva as tensões do sistema o mais próximo do caso base. A tabela 4.9 mostra a variação de tensão nas barras ( $\Delta V_{\text{barra}}$ ), quando seu suporte de reativos é alterado e a menor ( $V_{\text{mín}}$ ) e maior ( $V_{\text{máx}}$ ) tensão do sistema e as barras onde elas ocorrem.

**Tabela 4.9** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha 24-25 através da alteração do suporte de reativos das barras.

<b>Barras</b>	<b><math>\Delta V_{\text{barra}}</math> (%)</b>	<b><math>V_{\text{mín}}</math> (pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\text{mín}}</math></b>	<b><math>V_{\text{máx}}</math> (pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\text{máx}}</math></b>
1	3,59	0,987	22	1,098	31
2	3,29	0,986	22	1,098	31
3	5,25	0,988	22	1,098	31
4	5,79	0,989	22	1,098	31
5	6,62	0,989	22	1,098	31
6	5,99	0,989	22	1,098	31
8	2,55	0,988	22	1,098	31
9	2,09	0,987	22	1,098	31
11	2,78	0,989	22	1,098	31
12	3,77	0,989	22	1,098	31

A barra 9 é a melhor opção para eliminação da sobrecarga na linha 24-25, pois apresenta boa sensibilidade e a alteração de seu suporte de reativos para eliminar a sobrecarga causa uma variação da sua tensão de apenas 2,09%.

Uma análise semelhante foi realizada para as ações dos transformadores. As variações das tensões nas barras de entrada e saída do transformador ( $\Delta V_i$  e  $\Delta V_o$ ) e a menor ( $V_{\min}$ ) e maior ( $V_{\max}$ ) tensão do sistema e as barras onde elas ocorrem são mostradas na tabela 4.10.

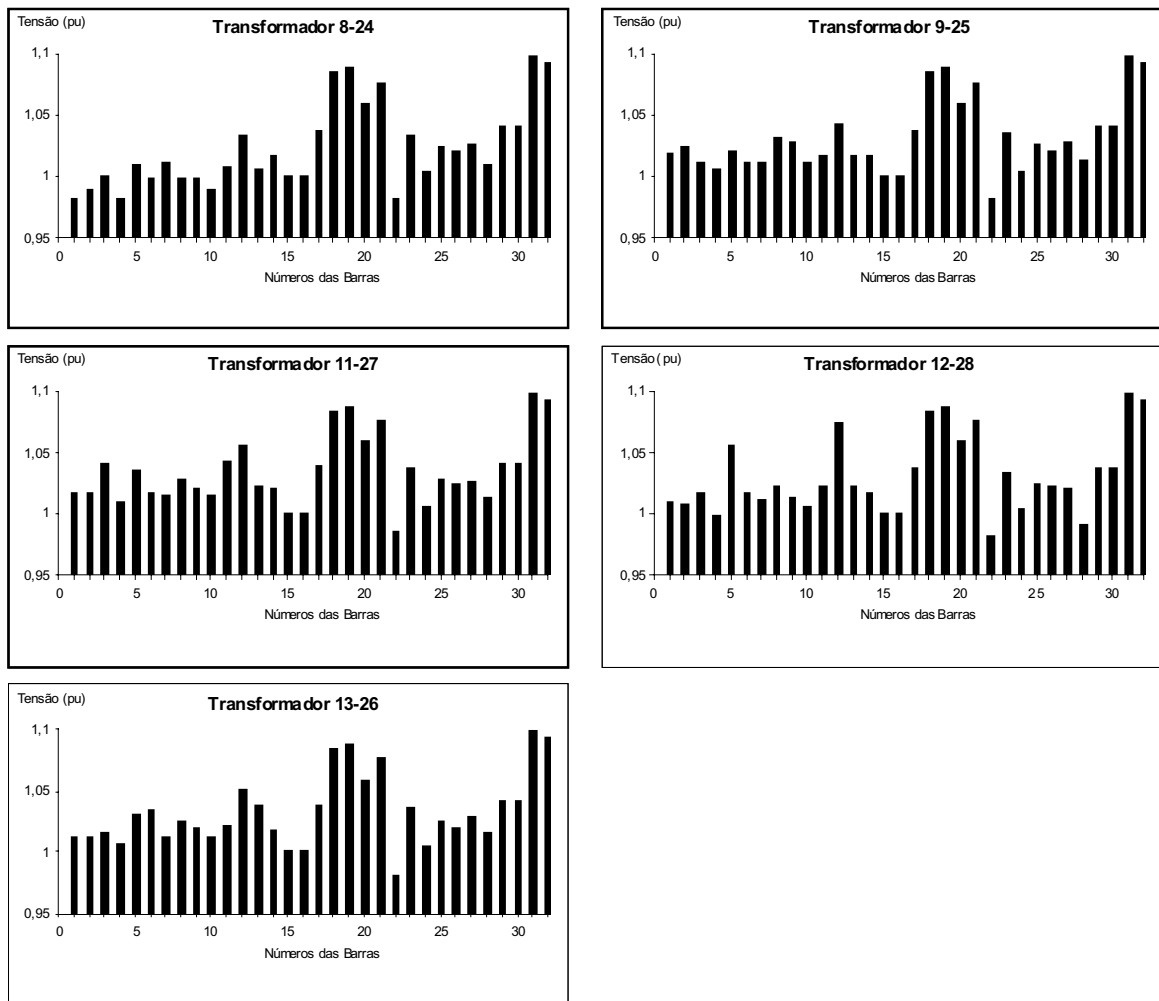
**Tabela 4.10** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha 24-25 através da alteração dos taps de transformadores.

<b>Transformador</b>	<b><math>\Delta V_i</math> (%)</b>	<b><math>\Delta V_o</math> (%)</b>	<b><math>V_{\min}</math> (pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\min}</math></b>	<b><math>V_{\max}</math> (pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\max}</math></b>
8 – 24	-2,06	0,10	0,981	22	1,098	31
9 – 25	2,29	0,00	0,982	22	1,098	31
11 – 27	3,37	0,00	0,985	22	1,098	31
12 – 28	3,86	-1,98	0,982	22	1,098	31
13 - 26	2,88	-0,20	0,981	22	1,098	31

Os transformadores 8-24 e 9-25 são os que possuem maior sensibilidade a linha 24-25 e, conseqüentemente, precisam de uma menor variação em seus taps. Assim, são os que apresentam menor variação de tensão em seus terminais para eliminar uma sobrecarga nessa linha. Os gráficos dos perfis de tensão para os transformadores são mostrados na figura 4.5.

Pode-se observar que as alterações nos taps dos transformadores 11-27 e 12-28 são as que causam maiores variações de tensão. A alteração do tap do transformador 12-28 eleva excessivamente a tensão nas barras 5 e 12 e a alteração do tap do transformador 11-27 eleva a tensão da barra 3.

A tensão da barra 22 foi melhorada para todas as alterações realizadas no sistema. A tensão na barra 31 não foi alterada, como se era esperado, visto que é uma barra tipo PV, definida no caso base.



**Figura 4.5** - Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha 24-25.

#### 4.1.2 Eliminação de sobrecarga em transformadores

Realizando-se uma transferência de potência de 765 MW da barra 16 para a barra 12 do sistema, é causada uma sobrecarga no transformador da linha 13-26, cujo limite térmico é de 634,0 MVA. O fluxo na linha após a transferência é de  $(594,53 + j225,05)MVA = 635,70 \angle 20,73^\circ MVA$ , o que causa um carregamento de 100,3%.

##### 4.1.2.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são apresentadas as barras indicadas para eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente.

**Tabela 4.11** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>
1	6	0,6254		
2	4	0,4040		
3	5	0,3879		
4	12	0,3692		
5	9	0,3435		
6	11	0,3292		
7	2	0,3273		
8	3	0,3142		
9	8	0,2196		
10	1	0,2178		
11	15	0,2102		
12	14	0,1583		
13	22	0,1533		
14	7	0,1506		
15	18	0,1276		
16	31	0,1232		

O método CRIC indicou todas as barras com sensibilidade positiva, o que, teoricamente, leva a necessidade de aumento no suporte de reativos para todas as barras para eliminar a sobrecarga no transformador 13-26.

**Tabela 4.12** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>
1	6	0,1783	7	-0,3986
2			14	-0,3951
3			15	-0,3666
4			22	-0,3414
5			1	-0,2801
6			8	-0,2761
7			31	-0,1819
8			18	-0,1819
9			3	-0,1506
10			11	-0,1493
11			2	-0,1443
12			9	-0,1430
13			5	-0,0798
14			12	-0,0783
15			4	-0,0658



**Tabela 4.13** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensibilidade</b>
1	6	0,3245	7	-0,4701
2	4	0,0072	14	-0,4254
3			15	-0,3084
4			22	-0,2950
5			1	-0,2713
6			8	-0,2491
7			31	-0,1614
8			18	-0,1613
9			3	-0,1063
10			11	-0,0960
11			2	-0,0917
12			9	-0,0829
13			5	-0,0067
14			12	-0,0062

Os métodos CRIC-constante e Newton apresentaram resultados parecidos para este caso, apresentando praticamente todas as barras com sensibilidade negativa. Porém, a barra 6 é dada como a melhor classificada entre as barras com sensibilidade positiva pelos três métodos.

A tabela 4.14 mostra as barras capazes de eliminar a sobrecarga no transformador da linha 13 – 26.

**Tabela 4.14** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Barras</b>	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	<b>Fluxo</b> (MVA)	<b>Carreg.</b> (%)
1	40,0	-1,23	-8,92	0,2230	631,39	99,59
2	20,0	-0,23	-7,94	0,3970	632,72	99,80
3	30,0	-0,85	-11,93	0,3977	630,67	99,47
4	30,0	-0,03	-14,58	0,4860	630,67	99,47
5	20,0	-0,13	-11,00	0,5500	631,78	99,65
6	30,0	2,17	-23,26	0,7753	629,90	99,35
8	50,0	-1,23	-8,22	0,1644	631,63	99,63
9	30,0	-0,33	-10,86	0,3620	631,64	99,63
11	30,0	-0,73	-9,25	0,3083	631,80	99,65
12	20,0	-0,13	-10,41	0,5205	631,99	99,68
18	62,6	-0,73	-11,42	0,1824	631,06	99,54
22	101,3	-0,03	-7,45	0,0735	633,02	99,85

A barra 6 é apresentada com sensibilidade positiva pelos três métodos, e elimina a sobrecarga com um aumento de seu suporte de reativos. Todas as barras apresentam o mesmo comportamento, ou seja, necessitam de um aumento em seus suportes de reativos para que possam eliminar a sobrecarga. O único método que calcula corretamente os fatores de sensibilidade para todas as barras, apresentando-as com o mesmo sinal, é o método CRIC.

#### 4.1.2.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente.

**Tabela 4.15** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>
<b>1</b>	11 - 27	5,1681	13 – 26	-24,4627
<b>2</b>	12 – 28	4,3811	6 – 13	-0,1693
<b>3</b>	9 – 25	4,3568	4 – 10	-0,1153
<b>4</b>	8 – 24	1,9806	2 – 9	-0,0905
<b>5</b>	5 – 12	0,2075	3 – 11	-0,0850
<b>6</b>	1 – 8	0,0395	7 – 14	-0,0425
<b>7</b>	14 – 23	0,0276		

**Tabela 4.16** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>
<b>1</b>	11 - 27	5,4986	13 – 26	-25,6238
<b>2</b>	9 – 25	4,2370	14 – 23	-0,8750
<b>3</b>	12 – 28	2,8459	7 – 14	-0,8251
<b>4</b>	8 – 24	0,8867	1 – 8	-0,3181
<b>5</b>	6 – 13	0,3405	3 – 11	-0,2818
<b>6</b>	5 – 12	0,0469	2 – 9	-0,2817
<b>7</b>			4 – 10	-0,1155

**Tabela 4.17** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Classificação</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensibilidade</b>
<b>1</b>	7 – 14	2,7162	13 – 26	-29,5970
<b>2</b>	14 – 23	2,4119	11 - 27	-6,1444
<b>3</b>	1 – 8	1,1416	9 – 25	-4,8129
<b>4</b>	3 – 11	0,5884	12 – 28	-3,7473
<b>5</b>	2 – 9	0,5145	6 – 13	-1,8080
<b>6</b>	5 – 12	0,0128	8 – 24	-0,7900
<b>7</b>			4 – 10	-0,0391

Como esperado, o próprio transformador 13-26 é apontado pelos três métodos como o mais eficiente na eliminação de sua sobrecarga.

Na tabela 4.18 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema. A apresentação dos resultados é realizada de maneira semelhante à utilizada no item anterior.

**Tabela 4.18** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga no transformador da linha 13-26 do sistema Cigré 32 barras.

<b>Transformador</b>	<b><math>\Delta\text{Tap}</math> (un.)</b>	<b><math>\Delta P_{jk}</math> (MW)</b>	<b><math>\Delta Q_{jk}</math> (MVar)</b>	<b><math>-\Delta Q_{jk}/\Delta\text{Tap}</math> (MVar/0,01un)</b>	<b>Fluxo (MVA)</b>	<b>Carreg. (%)</b>
1 – 8	0,08	-0,23	-1,78	0,2225	634,82	100,13
3 – 11	0,07	-0,23	-2,26	0,3229	634,72	100,11
4 – 10	0,07	-0,03	-3,16	0,4514	634,55	100,09
8 – 24	0,03	-1,23	-9,57	3,1900	631,22	99,56
9 – 25	0,02	0,57	-8,94	4,4700	633,13	99,86
11 – 27	0,02	-0,13	-19,20	9,6000	628,82	99,18
12 – 28	0,07	4,97	-20,56	2,9371	633,37	99,90
13 - 26	-0,01	-0,13	-15,24	-15,2400	630,32	99,42

Os transformadores das linhas 1 – 8, 3 – 11 e 4 – 10 não são capazes de eliminar a sobrecarga do sistema porque alcançam os limites superiores de suas relações de transformação. Além disso, esses transformadores possuem baixos valores de sensibilidade, o que faz com que os fatores de sensibilidade calculados por cada um dos métodos seja diferente, não permitindo concluir qual o comportamento real do fluxo reativo na linha quando ocorre uma variação nos taps destes transformadores.

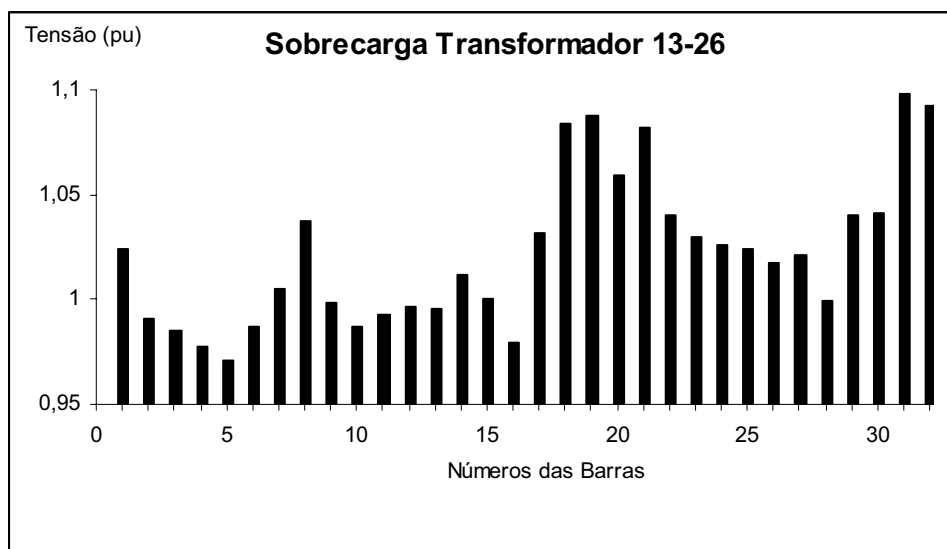
A alteração no tap do transformador 12 – 28 possui uma influência considerável sobre o fluxo ativo do transformador sobrecarregado. A variação do fluxo ativo possui

sinal contrário à variação do fluxo reativo causada por esta alteração, o que dificulta a eliminação da sobrecarga, sendo necessária uma variação maior no tap deste transformador.

Nenhum método indicou corretamente todos os transformadores e o valor de sensibilidade para o transformador 13 – 26 é menor do que os calculados.

#### 4.1.2.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

A figura 4.6 ilustra o perfil de tensão no sistema após a transferência de potência, com o transformador 13-26 operando sobrecarregado. Para esta situação, a barra de menor valor de tensão é a barra 5, com 0,971 pu e a de maior tensão é a barra 31, com 1,098 pu. É possível perceber uma redução nas tensões de praticamente todas as barras do sistema, especialmente nas barras 5, que é alimentada exclusivamente por uma linha com a barra 12, e nas barras 12 e 28.



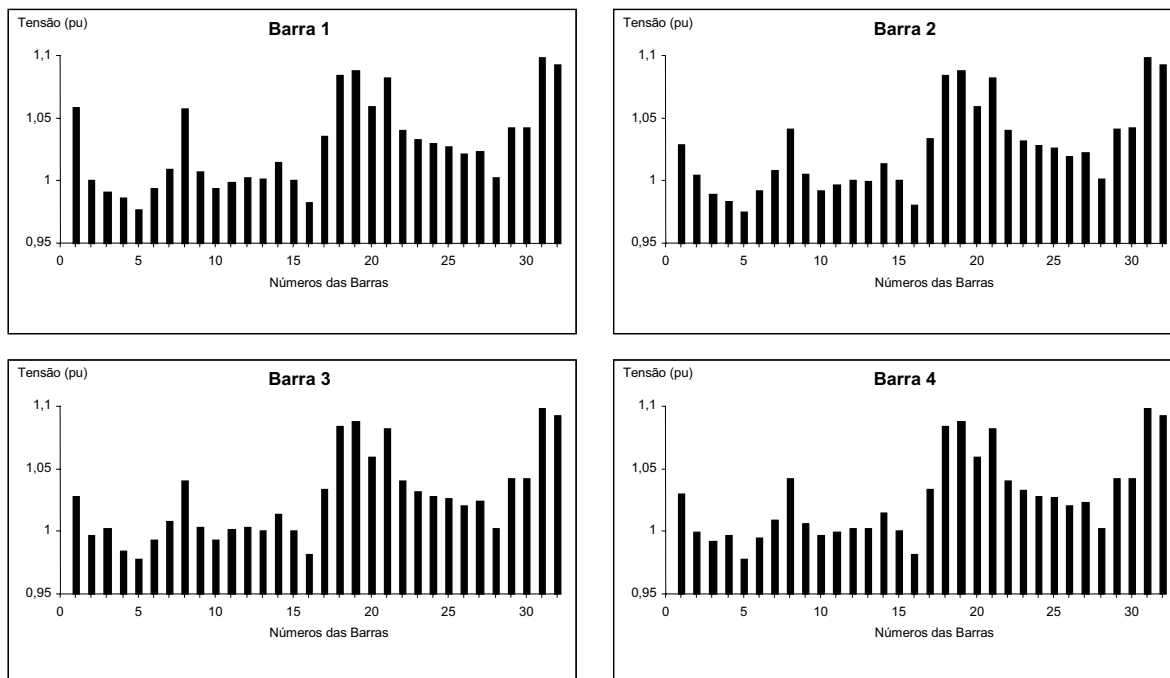
**Figura 4.6** - Perfil de tensão do sistema Cigre-32 barras com sobrecarga no transformador 13-26.

As variações das tensões das barras após as alterações em seus suportes de reativos para eliminação da sobrecarga no transformador 13-26 são apresentadas na tabela 4.19.

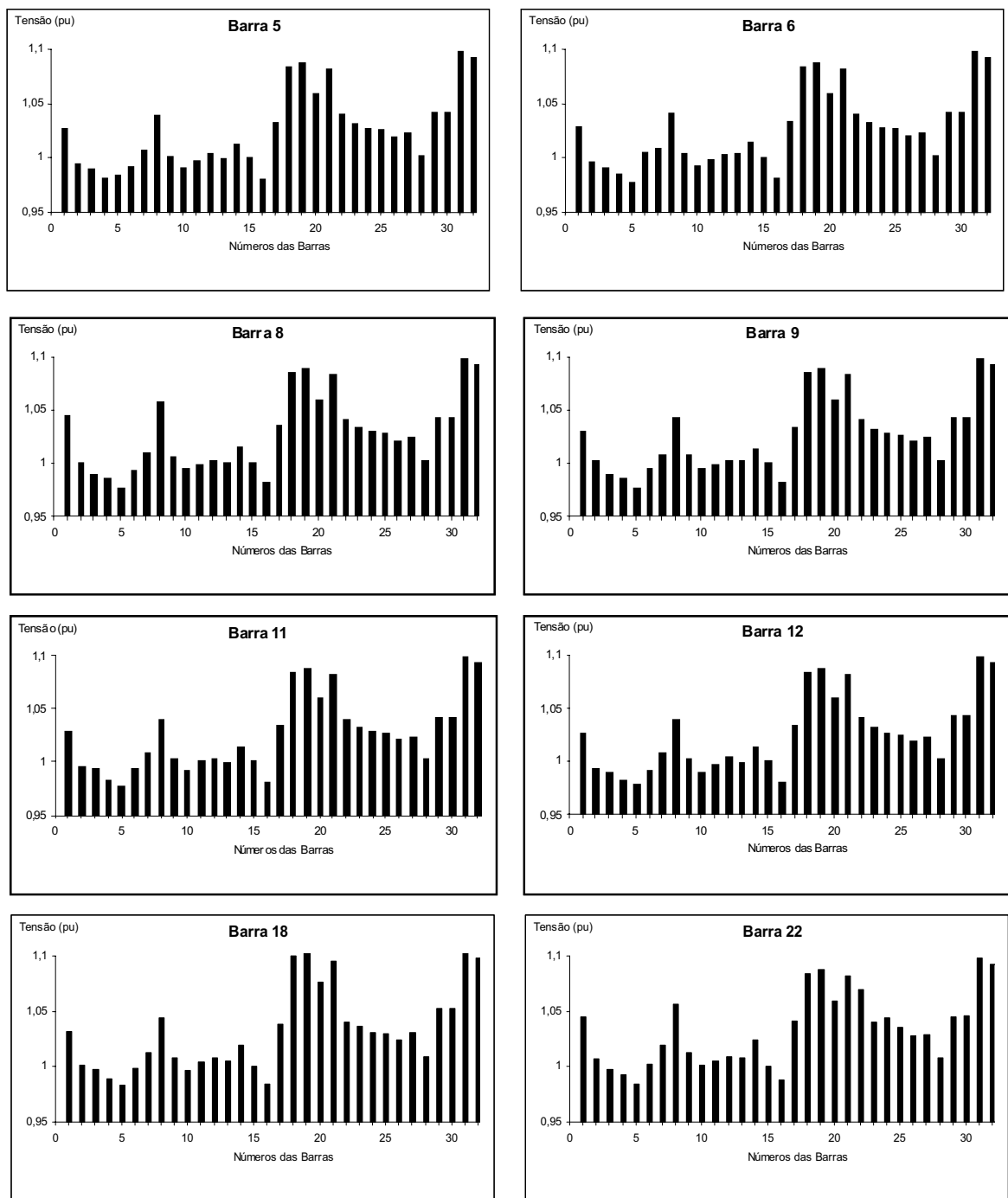
**Tabela 4.19** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26 através da alteração do suporte de reativos das barras.

Barras	$\Delta V_{\text{barra}}$ (%)	$V_{\text{mín}}$ (pu)	Barra $V_{\text{mín}}$	$V_{\text{máx}}$ (pu)	Barra $V_{\text{máx}}$
1	3,32	0,976	5	1,098	31
2	1,36	0,975	5	1,098	31
3	1,23	0,978	5	1,098	31
4	1,98	0,977	5	1,098	31
5	1,37	0,981	16	1,098	31
6	2,72	0,978	5	1,098	31
8	1,49	0,976	5	1,098	31
9	0,90	0,977	5	1,098	31
11	0,71	0,978	5	1,098	31
12	0,66	0,978	5	1,098	31
18	1,48	0,984	5	1,114	31
22	2,88	0,984	5	1,098	31

Nenhuma das barras apresentou grande variação em sua tensão para eliminar a sobrecarga no transformador 13-26. As figuras 4.7.1 e 4.7.2 ilustram os perfis de tensão do sistema, resultantes das ações propostas para a eliminação da sobrecarga.



**Figura 4.7.1** – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26.



**Figura 4.7.2** – Perfis de tensão após as alterações no suporte de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26.

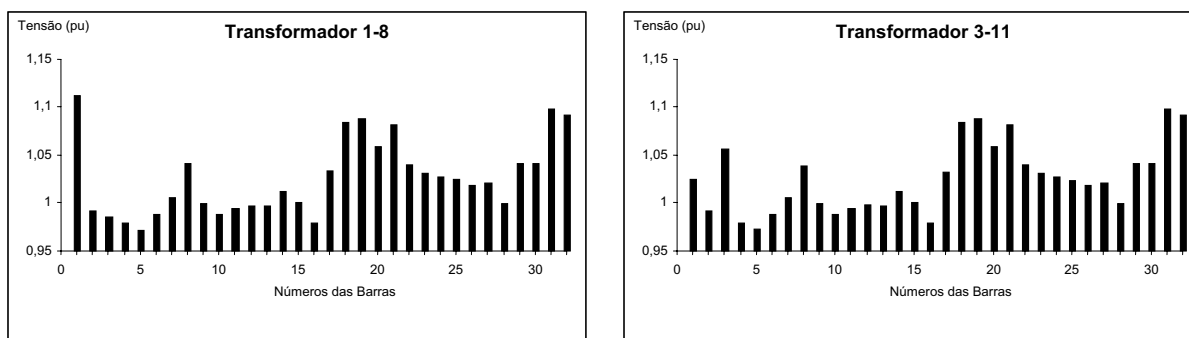
As alterações nas barras 1 e 18 afetam bastante seus níveis de tensão. A alteração do suporte de reativos da barra 18 também ocasiona um aumento excessivo na tensão da barra 31. As demais alterações não apresentaram grandes variações nas tensões do sistema. A alteração no suporte de reativos da barra 5 ocasiona uma melhoria nas tensões, colocando-as dentro de um intervalo de variação um pouco menor.

O comportamento das tensões das barras em relação à variação dos taps dos transformadores para eliminar a sobrecarga no transformador 13-26 é descrito na tabela 4.20.

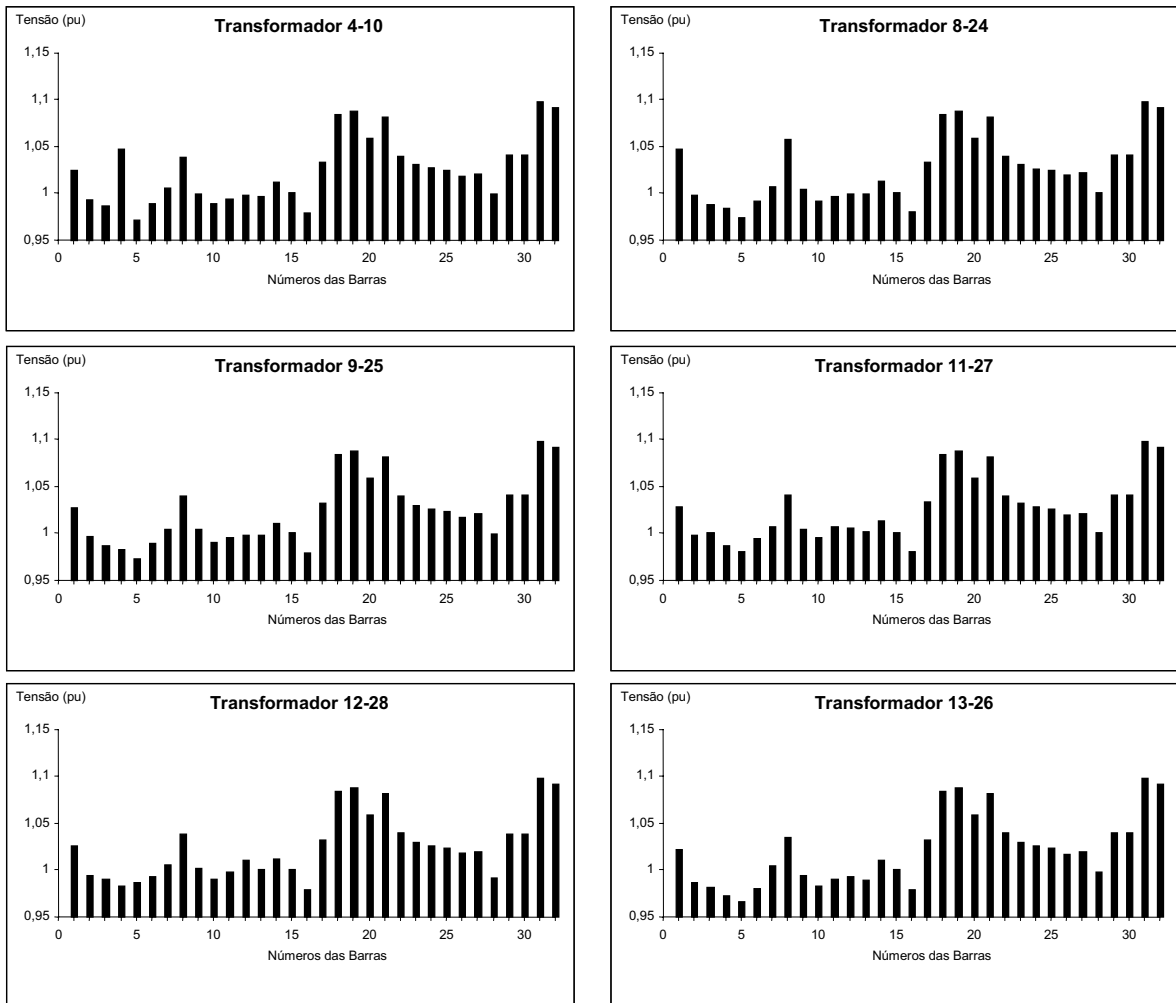
**Tabela 4.20** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26 através da alteração dos taps de transformadores.

<b>Transformador</b>	$\Delta V_i$ <b>(%)</b>	$\Delta V_o$ <b>(%)</b>	$V_{\min}$ <b>(pu)</b>	<b>Barra</b> $V_{\min}$	$V_{\max}$ <b>(pu)</b>	<b>Barra</b> $V_{\max}$
1 – 8	8,59	0,38	0,972	5	1,112	1
3 – 11	7,22	0,20	0,972	5	1,098	31
4 – 10	7,20	0,24	0,972	5	1,098	31
8 – 24	2,03	0,00	0,974	5	1,098	31
9 – 25	0,70	0,00	0,973	5	1,098	31
11 – 27	1,41	0,00	0,981	16	1,098	31
12 – 28	1,46	-0,69	0,979	16	1,098	31
13 - 26	-0,63	0,00	0,967	5	1,098	31

As alterações nos transformadores 1-8, 3-11 e 4-10 causam uma elevação nas tensões das barras controladas (1, 3 e 4). No caso do transformador 1-8, a barra 1 passa a ser a barra de maior tensão do sistema. Assim, as realizações destas ações para o controle do fluxo reativo no transformador 13-26 se tornam inviáveis. A figura 4.8 ilustra o comportamento das tensões em todas as barras devido a cada alteração nos taps dos transformadores.



**Figura 4.8.1** - Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26.



**Figura 4.8.2** - Perfis de tensão após as alterações de taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador 13-26.

Com exceção dos transformadores 1-8, 3-11 e 4-10, a alteração nos taps não comprometeu o comportamento das tensões do sistema. Para todos os casos, com exceção do transformador 13 - 26, houve um aumento nas tensões de praticamente todas as barras do sistema.

## 4.2 Sistema Sul-Sudeste brasileiro

Para o sistema Sul-sudeste brasileiro foram realizados quatro testes, sendo dois com sobrecargas em linhas de transmissão e dois com sobrecarga em transformadores. Utilizaram-se duas configurações do sistema, ambas sob carga pesada: julho/2005, que possui 3407 barras e 4845 linhas com 1749 transformadores e 287 geradores distribuídos em 55 áreas; e fevereiro/2006, que possui 3438 barras e 4918 linhas com 1771



transformadores e 291 geradores distribuídos em 55 áreas. Para os dois casos são tomadas como referência no fluxo de potência a UHE de Serra da Mesa (36). Os casos utilizados e os testes que serão realizados neste sistema foram obtidos através de [49].

Foram analisadas sobrecargas em uma linha que alimenta o litoral, entre Embaguaçu e Parelheiros, baseado no caso de fevereiro de 2006; e na linha ente as subestações de Araraquara e São Carlos, baseado no caso de julho de 2005. Este último é um caso crítico deste sistema, tanto que já existe uma licitação para a construção de outra linha entre estas subestações.

A ocorrência de sobrecarga nos transformadores de Jupia 440/138 kV e de Santa Bárbara 440/138 kV são outros dois casos frequentes na rede de transmissão da CTEEP, e que foram analisados neste trabalho. Ambos foram baseados no caso de julho de 2005. A figura 4.9 ilustra a rede de transmissão da CTEEP, onde foram concentradas as sobrecargas.

As sobrecargas neste sistema foram obtidas baseadas nos resultados do cálculo da ATC [5] e [6], e realizando-se transferências de potência maiores do que as margens de segurança indicadas.

Por se tratar de um sistema de grande porte, são apresentadas apenas as 10 indicações com maiores sensibilidades para barras e transformadores, positivas e negativas, sendo que apenas as ações melhores classificadas foram realizadas na tentativa de se eliminar a sobrecarga. Os nomes das barras e dos transformadores são apresentados, pois se trata de um sistema real e os nomes podem definir melhor do que os números a localização dos elementos da rede. A numeração e a nomenclatura apresentada segue a configuração do ONS.

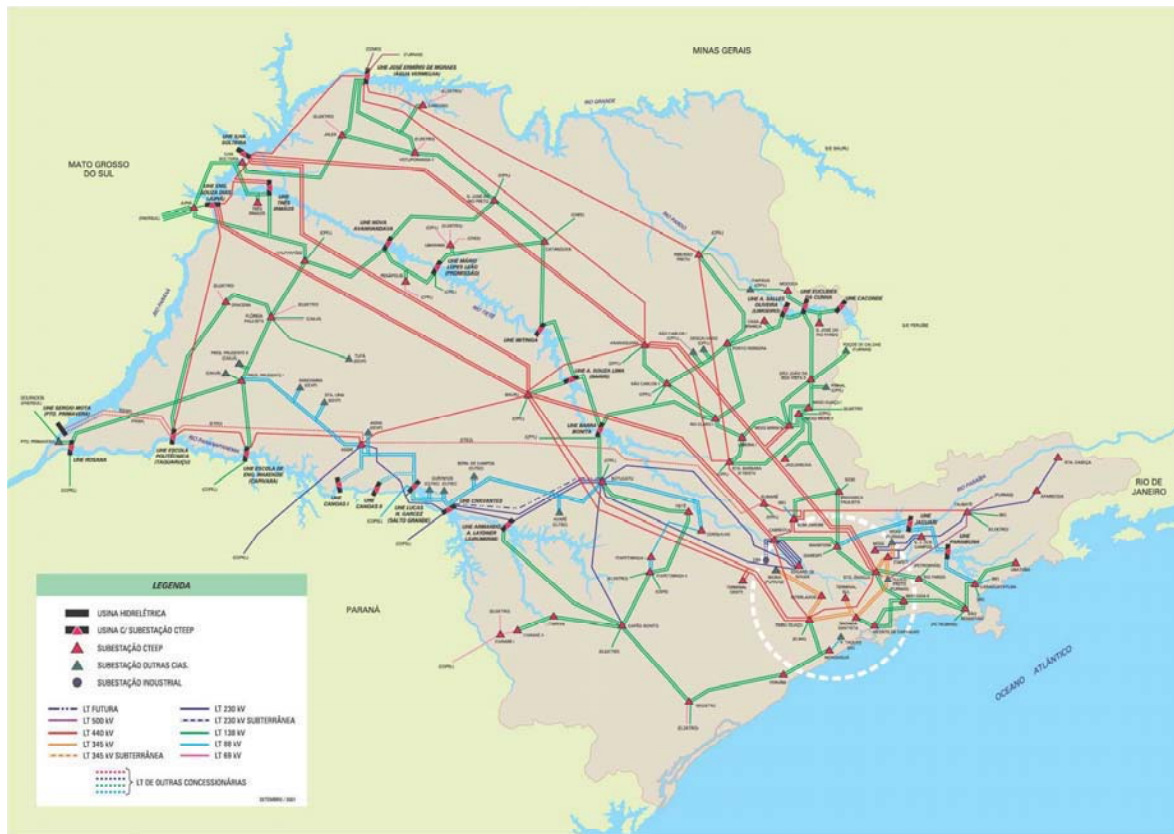


Figura 4.9 - Rede de Transmissão da CTEEP.

#### 4.2.1 Eliminação de sobrecarga na linha de transmissão Embaguaçu - Parelheiros

Durante o verão são comuns os congestionamentos em linhas de transmissão que alimentam o litoral. Este caso é baseado na configuração de carga pesada prevista para o mês de fevereiro de 2006 e considera um aumento de carga em Monguagá. O cálculo da ATC fornece uma transferência factível de 12,6 MW de Ilha Solteira (501) para Monguagá (3927).

Realizando-se uma transferência de potência de 13,0 MW de Ilha Solteira (501) para Monguagá (3927), é causada uma sobrecarga na linha Embaguaçu - Parelheiros (583 – 739), cujo limite térmico é de 96,0 MVA e que no case base já possui um carregamento de 89,3%. O fluxo na linha após a transferência é de  $(95,378 + j13,491)MVA = 96,32\angle 8,05^\circ MVA$ , o que causa um carregamento de 100,3%.

#### 4.2.1.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.21, 4.22 e 4.23 são apresentadas as barras indicadas para o alívio da sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros (583 – 739), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. As indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade. As barras com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas. Os nomes e números das barras são apresentados de acordo como aparecem no arquivo de dados do sistema.

**Tabela 4.21** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	MONGAGU-Y138 (744)	0,6219		
2	ITANHA-Y-138 (2029)	0,3040		
3	PERUIBE--138 (746)	0,2043		
4	REGISTRO-138 (747)	0,1357		
5	CBONITO--138 (624)	0,0667		
6	ITAPETI2-138 (741)	0,0579		
7	TIETE----138 (748)	0,0435		
8	JURUMIRI-2GR (506)	0,0312		
9	CHAVANTE-3GR (514)	0,0240		
10	B.BONITA-4GR (516)	0,0198		

O método CRIC forneceu todas as indicações com sensibilidade positiva, o que significa que, para este método, as ações para reduzir o fluxo reativo na linha Embuguaçu – Parelheiros são sempre no sentido de aumentar o suporte de reativos das barras.

**Tabela 4.22** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	MONGAGU-Y138 (744)	0,6224	EMBU-GUA-1CS (532)	-0,0023
2	ITANHA-Y-138 (2029)	0,3032	OESTE----088 (415)	-0,0017
3	PERUIBE--138 (746)	0,2039	BANDEIR-34 (494)	-0,0009
4	REGISTRO-138 (747)	0,1399	PIRATINI-088 (485)	-0,0008
5	CBONITO--138 (624)	0,0712	BANDEIRA-088 (493)	-0,0008
6	ITAPETI2-138 (741)	0,0648	SUL2-----88 (476)	-0,0008
7	TIETE----138 (748)	0,0469	SUL1-----88 (475)	-0,0008
8	JURUMIRI-2GR (506)	0,0278	M.FORNAS--88 (496)	-0,0006
9	BOTUCATU--88 (2040)	0,0215	BAIXADA--088 (473)	-0,0005
10	CHAVANTE-3GR (514)	0,0188	S.ANGELO-1CS (533)	-0,0005

**Tabela 4.23** – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha Embaguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	MONGAGU-Y138 ( <b>744</b> )	0,6112	ROSANA---4GR ( <b>511</b> )	-0,0057
<b>2</b>	ITANHA-Y-138 ( <b>2029</b> )	0,3251	JUPIA138-2GR ( <b>503</b> )	-0,0040
<b>3</b>	PERUIBE--138 ( <b>746</b> )	0,2213	APARECID-088 ( <b>459</b> )	-0,0013
<b>4</b>	REGISTRO-138 ( <b>747</b> )	0,1574	BAIXADA--088 ( <b>473</b> )	-0,0012
<b>5</b>	CBONITO--138 ( <b>624</b> )	0,0831	LESTE----088 ( <b>465</b> )	-0,0012
<b>6</b>	ITAPETI2-138 ( <b>741</b> )	0,0774	RAMON R F-88 ( <b>467</b> )	-0,0012
<b>7</b>	TIETE----138 ( <b>748</b> )	0,0568	SUL1-----88 ( <b>475</b> )	-0,0011
<b>8</b>	BOTUCATU--88 ( <b>2040</b> )	0,0322	SUL2-----88 ( <b>476</b> )	-0,0011
<b>9</b>	JURUMIRI-2GR ( <b>506</b> )	0,0321	N.AVANHA-2GR ( <b>518</b> )	-0,0011
<b>10</b>	CHAVANTE-3GR ( <b>514</b> )	0,0233	EMBU-GUA-1CS ( <b>532</b> )	-0,0010

As indicações das barras com sensibilidades positivas são praticamente iguais para os três métodos, inclusive os valores dos fatores de sensibilidade apresentados por cada um. As indicações de barras com sensibilidade negativa pelos métodos CRIC-constante e Newton o apresentam valores de sensibilidade muito baixos, que indicam que essas barras possuem praticamente nenhum efeito sobre o fluxo reativo na linha sobrecarregada.

Na tabela 4.24 são mostradas algumas das barras utilizadas na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema. A primeira coluna refere-se às barras cujos suportes de reativos serão alterados, ordenadas de acordo com seus números; na segunda coluna são apresentadas as variações realizadas em seus suportes de reativos. As terceira e quarta colunas apresentam as variações dos fluxos ativo e reativo na linha sobrecarregada. Na quinta coluna é apresentada a sensibilidade entre a variação do fluxo reativo na linha ( $\Delta Q_{jk}$ ) pela variação do suporte de reativos na barra  $i$  ( $\Delta Q_i$ ). A sexta coluna mostra o fluxo total e a última coluna apresenta o carregamento da linha após a alteração do suporte de reativos nas barras.

O sinal negativo na determinação da sensibilidade deve-se ao fato de que a sensibilidade é definida por  $S_u = -(\Delta x / \Delta u)$ . É importante observar a variação do fluxo ativo, mesmo sabendo que ela é bem menor do que a variação do fluxo reativo, pois há casos em que estas variações possuem sinais contrários, o que pode tornar mais difícil eliminar a sobrecarga na linha.

**Tabela 4.24** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Barras</b> -	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	<b>Fluxo</b> (MVA)	<b>Carreg.</b> (%)
JURUMIRI-2GR (506)	29,1	-0,288	-0,701	0,0241	95,95	99,94
CHAVANTE-3GR (514)	77,3	-0,558	-1,291	0,0167	95,60	99,59
B.BONITA-4GR (516)	56,0	-0,278	-0,831	0,0148	95,94	99,94
CBONITO--138 (624)	20,0	-0,488	-1,951	0,0976	95,59	99,57
ITAPETI2-138 (741)	20,0	-0,458	-1,721	0,0861	95,65	99,63
MONGAGU-Y138 (744)	8,0	0,552	-7,231	0,9039	96,13	100,13
PERUIBE—138 (746)	20,0	0,042	-6,051	0,3026	95,71	99,70
REGISTRO-138 (747)	20,0	-0,248	-4,041	0,2021	95,60	99,58
TIETE----138 (748)	20,0	-0,398	-1,181	0,0591	95,77	99,77
ITANHA-Y-138 (2029)	20,0	0,322	-8,841	0,4421	95,82	99,81
BOTUCATU--88 (2040)	50,0	-0,248	-1,091	0,0218	95,93	99,93

A barra MONGAGU-Y138 (744) não eliminou a sobrecarga, apesar de ter apresentado a sensibilidade mais positiva pelos três métodos, pois o aumento da injeção de reativos nesta barra causa uma diminuição do fluxo reativo, mas também causa um aumento no fluxo ativo da linha sobrecarregada.

As barras que apresentaram melhor eficiência na eliminação da sobrecarga foram aquelas próximas à sobrecarga, como REGISTRO-138 (747) e PERUIBE—138 (746). Todas as barras apresentaram o mesmo comportamento em relação ao fluxo reativo, ou seja, necessitaram de um aumento na sua injeção de reativos para reduzir o fluxo reativo na linha sobrecarregada.

#### 4.2.1.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.25, 4.26 e 4.27 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu - Parelheiros (583 – 739), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. A exemplo das barras, as indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade e os transformadores com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.25** - Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	CABREUVA (590 – 584)	0,1527	C.BONITO (623 – 624)	-0,2577
2	A.VERMELHA (536 – 535)	0,1489	EMBUGUAÇU (583 – 581)	-0,2230
3	ASSIS (553 – 552)	0,1111	ASSIS (556 – 552)	-0,1725
4	TAUBATE (599 – 598)	0,0731	JURUMIRIM (618 – 620)	-0,1553
5	ARARAQUA (560 – 559)	0,0457	S.ANGELO (594 – 593)	-0,1341
6	ITAPETININGA (741 – 742)	0,0266	JURUMIRIM (618 – 619)	-0,1090
7	OESTE (415 – 414)	0,0169	ANHANGUERA (430 – 431)	-0,0846
8	S.BARBARA (568 – 567)	0,0141	CHAVANTES (616 – 615)	-0,0242
9	M.MIRIM (566 – 565)	0,0138	BOTUCATU (2040 – 626)	-0,0210
10			BANDEIRA (492 – 493)	-0,0206

**Tabela 4.26** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,3001	EMBUGUAÇU (583 – 581)	-0,7955
2	ITAPETININGA (741 – 742)	0,1371	C.BONITO (623 – 624)	-0,2902
3	ASSIS (553 – 552)	0,1365	JURUMIRIM (618 – 620)	-0,1358
4	CABREUVA (590 – 584)	0,1354	JURUMIRIM (618 – 619)	-0,0695
5	ARARAQUA (560 – 559)	0,0498	ANHANGUERA (430 – 431)	-0,0685
6	S.ANGELO (594 – 593)	0,0471	ASSIS (556 – 552)	-0,0181
7	S.BARBARA (568 – 567)	0,0358	BOTUCATU (625 – 626)	-0,0152
8	M.MIRIM (566 – 565)	0,0313	TAUBATE (599 – 598)	-0,0076
9	ASSIS (554 – 551)	0,0222	ITAPETININGA (449 – 448)	-0,0055
10			PIRITUBA (449 – 448)	-0,0045

**Tabela 4.27** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha Embuguaçu - Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	ITAPETININGA (741 – 742)	0,2219	EMBUGUAÇU (583 – 581)	-0,3808
2	ASSIS (553 – 552)	0,1879	C.BONITO (623 – 624)	-0,3172
3	CABREUVA (590 – 584)	0,1654	JURUMIRIM (618 – 620)	-0,1449
4	ARARAQUA (560 – 559)	0,0744	ANHANGUERA (430 – 431)	-0,1011
5	EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,0698	JUPIA (541 – 539)	-0,0857
6	ASSIS (554 – 551)	0,0670	S.ANGELO (594 – 593)	-0,0844
7	TAUBATE (599 – 598)	0,0614	ASSIS (556 – 552)	-0,0757
8	S.BARBARA (568 – 567)	0,0517	JURUMIRIM (618 – 619)	-0,0584
9	M.MIRIM (566 – 565)	0,0446	3IRMAOS (543 – 542)	-0,0444
10	CHAVANTES (616 – 615)	0,0427	BOTUCATU (625 – 626)	-0,0233

O transformador de EMBUGUAÇU (583-581) é dado pelos métodos Newton e CRIC-constante como a melhor ação a ser realizada para eliminar a sobrecarga. O método CRIC fornece como melhor ação a ser tomada a alteração do tap do transformador de C.BONITO (623-624).

O transformador de EMBUGUAÇU (582-581) é mostrado pelos métodos CRIC-constante e Newton como uma boa opção, apresentando o maior valor de sensibilidade positiva para o CRIC-constante. Contudo, este transformador não aparece nas indicações do método CRIC.

Na tabela 4.28 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema.

**Tabela 4.28** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu – Parelheiros do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

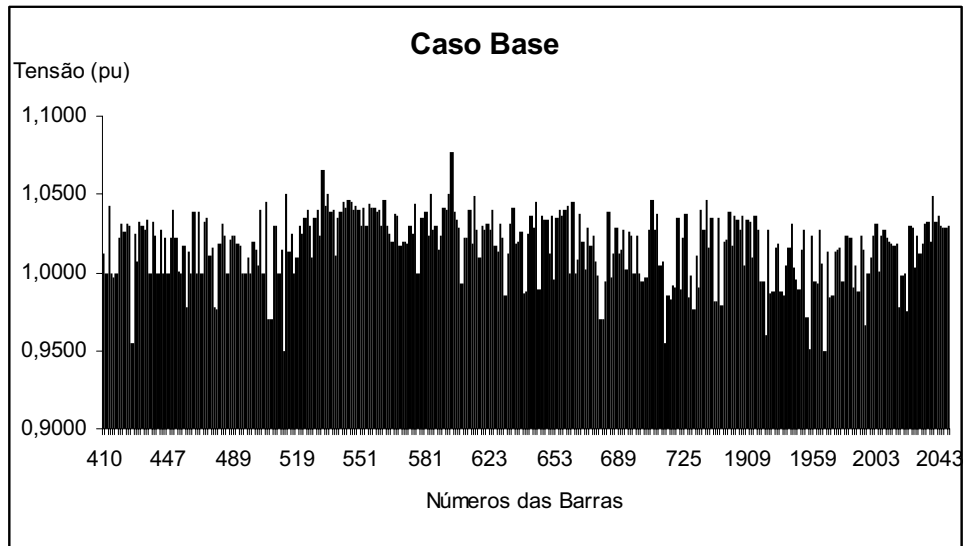
<b>Transformador</b> -	<b><math>\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(un.)</b>	<b><math>\Delta\text{P}_{jk}</math></b> <b>(MW)</b>	<b><math>\Delta\text{Q}_{jk}</math></b> <b>(MVar)</b>	<b><math>-\Delta\text{Q}_{jk}/\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(MVar/0,01un)</b>	<b>Fluxo</b> <b>(MVA)</b>	<b>Carreg.</b> <b>(%)</b>
ANHANGUERA (430 – 431)	-0,07	-0,28	-0,60	-0,0859	95,87	99,86
ASSIS (553 – 552)	0,10	-0,39	-0,56	0,0561	95,97	99,97
ARARAQUA (560 – 559)	0,10	-0,31	-0,23	0,0231	95,99	99,99
EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,03	-0,50	0,02	-0,0063	95,84	99,83
EMBUGUAÇU (583 – 581)	-0,03	-0,97	-0,33	-0,1103	95,32	99,29
CABREUVA (590 – 584)	0,06	-0,44	-0,84	0,1402	95,78	99,77
JURUMIRIM (618 – 619)	-0,05	-0,46	-0,87	-0,1742	95,76	99,75
JURUMIRIM (618 – 620)	-0,05	-0,65	-1,24	-0,2482	95,52	99,50
C.BONITO (623 – 624)	-0,05	-0,53	-2,00	-0,4002	95,54	99,52

O transformador que apresenta maior sensibilidade é o de C.BONITO (623-624), como indicado pelo método CRIC. O transformador de EMBUGUAÇU (582-581) só elimina a sobrecarga da linha Embuguaçu-Parelheiros porque possui forte influência sobre o fluxo ativo desta linha. O transformador de JURUMIRIM (618 – 620) apresenta a segunda maior sensibilidade, e é indicado com fatores de sensibilidade parecidos para os três métodos, aparecendo entre as ações mais indicadas por eles.

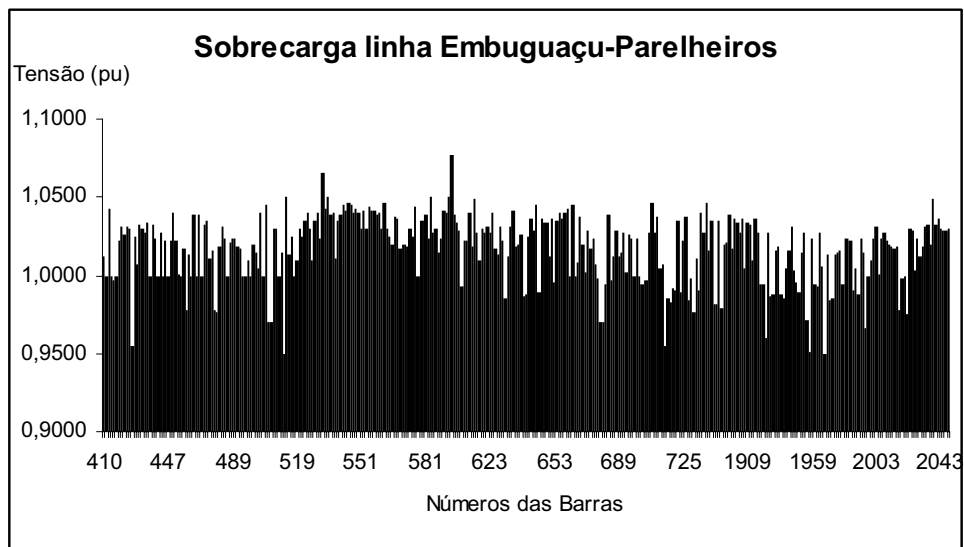
#### 4.2.1.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

As figuras 4.10 e 4.11 mostram os perfis de tensão do sistema de transmissão da CTEPP para a configuração de carga pesada de fevereiro de 2006, antes e depois da

ocorrência da sobrecarga na linha Embaguaçu-Parelheiros. Como a transferência que ocasiona a sobrecarga é pequena, não existem grandes alterações nos níveis de tensão.



**Figura 4.10** – Perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEPP no caso base de fevereiro de 2006.



**Figura 4.11** – Perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEPP com sobrecarga na linha Embaguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006.

A figura 4.12 ilustra os perfis de tensão referentes às alterações nos suportes de reativos das barras para eliminar a sobrecarga na linha Embaguaçu-Parelheiros. A figura 4.13 mostra um caso crítico, onde a alteração no suporte de reativos da barra 2040 causa uma variação de mais de 12% na tensão desta barra, o que descarta a possibilidade de se tomar esta ação.



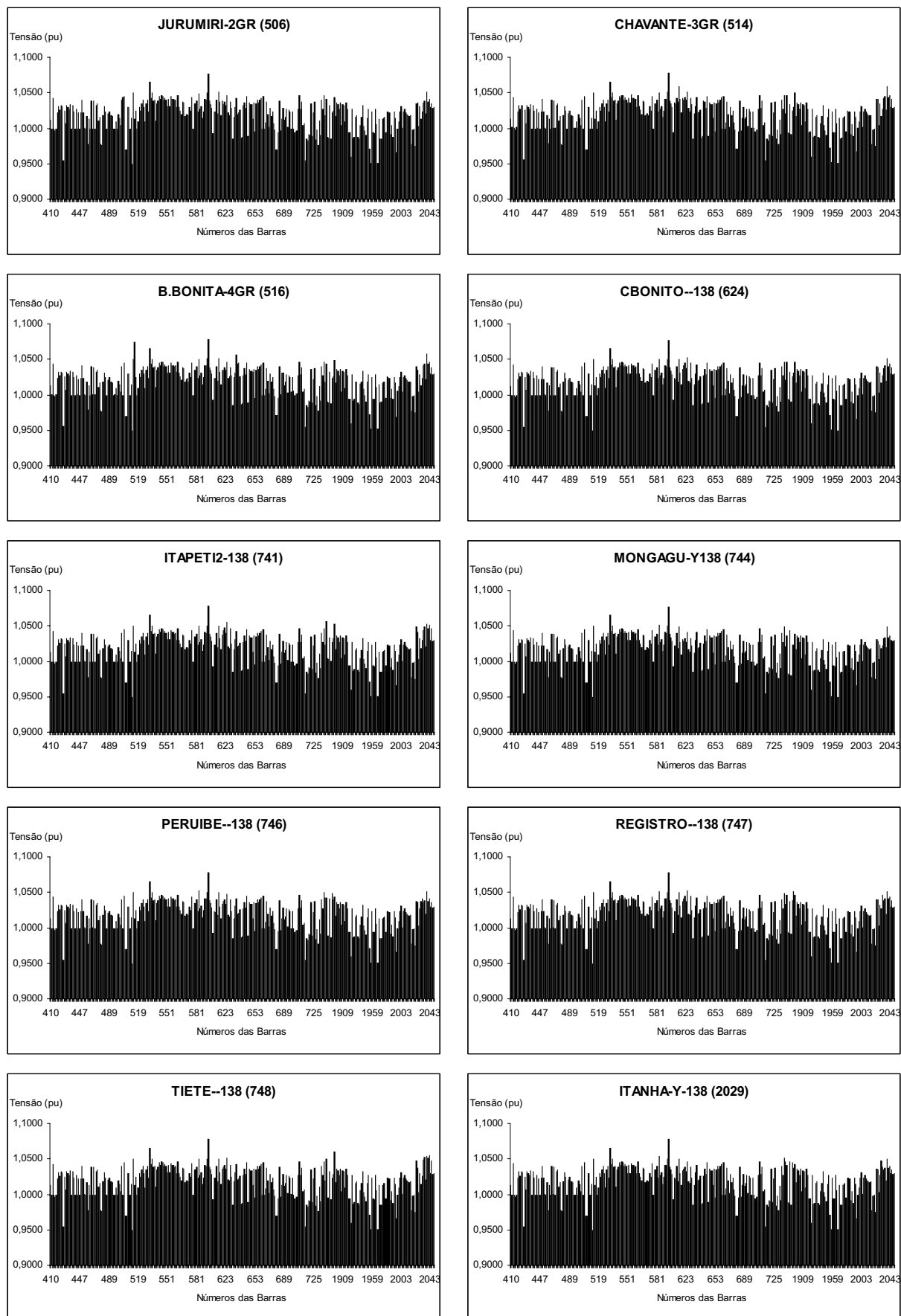
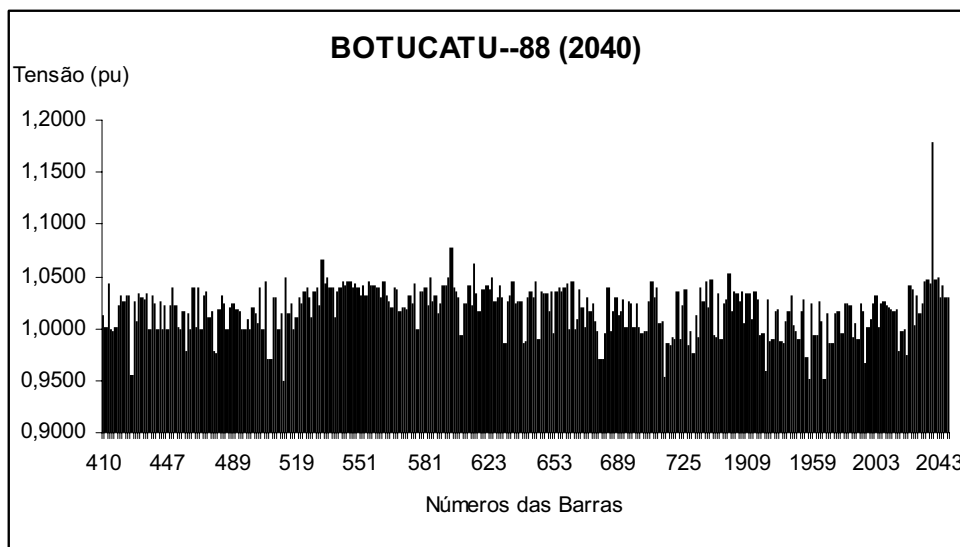


Figura 4.12 - Perfis de tensão após as alterações dos suportes de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha Embaguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006.



**Figura 4.13** - Perfil de tensão após a alteração do suporte de reativos da barra de Botucatu para a eliminação da sobrecarga na linha Embiguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006.

É possível observar que a alteração do suporte de reativos na barra de BOTUCATU—88 (2040) é capaz de eliminar a sobrecarga do sistema. Porém, o distúrbio de tensão causado por esta ação torna inviável esta ação. Na tabela 4.29 são mostradas as variações das tensões nas barras cujos suportes de reativos foram alterados, e os valores da menor e da maior tensão nas áreas referentes à rede de transmissão da CTEEP.

**Tabela 4.29** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Embiguaçu-Parelheiros através da alteração do suporte de reativos das barras.

<b>Barras</b>	$\Delta V_{\text{barra}}$ <b>(%)</b>	$V_{\text{mín}}$ <b>(pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\text{mín}}</math></b>	$V_{\text{máx}}$ <b>(pu)</b>	<b>Barra <math>V_{\text{máx}}</math></b>
JURUMIRI-2GR (506)	4,40	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,077	TAUBATE--500 (598)
CHAVANTE-3GR (514)	5,26	0,951	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,078	TAUBATE--500 (598)
B.BONITA-4GR (516)	6,02	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
CBONITO--138 (624)	1,25	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
ITAPETI2-138 (741)	2,13	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
MONGAGU-Y138 (744)	0,87	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
PERUIBE—138 (746)	2,84	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
REGISTRO-138 (747)	3,04	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
TIETE----138 (748)	2,02	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
ITANHA-Y-138 (2029)	3,56	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,078	TAUBATE--500 (598)
BOTUCATU--88 (2040)	12,39	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,079	TAUBATE--500 (598)

A tabela 4.29 mostra que a alteração do suporte de reativos das barras JURUMIRI-2GR (506), CHAVANTE-3GR (514), B.BONITA-4GR (516) e BOTUCATU--88 (2040) não são boas ações do ponto de vista das tensões.

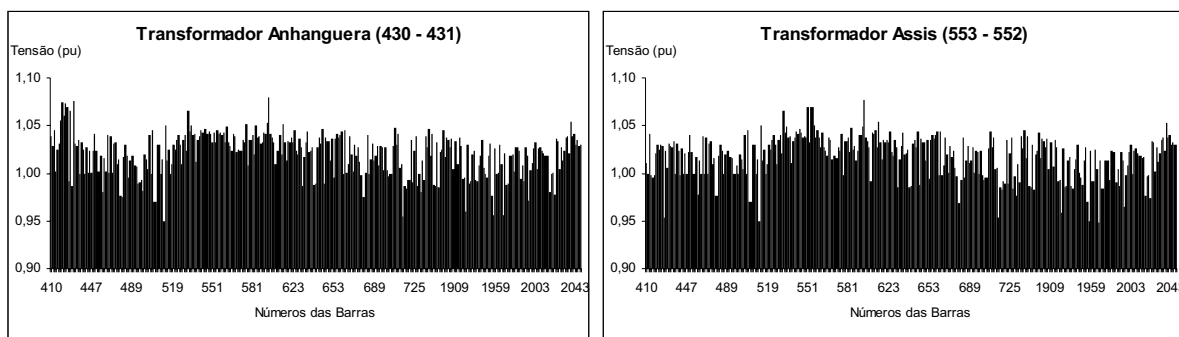
A tabela 4.30 mostra as variações de tensão resultantes das alterações nos taps dos transformadores.

**Tabela 4.30** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros através da alteração dos taps de transformadores.

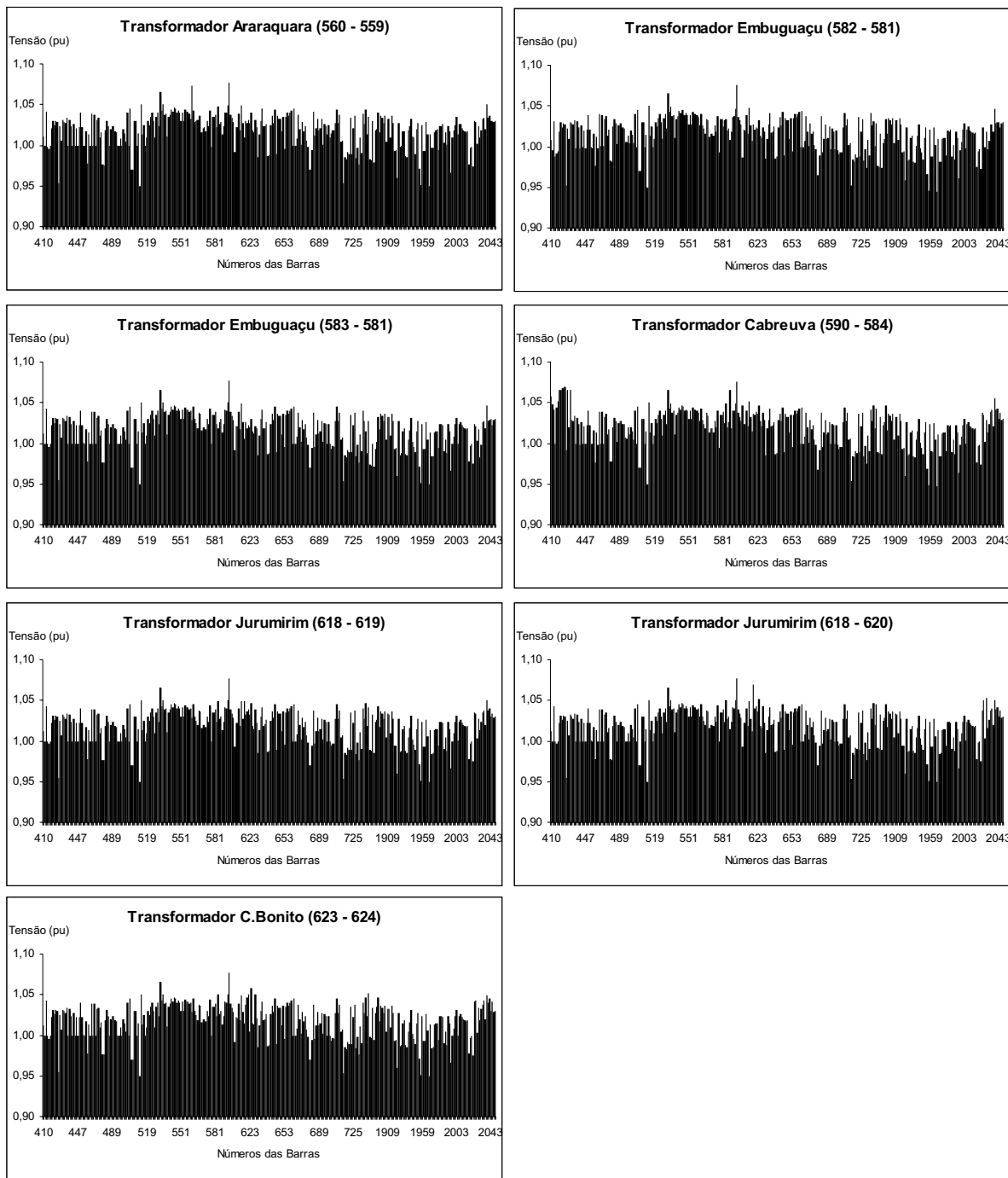
Transformador	$\Delta V_i$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$V_{\min}$ (pu)	Barra $V_{\min}$	$V_{\max}$ (pu)	Barra $V_{\max}$
ANHANGUERA (430 – 431)	-1,99	4,36	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,079	TAUBATE--500 (598)
ASSIS (553 – 552)	3,88	-0,86	0,949	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,077	TAUBATE--500 (598)
ARARAQUA (560 – 559)	4,28	-0,67	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,077	TAUBATE--500 (598)
EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,98	-1,35	0,945	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,076	TAUBATE--500 (598)
EMBUGUAÇU (583 – 581)	-2,96	0,00	0,950	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,077	TAUBATE--500 (598)
CABREUVA (590 – 584)	5,13	-0,58	0,948	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,077	TAUBATE--500 (598)
JURUMIRIM (618 – 619)	-0,10	3,96	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,076	TAUBATE--500 (598)
JURUMIRIM (618 – 620)	-0,10	3,79	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,077	TAUBATE--500 (598)
C.BONITO (623 – 624)	-2,14	1,83	0,950	CHAVANTE-3GR (514)	1,077	TAUBATE--500 (598)

Os transformadores ANHANGUERA (430 – 431), ARARAQUA (560 – 559) e CABREUVA (590 – 584) podem levar os níveis de tensão do sistema a níveis inseguros. Do ponto de vista das tensões, a melhor ação para se eliminar a sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros é a alteração do tap do transformados de EMBUGUAÇU (582-581).

As figuras 4.14.1 e 4.14.2 ilustram os perfis de tensão apresentados na tabela 4.30.



**Figura 4.14.1** - Perfis de tensão após as alterações dos taps dos transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguaçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006.



**Figura 4.14.2** - Perfis de tensão após as alterações dos taps dos transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Embuguauçu-Parelheiros no caso de fevereiro de 2006.

#### 4.2.2 Eliminação de sobrecarga na linha de transmissão Araraquara – São Carlos

A linha Araraquara – São Carlos (560-703) é um caso extremamente crítico, tanto que já existe um projeto em andamento para construção de mais uma linha entre as subestações. Este caso baseia-se na configuração de julho/2005 em carga pesada. O fluxo

de potência complexo nesta linha possui um ângulo muito pequeno, o que dificulta eliminar sua sobrecarga atuando-se apenas de maneira a reduzir seu fluxo reativo. Para este caso é necessário observar, também, o comportamento do fluxo ativo da linha.

Realizando-se uma transferência de potência de 111,0 MW de Ilha Solteira (501) para Rio Claro (701), é causada uma sobrecarga na linha Araraquara - São Carlos (560 – 703), cujo limite térmico é de 130,0 MVA. O fluxo na linha após a transferência é de  $(130,0 + j4,562)MVA = 130,08 \angle 2,01^\circ MVA$ , o que causa um carregamento de 100,06%.

#### 4.2.2.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.31, 4.32 e 4.33 são apresentadas as barras indicadas para alívio da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos (560 – 703), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. As indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade. As barras com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.31** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Barra	Sensib.	Barra	Sensib.
1	RCLARO-1-138 (701)	0,2169	I.SOLTE-19GR (501)	-0,0101
2	B.BONITA-4GR (516)	0,1511	T.IRMAOS-4GR (520)	-0,0088
3	BARIRI---2GR (515)	0,1510	JUPIA---12GR (502)	-0,0083
4	LIMEIR-1-138 (692)	0,1203	JUPIA138-2GR (503)	-0,0082
5	LIMOEIRO-2GR (523)	0,1080	N.AVANHA-2GR (518)	-0,0059
6	LIMEIR-4Y138 (1978)	0,1068	IBITINGA-3GR (517)	-0,0058
7	CACONDE—2GR (521)	0,1016	PROMISSA-3GR (519)	-0,0054
8	E.CUNHA--3GR (522)	0,0989	TAQUARUC-4GR (513)	-0,0044
9	TIETE----138 (748)	0,0727	P.PRIMA-12GR (510)	-0,0044
10	ITAPETI2-138 (741)	0,0584	CAPIVARA-4GR (507)	-0,0033

As barras com fatores de sensibilidade negativos apresentados pelo método CRIC apresentam baixas sensibilidades. Cinco das 10 barras com sensibilidade positivas e todas as barras com sensibilidade negativa são geradores. A barra que apresenta maior sensibilidade de acordo com este método é a barra RCLARO-1-138 (701), cujo aumento de carga ocasiona a sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos.

**Tabela 4.32** – Sensibilidades de barras pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	RCLARO-1-138 (701)	0,1794	I.SOLTE-19GR (501)	-0,0143
2	B.BONITA-4GR (516)	0,1272	T.IRMAOS-4GR (520)	-0,0130
3	BARIRI---2GR (515)	0,1234	JUPIA---12GR (502)	-0,0120
4	LIMOEIRO-2GR (523)	0,1027	IBITINGA-3GR (517)	-0,0117
5	LIMEIR-1-138 (692)	0,1024	PROMISSA-3GR (519)	-0,0117
6	CACONDE--2GR (521)	0,0950	JUPIA138-2GR (503)	-0,0086
7	E.CUNHA--3GR (522)	0,0939	N.AVANHA-2GR (518)	-0,0082
8	LIMEIR-4Y138 (1978)	0,0910	A.VERMEL-6GR (500)	-0,0075
9	TIETE----138 (748)	0,0580	P.PRIMA-12GR (510)	-0,0048
10	BOTUCATU--88 (2040)	0,0499	TAQUARUC-4GR (513)	-0,0026

**Tabela 4.33** – Sensibilidades de barras pelo método Newton para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	ROSANA---4GR (511)	0,6938	P.PRIMA-12GR (510)	-0,3758
2	JUPIA138-2GR (503)	0,1428	TAQUARUC-4GR (513)	-0,3653
3	S.GRANDE-4GR (512)	0,0537	CAPIVARA-4GR (507)	-0,3293
4	CANOAS-2-3GR (509)	0,0510	I.SOLTE-19GR (501)	-0,3142
5	CANOAS-1-3GR (508)	0,0457	IBITINGA-3GR (517)	-0,3039
6	LESTE----088 (465)	0,0115	JUPIA---12GR (502)	-0,3012
7	RAMON R F-88 (467)	0,0111	T.IRMAOS-4GR (520)	-0,2862
8			PROMISSA-3GR (519)	-0,2718
9			PIRITUBA-088 (422)	-0,2367
10			N.AVANHA-2GR (518)	-0,2249

O método CRIC-constante apresenta a classificação das barras de maneira semelhante ao CRIC. O método Newton apresenta indicações diferentes dos outros dois métodos, especialmente para as barras com sensibilidade positiva.

A tabela 4.34 mostra as barras utilizadas para aliviar a sobrecarga na linha.

**Tabela 4.34** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Barras</b>	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	<b>Fluxo</b> (MVA)	<b>Carreg.</b> (%)
I.SOLTE-19GR (501)	-172,0	-0,60	-1,00	-0,0058	129,49	99,61
B.BONITA-4GR (516)	16,7	0,10	-2,17	0,1299	130,14	100,11
LIMEIR-1-138 (692)	52,0	-0,30	-3,06	0,0589	129,75	99,81
RCLARO-1-138 (701)	-18,0	-0,10	1,70	0,0946	130,03	100,02
LIMEIR-4Y138 (1978)	26,0	-0,10	-1,37	0,0525	129,89	99,91

O alívio desta sobrecarga só foi possível devido à influência das ações de controle sobre o fluxo ativo da linha. Das barras capazes de eliminar ou aliviar a sobrecarga do sistema, somente a barra I.SOLTE-19GR (501) possui boa sensibilidade de acordo com os três métodos. A barra RCLARO-1-138 (701) é capaz de eliminar a sobrecarga, mas não apresenta a sensibilidade calculada pelos métodos CRIC e CRIC-constante.

#### 4.2.2.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.35, 4.36 e 4.37 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos (560 – 703), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente.

**Tabela 4.35** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	M.MIRIM (566 – 565)	1,5357	ARARAQUARA (560 – 559)	-4,3200
2	S.BARBARA (569 – 567)	1,2234	BOTUCATU (625 – 626)	-0,7764
3	RIB.PRETO (564 – 563)	0,6410	A.VERMELHA (536 – 535)	-0,3462
4	CABREUVA (590 – 584)	0,3496	BOTUCATU (2040 – 626)	-0,0878
5	ASSIS (553 – 552)	0,2282	JURUMIRIM (618 – 620)	-0,0692
6	EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,2164	ANHANGUERA (430 – 431)	-0,0551
7	EMBUGUAÇU (583 – 581)	0,1297	ITAPETININGA (449 – 448)	-0,0471
8	B.JARDIM (575 – 574)	0,0938	BANDEIRA (492 – 493)	-0,0376
9	S.ANGELO (594 – 593)	0,0914	JURUMIRIM (618 – 619)	-0,0371
10	S.ANGELO (595 – 593)	0,0823	C.BONITO (623 – 624)	-0,0343

**Tabela 4.36** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	M.MIRIM (566 – 565)	1,5195	ARARAQUARA (560 – 559)	-5,0551
2	S.BARBARA (569 – 567)	1,1685	BOTUCATU (625 – 626)	-0,6327
3	RIB.PRETO (564 – 563)	0,5314	A.VERMELHA (536 – 535)	-0,3172
4	EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,2884	C.BONITO (623 – 624)	-0,1192
5	S.ANGELO (594 – 593)	0,2826	TAUBATE (599 – 598)	-0,0506
6	CABREUVA (590 – 584)	0,2338	JURUMIRIM (618 – 620)	-0,0344
7	ASSIS (553 – 552)	0,2270	ANHANGUERA (430 – 431)	-0,0303
8	EMBUGUAÇU (583 – 581)	0,1149	A.VERMELHA (537 – 536)	-0,0246
9	B.JARDIM (575 – 574)	0,1014	BAURU (562 – 561)	-0,0221
10	S.ANGELO (595 – 593)	0,0827	ITAPETININGA (449 – 448)	-0,0220

**Tabela 4.37** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Transformador	Sensib.	Transformador	Sensib.
1	S.ANGELO (594 – 593)	14,1314	CABREUVA (590 – 584)	-13,3403
2	EMBUGUAÇU (582 – 581)	12,5495	A.VERMELHA (536 – 535)	-10,2078
3	JUPIA (541 – 539)	5,8405	ARARAQUARA (560 – 559)	-5,5544
4	ASSIS (553 – 552)	4,7433	TAUBATE (599 – 598)	-5,2858
5	ANHANGUERA (430 – 431)	4,6277	S.BARBARA (568 – 567)	-2,5783
6	3IRMAOS (543 – 542)	4,5475	SUMARE (571 – 570)	-2,2679
7	CAPIVARA (550 – 549)	2,0314	CENTRO (427 – 428)	-1,8819
8	BAIXADA (471 – 472)	1,9809	B.JARDIM (576 – 574)	-1,8436
9	PIRITUBA (421 – 422)	1,9269	EMBUGUAÇU (583 – 581)	-1,7364
10	BANDEIRA (492 – 493)	1,2172	BAURU (562 – 561)	-1,2420

Os métodos CRIC e CRIC-constante apresentam classificações semelhantes para os transformadores. Novamente, o método Newton apresentou indicações diferentes.

Na tabela 4.38 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema.

**Tabela 4.38** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

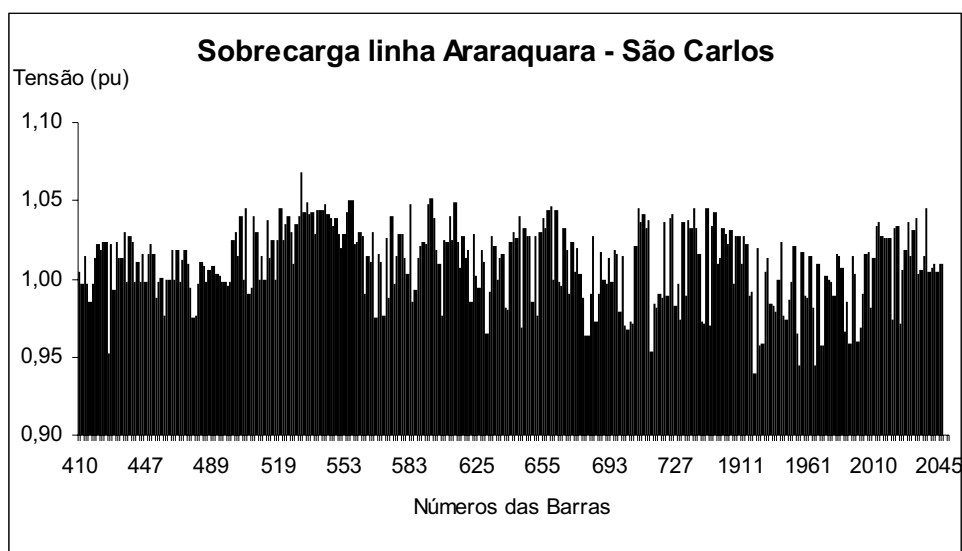
Transformador	$\Delta\text{Tap}$ (un.)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta\text{Tap}$ (MVar/0,01un)	Fluxo (MVA)	Carreg. (%)
A.VERMELHA (536 – 535)	-0,09	-0,46	-0,37	-0,0404	95,87	99,86
ARARAQUARA (560 – 559)	-0,01	-0,50	-1,24	-1,2475	95,97	99,97
RIB.PRETO (564 – 563)	-0,02	-0,10	0,44	0,2001	95,99	99,99
M.MIRIM (566 – 565)	0,02	-0,30	-1,34	0,6368	95,84	99,83
S.BARBARA (569 – 567)	0,02	-0,10	-1,09	0,5474	95,32	99,29
CABREUVA (590 – 584)	0,09	-0,27	-0,61	0,0651	95,78	99,77
BOTUCATU (625 – 626)	-0,05	-0,37	-1,13	-0,2358	95,76	99,75

Este caso apresentou fatores de sensibilidade bem distintos entre os métodos baseados no acoplamento implícito e o Newton. Igualmente ao que ocorreu com as sensibilidades de barras, os transformadores indicados pelos métodos CRIC e CRIC-constante apresentaram melhor comportamento.



### 4.2.2.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

A figura 4.15 mostra o perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEPP para a configuração de carga pesada de julho de 2005, depois da ocorrência da sobrecarga na linha Araraquara - São Carlos.



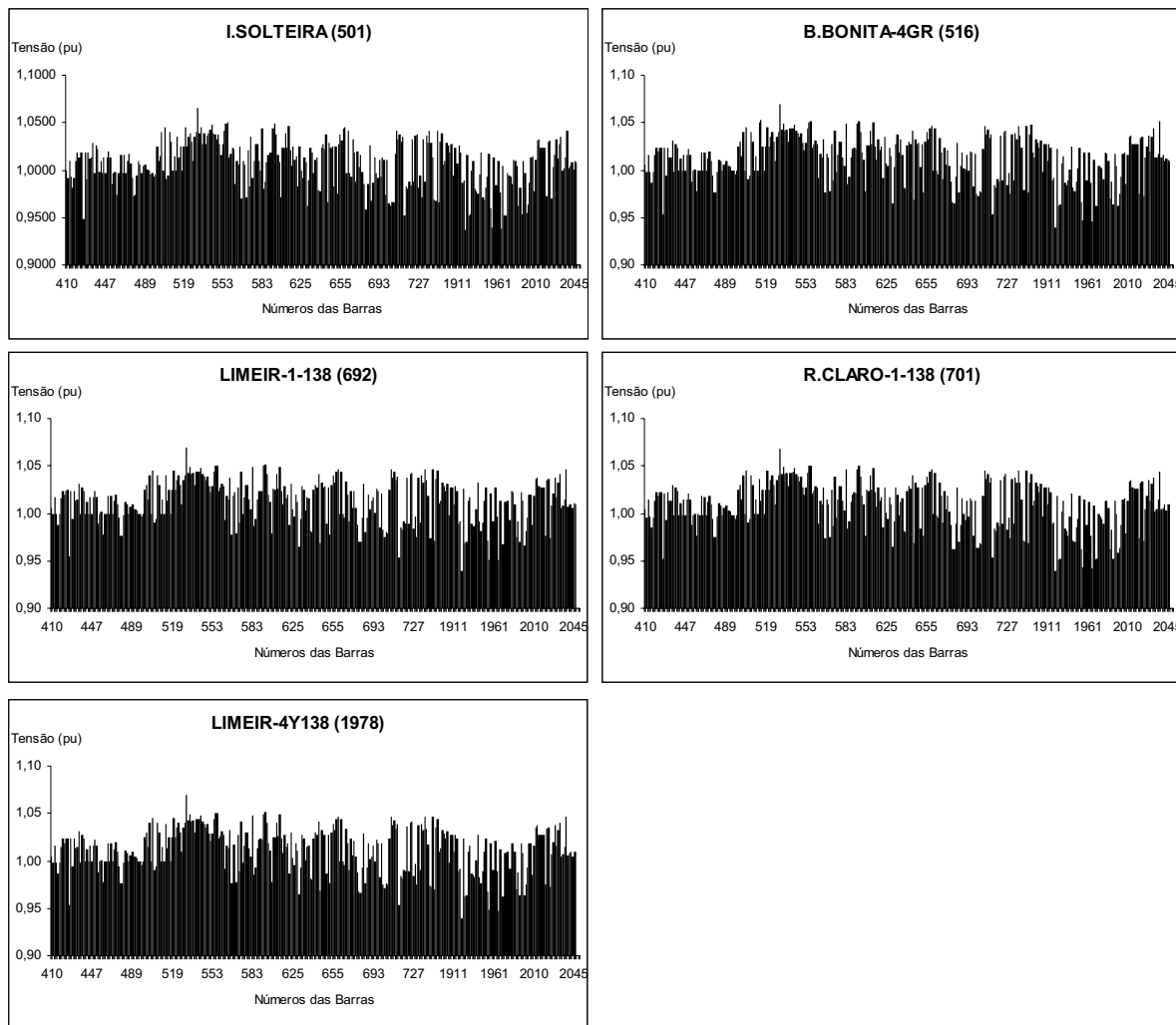
**Figura 4.15** - Perfil de tensão com sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005.

Para este caso, a menor tensão do sistema é 0,939 pu, na barra BASTOS-Y-138 (1920) e a maior é 1,068 pu, na barra AVERMELH-500 (535). A tabela 4.39 mostra as variações de tensões nas barras após a alteração de seus suportes de reativos.

**Tabela 4.39** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos através da alteração do suporte de reativos das barras.

Barras	$\Delta V_{\text{barra}}$ (%)	$V_{\text{mín}}$ (pu)	Barra $V_{\text{mín}}$	$V_{\text{máx}}$ (pu)	Barra $V_{\text{máx}}$
I.SOLTE-19GR (501)	-1,94	0,936	BASTOS-Y-138 (1920)	1,066	AVERMELH-500 (535)
B.BONITA-4GR (516)	3,85	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
LIMEIR-1-138 (692)	1,71	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
RCLARO-1-138 (701)	-0,68	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
LIMEIR-4Y138 (1978)	1,10	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)

Para nenhum caso ocorre grande variação das tensões do sistema. Apenas a barra de B.BONITA-4GR (516) apresenta uma variação próxima de 4%. A figura 4.16 ilustra os perfis de tensão após cada alteração.



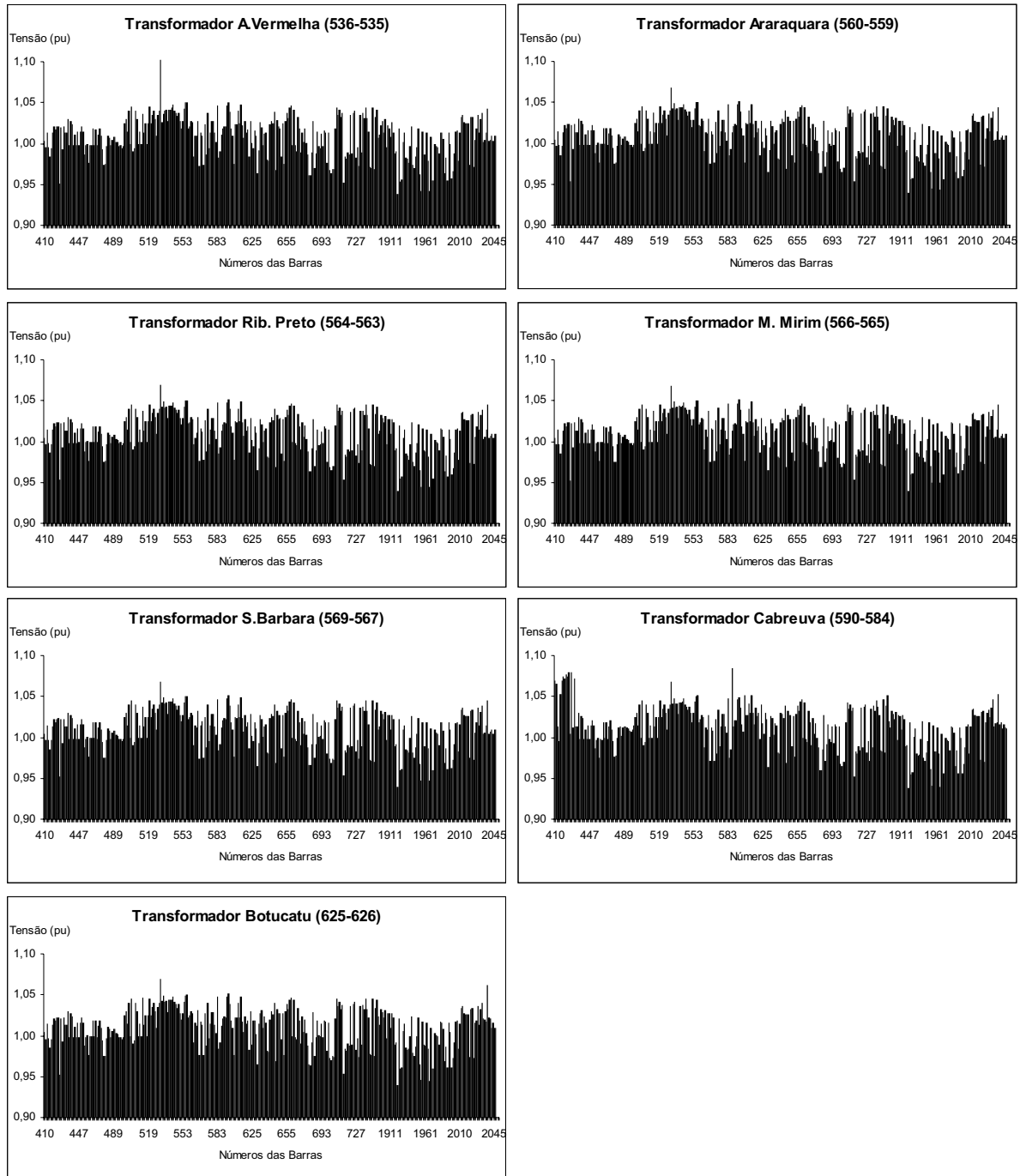
**Figura 4.16** - Perfis de tensão após as alterações dos suportes de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005.

Nenhuma das ações testadas para o alívio da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos causa problemas nos níveis de tensão. A tabela 4.40 mostra as variações de tensão devido às alterações nos taps dos transformadores.

**Tabela 4.40** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos através da alteração dos taps de transformadores.

<b>Transformador</b>	$\Delta V_i$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$V_{\min}$ (pu)	<b>Barra</b> $V_{\min}$	$V_{\max}$ (pu)	<b>Barra</b> $V_{\max}$
A.VERMELHA (536 – 535)	-1,63	3,65	0,938	BASTOS-Y-138 (1920)	1,107	AVERMELH-500 (535)
ARARAQUARA (560 – 559)	-0,29	0,00	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
RIB.PRETO (564 – 563)	-0,99	0,61	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
M.MIRIM (566 – 565)	0,78	-0,49	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
S.BARBARA (569 – 567)	0,89	-0,10	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
CABREUVA (590 – 584)	7,11	-1,02	0,938	BASTOS-Y-138 (1920)	1,085	CABREUVA-230 (590)
BOTUCATU (625 – 626)	-1,20	2,41	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)

A figura 4.17 ilustra os perfis de tensão resultantes destas ações. É possível perceber os efeitos das alterações dos taps dos transformadores de CABREUVA (590 – 584) e de A.VERMELHA (536 – 535) no nível de tensão do sistema.



**Figura 4.17** - Perfis de tensão após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga na linha Araraquara – São Carlos no caso de julho de 2005.

A alteração do tap do transformador de CABREUVA (590 – 584) eleva a tensão em sua barra controlada em 7,11%, o que resulta em 1,085 pu. A alteração do tap do

transformador A.VERMELHA (536 – 535) eleva à 1,107 pu a tensão da barra AVERMELH-500 (535), que já possuía a maior tensão do sistema antes da realização das ações corretivas. Os demais transformadores apresentados na tabela 4.40 eliminam a sobrecarga da linha Araraquara – São Carlos sem causar problemas de tensão.

#### 4.2.3 Eliminação de sobrecarga no transformador de Jupiá 440/138 kV

A configuração de carga pesada de julho de 2005 apresenta sobrecarga no transformador de Jupiá, sem necessidade de um incremento de carga. Para este caso é possível partir-se diretamente para o cálculo dos fatores de sensibilidade.

O fluxo na linha é de  $(88,09 - j128,5)MVA = 155,57 \angle -55,57^\circ MVA$ , o que causa um carregamento de 103,9%. O limite térmico da linha é de 150,0 MVA.

##### 4.2.3.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.41, 4.42 e 4.43 são apresentadas as barras indicadas para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupiá (539 – 541), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. As indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade. As barras com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.41** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Jupiá 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Barra	Sensib.	Barra	Sensib.
1	JUPIA---12GR (502)	0,0997	JUPIA138-2GR (503)	-0,4887
2	TAQUARUC-4GR (513)	0,0853	N.AVANHA-2GR (518)	-0,0705
3	P.PRIMA-12GR (510)	0,0852	PROMISSA-3GR (519)	-0,0300
4	OESTE---088 (415)	0,0752	ROSANA---4GR (511)	-0,0279
5	CAPIVARA-4GR (507)	0,0749		
6	I.SOLTE-19GR (501)	0,0735		
7	M.FORNAS--88 (496)	0,0696		
8	BANDEIRA-088 (493)	0,0695		
9	BANDEIR-34 (494)	0,0689		
10	CANOAS-1-3GR (508)	0,0672		

Apenas quatro barras são classificadas pelo método CRIC como possuindo fator de sensibilidade negativo. Porém, a barra de JUPIA138-2GR (503) é a que apresenta maior influência sobre o fluxo reativo do transformador de Jupiá.

**Tabela 4.42** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Jupiá 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	JUPIA---12GR ( <b>502</b> )	0,0286	JUPIA138-2GR ( <b>503</b> )	-0,5476
<b>2</b>	APARECID-088 ( <b>459</b> )	0,0191	N.AVANHA-2GR ( <b>518</b> )	-0,1361
<b>3</b>	LESTE----088 ( <b>465</b> )	0,0174	PROMISSA-3GR ( <b>519</b> )	-0,1043
<b>4</b>	PROMISSA-3GR ( <b>519</b> )	0,0172	ROSANA---4GR ( <b>511</b> )	-0,0776
<b>5</b>	RAMON R F-88 ( <b>467</b> )	0,0170	IBITINGA-3GR ( <b>517</b> )	-0,0575
<b>6</b>	MOGI-EP---88 ( <b>447</b> )	0,0169	T.IRMAOS-4GR ( <b>520</b> )	-0,0060
<b>7</b>	SUL2-----887 ( <b>476</b> )	0,0167	A.VERMEL-6GR ( <b>500</b> )	-0,0054
<b>8</b>	NORTE----088 ( <b>436</b> )	0,0167	I.SOLTE-19GR ( <b>501</b> )	-0,0016
<b>9</b>	SUL1-----887 ( <b>475</b> )	0,0167		
<b>10</b>	PIRATINI-088 ( <b>485</b> )	0,0166		

**Tabela 4.43** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Jupiá 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
<b>1</b>	P.PRIMA-12GR ( <b>510</b> )	2,8223	ROSANA---4GR ( <b>511</b> )	-3,9844
<b>2</b>	TAQUARUC-4GR ( <b>513</b> )	2,7436	JUPIA138-2GR ( <b>503</b> )	-0,8348
<b>3</b>	CAPIVARA-4GR ( <b>507</b> )	2,4731	S.GRANDE-4GR ( <b>512</b> )	-0,1559
<b>4</b>	JUPIA---12GR ( <b>502</b> )	2,2772	LESTE----088 ( <b>465</b> )	-0,1442
<b>5</b>	I.SOLTE-19GR ( <b>501</b> )	2,2529	RAMON R F-88 ( <b>467</b> )	-0,1402
<b>6</b>	IBITINGA-3GR ( <b>517</b> )	2,2144	CANOAS-2-3GR ( <b>509</b> )	-0,1327
<b>7</b>	T.IRMAOS-4GR ( <b>520</b> )	2,1185	CANOAS-1-3GR ( <b>508</b> )	-0,0986
<b>8</b>	PROMISSA-3GR ( <b>519</b> )	2,0383		
<b>9</b>	N.AVANHA-2GR ( <b>518</b> )	1,7440		
<b>10</b>	RCLARO-1-138 ( <b>701</b> )	1,6770		

As barras de JUPIA138-2GR (503) e ROSANA---4GR (511) são classificadas pelos três métodos como possuindo sensibilidades negativas. Para os métodos baseados no acoplamento implícito, a barra de JUPIA138-2GR (503) apresenta a maior sensibilidade, enquanto que para o método Newton, a barra de ROSANA---4GR (511) apresenta a maior sensibilidade. A tabela 4.44 apresenta as barras efetivas na eliminação da sobrecarga no transformador de Jupiá.

**Tabela 4.44** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Barras	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	Fluxo (MVA)	Carreg. (%)
-						
JUPIA---12GR (502)	206,3	-0,29	-11,20	0,0543	146,53	97,68
JUPIA138-2GR (503)	-26,1	-2,09	-10,50	-0,4023	146,01	97,34
ROSANA---4GR (511)	-76,3	3,21	-12,60	-0,1651	147,54	98,36
N.AVANHA-2GR (518)	-120,3	-0,69	-9,30	-0,0773	147,79	98,52
PROMISSA-3GR (519)	-140,9	-1,09	-7,30	-0,0518	149,19	99,46

As barras mais efetivas na eliminação desta sobrecarga são, nesta ordem: JUPIA138-2GR (503), ROSANA---4GR (511), N.AVANHA-2GR (518) e PROMISSA-3GR (519). Estas barras são as que apresentam maior sensibilidade negativa pelos métodos CRIC e CRIC-constante. Em todas foi diminuído o suporte de reativos para eliminar a sobrecarga, como indicado pelos métodos baseados no acoplamento implícito.

#### 4.2.3.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.45, 4.46 e 4.47 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. A exemplo das barras, as indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade e os transformadores com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.45** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Transformador	Sensib.	Transformador	Sensib.
1	JUPIA (541 – 539)	6,6827	3IRMAOS (543 – 542)	-5,8002
2	TAUBATE (599 – 598)	0,7622	S.ANGELO (594 – 593)	-1,4938
3	INTERLAGOS (488 – 489)	0,2011	A.VERMELHA (537 – 536)	-1,2757
4	INTERLAGOS (488 – 490)	0,2008	CAPIVARA (550 – 549)	-0,6203
5	OESTE (415 – 414)	0,1859	TAQUARUÇU (548 – 547)	-0,5816
6	TAUBATE (600 – 599)	0,1840	BAURU (562 – 561)	-0,5366
7	CENTRO (427 – 428)	0,0864	BANDEIRA (492 – 493)	-0,5340
8	ANHANGUERA (430 – 431)	0,0600	A.VERMELHA (536 – 535)	-0,4976
9	ARARAQUARA (560 – 559)	0,0504	ASSIS (553 – 552)	-0,4767
10	FLORIDA (640 – 642)	0,0446	EMBUGUAÇU (582 – 581)	-0,4351

**Tabela 4.46** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Transformador	Sensib.	Transformador	Sensib.
1	JUPIA (541 – 539)	6,3903	3IRMAOS (543 – 542)	-5,7538
2	CABREUVA (590 – 584)	0,6417	A.VERMELHA (537 – 536)	-1,3141
3	S.ANGELO (594 – 593)	0,2950	A.VERMELHA (536 – 535)	-0,6363
4	FLORIDA (640 – 642)	0,2326	BAURU (562 – 561)	-0,5828
5	EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,1609	CAPIVARA (550 – 549)	-0,5419
6	S.BARBARA (568 – 567)	0,1566	TAQUARUÇU (548 – 547)	-0,4987
7	SUMARE (571 – 570)	0,1431	BANDEIRA (492 – 493)	-0,1084
8	CENTRO (427 – 428)	0,0918	PIRITUBA (421 – 422)	-0,0721
9	RIB.PRETO (564 – 563)	0,0907	BAIXADA (471 – 473)	-0,0705
10	EMBUGUAÇU (583 – 581)	0,0816	TAUBATE (601 – 599)	-0,0695

**Tabela 4.47** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Transformador	Sensib.	Transformador	Sensib.
1	CABREUVA (590 – 584)	93,5709	S.ANGELO (594 – 593)	-101,4600
2	A.VERMELHA (536 – 535)	73,1526	EMBUGUAÇU (582 – 581)	-90,5658
3	TAUBATE (599 – 598)	37,5357	JUPIA (541 – 539)	-41,3242
4	S.BARBARA (568 – 567)	17,5020	ANHANGUERA (430 – 431)	-33,6171
5	SUMARE (571 – 570)	15,3848	ASSIS (553 – 552)	-32,6754
6	EMBUGUAÇU (583 – 581)	13,1194	3IRMAOS (543 – 542)	-30,9863
7	CENTRO (427 – 428)	13,0872	BAIXADA (471 – 472)	-14,0869
8	B.JARDIM (576 – 574)	12,8154	PIRITUBA (421 – 422)	-13,5213
9	RIB.PRETO (564 – 563)	12,0886	CAPIVARA (550 – 549)	-12,5213
10	M.MIRIM (566 – 565)	10,6797	BANDEIRA (492 – 493)	-8,0188

Alguns dos transformadores são indicados pelos três métodos, porém com sinais diferentes, como os trafos de A.VERMELHA (536 – 535) e de S.ANGELO (594 – 593).

Na tabela 4.48 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema.

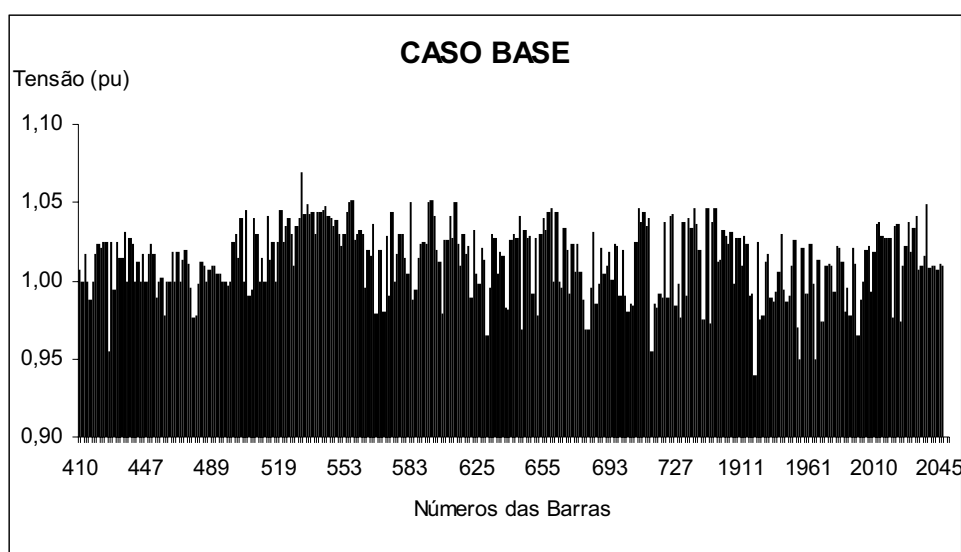
**Tabela 4.48** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga no transformador de Jupia 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Transformador	$\Delta\text{Tap}$ (un.)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta\text{Tap}$ (MVar/0,01un)	Fluxo (MVA)	Carreg. (%)
A.VERMELHA (536 – 535)	-0,39	7,81	-14,80	-0,3795	148,75	99,17
JUPIA (541 – 539)	0,01	0,41	-8,70	8,7000	148,94	99,29
3IRMAOS (543 – 542)	-0,03	-0,39	-8,20	-2,7333	148,84	99,23
S.ANGELO (594 – 593)	-0,30	-4,59	-2,30	-0,0766	151,30	100,86

O próprio transformador de Jupιά (541-539) é o mais efetivo na eliminação de sua sobrecarga. Em seguida, vem o transformador de 3IRMAOS (543 – 542). O transformador de S.ANGELO (594 – 593) é capaz de eliminar a sobrecarga, mas pode levar o sistema a um colapso de tensão. Sua relação de transformação já sofreu alteração de cerca de 30% e ainda não foi suficiente para eliminar a sobrecarga.

#### 4.2.3.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

A figura 4.18 mostra o perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEPP para a configuração de carga pesada de julho de 2005, no qual o transformador de Jupιά opera sobrecarregado. Para este caso, o menor valor de tensão é 0,940 pu, na barra de BASTOS-Y-138 (1920) e o maior valor de tensão é 1,069 pu, na barra de AVERMELH-500 (535).



**Figura 4.18** - Perfil de tensão no caso base de julho de 2005.

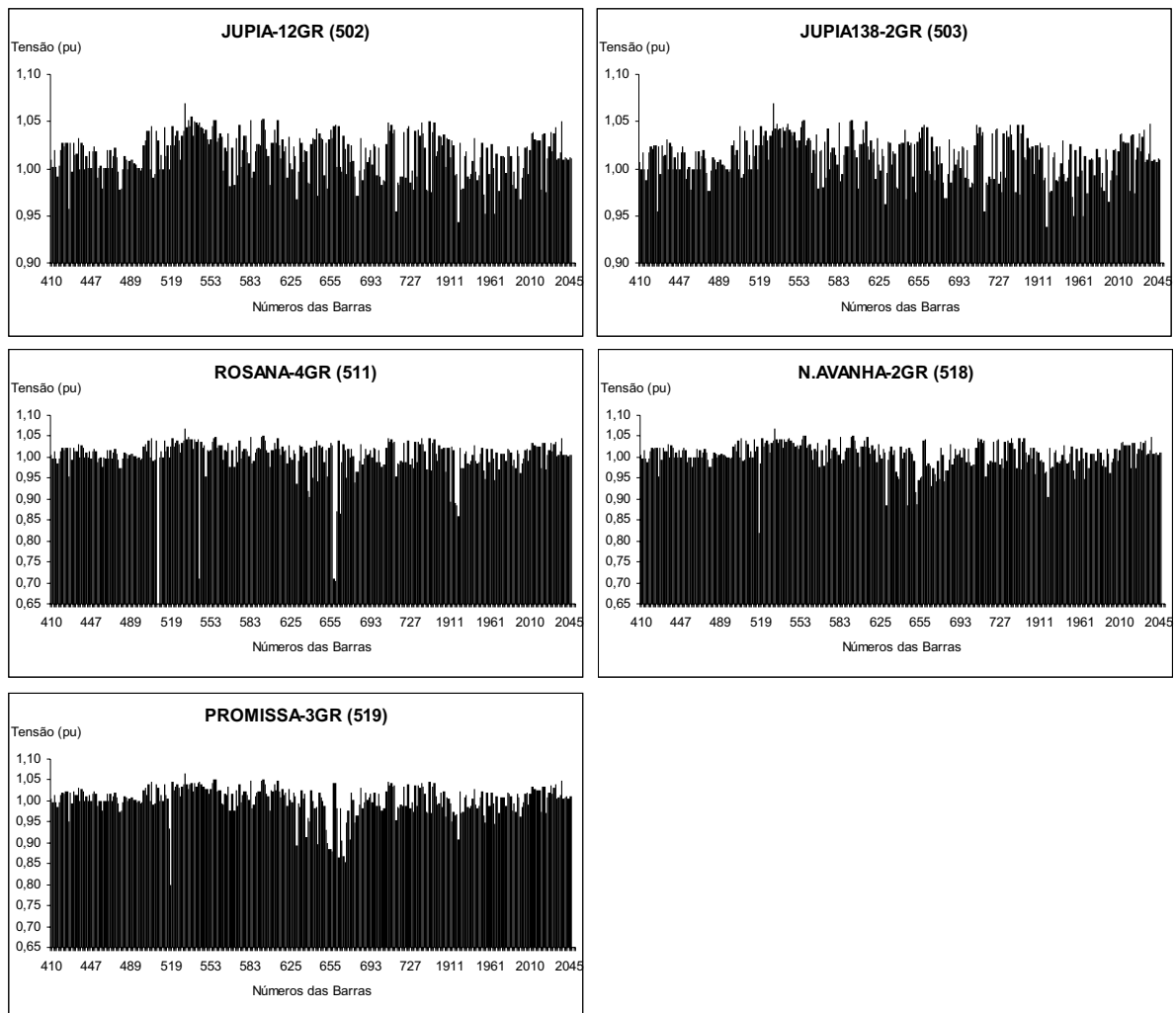
A tabela 4.49 mostra as variações das tensões nas barras após a alteração de seus suportes de reativos para eliminar a sobrecarga no transformador de Jupιά. As barras ROSANA---4GR (511), N.AVANHA-2GR (518) e PROMISSA-3GR (519) eliminam a sobrecarga do transformador de Jupιά, porém causam problemas de afundamento de tensão.



**Tabela 4.49** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupuí 440/138 kV através da alteração do suporte de reativos das barras.

Barras	$\Delta V_{\text{barra}}$ (%)	$V_{\text{mín}}$ (pu)	Barra $V_{\text{mín}}$	$V_{\text{máx}}$ (pu)	Barra $V_{\text{máx}}$
JUPIA---12GR (502)	2,46	0,943	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
JUPIA138-2GR (503)	-1,92	0,938	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
ROSANA---4GR (511)	-36,89	0,650	ROSANA---4GR (511)	1,068	AVERMELH-500 (535)
N.AVANHA-2GR (518)	-18,00	0,820	N.AVANHA-2GR (518)	1,068	AVERMELH-500 (535)
PROMISSA-3GR (519)	-21,95	0,800	PROMISSA-3GR (519)	1,067	AVERMELH-500 (535)

A figura 4.19 ilustra o comportamento das tensões do sistema quando realizadas as alterações nos suportes de reativos das barras para eliminar a sobrecarga no transformador de Jupuí.



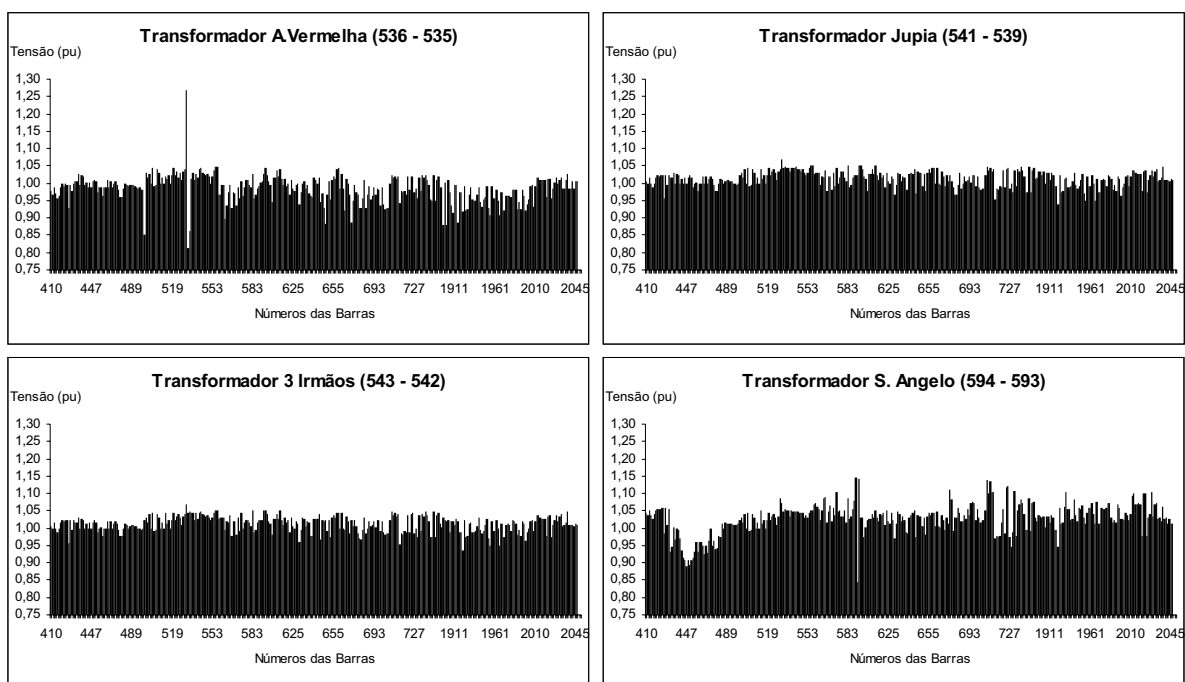
**Figura 4.19** - Perfis de tensão após as alterações dos suportes de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupuí 440/138 kV no caso de julho de 2005.

A tabela 4.50 mostra as variações de tensão devido às alterações dos taps dos transformadores para aliviar a sobrecarga no transformador de Jupuí.

**Tabela 4.50** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupuí 440/138 kV através da alteração dos taps de transformadores.

Transformador	$\Delta V_i$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$V_{\min}$ (pu)	Barra $V_{\min}$	$V_{\max}$ (pu)	Barra $V_{\max}$
A.VERMELHA (536 – 535)	-22,15	18,71	0,812	AVERMELH-440 (536)	1,269	AVERMELH-500 (535)
JUPIA (541 – 539)	0,29	-0,10	0,940	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
3IRMAOS (543 – 542)	-1,63	0,10	0,936	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
S.ANGELO (594 – 593)	-17,40	11,80	0,845	S.ANGELO-345 (594)	1,146	S.ANGELO-440 (593)

Além do próprio transformador de Jupuí, apenas o transformador de 3IRMAOS (543 – 542) é capaz de eliminar a sobrecarga sem causar problemas de tensão. Os perfis de tensão após a realização destas ações são mostrados na figura 4.20.



**Figura 4.20** - Perfis de tensão após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de Jupuí 440/138 kV no caso de julho de 2005.

Na figura 4.20 é possível observar os afundamentos e os picos de tensão devido às alterações dos tap dos transformadores de A.VERMELHA (536 – 535) e de S.ANGELO (594 – 593).

#### 4.2.4 Eliminação de sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV

O transformador de Santa Bárbara (567 – 568) também opera sob carregamento alto, porém sem estar sobrecarregado. Assim, um aumento de carga de 12 MW em Piracicaba (2224) leva o transformador de Santa Bárbara a um fluxo de  $(267,97 + j137,88)MVA = 301,36 \angle 27,23^\circ MVA$ , o que representa um carregamento de 100,45%, visto que o limite térmico do transformador é de 300,0 MVA.

A ATC para este caso não pode ser calculada corretamente, provavelmente porque no caso base este transformador já opera com carregamento de 99,7%, e o cálculo da ATC apresentar um comportamento conservativo, indicando uma margem de capacidade sempre menor do que a real.

##### 4.2.4.1 Sensibilidades das variáveis de barras

Nas tabelas 4.51, 4.52 e 4.53 são apresentadas as barras indicadas para eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara (567 – 568), de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. As indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade. As barras com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.51** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Classif.	Barra	Sensib.	Barra	Sensib.
1	TIETE----138 (748)	0,0375	TAQUARUC-4GR (513)	-0,0887
2	ITAPETI2-138 (741)	0,0241	P.PRIMA-12GR (510)	-0,0886
3	BOTUCATU--88 (2040)	0,0235	JUPIA138-2GR (503)	-0,0844
4	BARIRI---2GR (515)	0,0209	JUPIA---12GR (502)	-0,0801
5	B.BONITA-4GR (516)	0,0206	CAPIVARA-4GR (507)	-0,0800
6	CBONITO--138 (624)	0,0189	T.IRMAOS-4GR (520)	-0,0752
7	NORTE----088 (436)	0,0169	I.SOLTE-19GR (501)	-0,0752
8	REALE----345 (438)	0,0142	N.AVANHA-2GR (518)	-0,0723
9	JURUMIRI-2GR (506)	0,0121	PROMISSA-3GR (519)	-0,0608
10	REGISTRO-138 (747)	0,0067	IBITINGA-3GR (517)	-0,0602

**Tabela 4.52** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	TIETE----138 (748)	0,0479	LIMEIR-4Y138 (1978)	-0,0381
2	NORTE----088 (436)	0,0461	LIMEIR-1-138 (692)	-0,0324
3	REALE----345 (438)	0,0428	RCLARO-1-138 (701)	-0,0218
4	BOTUCATU--88 (2040)	0,0422	CAPIVARA-4GR (507)	-0,0164
5	ITAPETI2-138 (741)	0,0421	P.PRIMA-12GR (510)	-0,0162
6	CBONITO--138 (624)	0,0385	TAQUARUC-4GR (513)	-0,0162
7	NORDESTE—88 (433)	0,0348	I.SOLTE-19GR (501)	-0,0152
8	REGISTRO-138 (747)	0,0325	T.IRMAOS-4GR (520)	-0,0146
9	JURUMIRI-2GR (506)	0,0323	JUPIA---12GR (502)	-0,0144
10	LESTE----088 (465)	0,0288	LIMOEIRO-2GR (523)	-0,0126

**Tabela 4.53** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Barra</b>	<b>Sensib.</b>
1	ROSANA---4GR (511)	2,5685	P.PRIMA-12GR (510)	-1,4058
2	JUPIA138-2GR (503)	0,5387	TAQUARUC-4GR (513)	-1,3666
3	S.GRANDE-4GR (512)	0,1431	CAPIVARA-4GR (507)	-1,2340
4	CANOAS-2-3GR (509)	0,1331	I.SOLTE-19GR (501)	-1,1565
5	CANOAS-1-3GR (508)	0,1154	IBITINGA-3GR (517)	-1,1181
6	LESTE----088 (465)	0,0427	JUPIA---12GR (502)	-1,1129
7	RAMON R F-88 (467)	0,0416	T.IRMAOS-4GR (520)	-1,0551
8			PROMISSA-3GR (519)	-0,9979
9			RCLARO-1-138 (701)	-0,9319
10			LIMEIR-4Y138 (1978)	-0,9177

A classificação das barras pelos métodos CRIC e CRIC-constante são semelhantes, inclusive ao fornecer baixos valores de sensibilidade para todas as indicações. Novamente o método Newton fornece indicações diferentes dos demais.

A tabela 4.54 apresenta as barras capazes de eliminar a sobrecarga no transformador de Santa Bárbara. Todas as barras possuem baixo valor de sensibilidade, a exemplo do que foi indicado pelos métodos baseados no acoplamento implícito. Por isso a necessidade de alterações de grande magnitude no suporte de reativos das barras para eliminar a sobrecarga no transformador de Santa Bárbara.

**Tabela 4.54** – Suporte de reativo necessário para eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Barras</b> -	$\Delta Q_i$ (MVar)	$\Delta P_{jk}$ (MW)	$\Delta Q_{jk}$ (MVar)	$-\Delta Q_{jk}/\Delta Q_i$ (MVar/MVar)	<b>Fluxo</b> (MVA)	<b>Carreg.</b> (%)
NORTE----088 (436)	242,4	-0,38	-2,73	0,0113	299,78	99,93
REALE----345 (438)	232,0	-0,37	-2,62	0,0113	299,84	99,95
I.SOLTE-19GR (501)	-218,4	-1,00	-2,89	-0,0132	299,16	99,72
CAPIVARA-4GR (507)	-250,7	-0,82	-2,10	-0,0084	299,68	99,89
P.PRIMA-12GR (510)	-333,6	-0,97	-2,40	-0,0072	299,41	99,80
LIMEIR-1-138 (692)	-168,0	-0,52	-3,82	-0,0227	299,17	99,72
RCLARO-1-138 (701)	-168,0	-0,49	-2,81	-0,0167	299,65	99,88
TIETE----138 (748)	170,0	0,20	-3,78	0,0222	299,83	99,94
LIMEIR-4Y138 (1978)	-159,0	-0,52	-3,97	-0,0250	299,10	99,70

#### 4.2.4.2 Sensibilidades das variáveis de transformadores

Nas tabelas 4.55, 4.56 e 4.57 são apresentados os transformadores indicados para eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara, de acordo com os métodos CRIC, CRIC-constante e Newton, respectivamente. A exemplo das barras, as indicações são classificadas de acordo com seus fatores de sensibilidade e os transformadores com fatores de sensibilidade positivos e negativos estão separadas em colunas distintas.

**Tabela 4.55** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	SUMARE (571 – 570)	11,8723	S.BARBARA (568 – 567)	-31,9052
2	S.ANGELO (594 – 593)	2,5101	A.VERMELHA (536 – 535)	-1,7966
3	EMBUGUAÇU (582 – 581)	2,2155	TAUBATE (599 – 598)	-0,9894
4	ARARAQUARA (560 – 559)	1,4093	BOTUCATU (625 – 626)	-0,7905
5	CABREUVA (590 – 584)	1,1067	OESTE (415 – 414)	-0,1118
6	S.BARBARA (569 – 567)	0,8775	ITAPETININGA (449 – 448)	-0,1035
7	RIB.PRETO (564 – 563)	0,8450	A.VERMELHA (537 – 536)	-0,0963
8	ASSIS (553 – 552)	0,7368	3IRMAOS (543 – 542)	-0,0762
9	ANHANGUERA (430 – 431)	0,4947	BOTUCATU (2040 – 626)	-0,0707
10	JUPIA (541 – 539)	0,1625	CENTRO (427 – 428)	-0,0418

**Tabela 4.56** – Sensibilidades de transformadores pelo método CRIC-constante para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	SUMARE (571 – 570)	9,2610	S.BARBARA (568 – 567)	-24,3477
2	S.ANGELO (594 – 593)	2,7519	A.VERMELHA (536 – 535)	-1,5756
3	EMBUGUAÇU (582 – 581)	2,2603	TAUBATE (599 – 598)	-1,2228
4	ARARAQUARA (560 – 559)	0,8880	BOTUCATU (625 – 626)	-0,4275
5	CABREUVA (590 – 584)	0,7551	M.MIRIM (566 – 565)	-0,2484
6	S.BARBARA (569 – 567)	0,7130	BANDEIRA (492 – 493)	-0,1481
7	RIB.PRETO (564 – 563)	0,6802	ITAPETININGA (449 – 448)	-0,1403
8	ASSIS (553 – 552)	0,6640	C.BONITO (623 – 624)	-0,1129
9	ANHANGUERA (430 – 431)	0,4670	BAIXADA (471 – 473)	-0,1076
10	JUPIA (541 – 539)	0,1508	NORDESTE (442 – 443)	-0,0811

**Tabela 4.57** – Sensibilidades de transformadores pelo método Newton para sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

<b>Classif.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>	<b>Transformador</b>	<b>Sensib.</b>
1	S.ANGELO (594 – 593)	54,3321	CABREUVA (590 – 584)	-51,6257
2	EMBUGUAÇU (582 – 581)	48,2352	A.VERMELHA (536 – 535)	-38,0577
3	S.BARBARA (568 – 567)	23,5886	TAUBATE (599 – 598)	-20,8073
4	JUPIA (541 – 539)	21,7314	CENTRO (427 – 428)	-7,2517
5	ANHANGUERA (430 – 431)	18,3350	B.JARDIM (576 – 574)	-7,2305
6	ASSIS (553 – 552)	17,3921	EMBUGUAÇU (583 – 581)	-6,9304
7	3IRMAOS (543 – 542)	16,9139	M.MIRIM (566 – 565)	-6,4029
8	CAPIVARA (550 – 549)	7,5910	RIB.PRETO (564 – 563)	-6,1292
9	PIRITUBA (421 – 422)	7,4652	S.ANGELO (595 – 593)	-4,6460
10	BAIXADA (471 – 472)	7,4338	BAURU (562 – 561)	-4,4820

Os métodos CRIC e CRIC-constante novamente apresentaram indicações semelhantes. O método Newton calculou fatores de sensibilidade bem diferentes dos métodos baseados no acoplamento implícito. O próprio transformador de Santa Bárbara (568-567) é indicado apenas pelos métodos CRIC e CRIC-constante como o mais efetivo para o alívio da sobrecarga.

Na tabela 4.58 são mostrados alguns dos transformadores utilizados na tentativa de eliminar a sobrecarga presente no sistema.

**Tabela 4.58** – Alteração de taps necessária para eliminação da sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

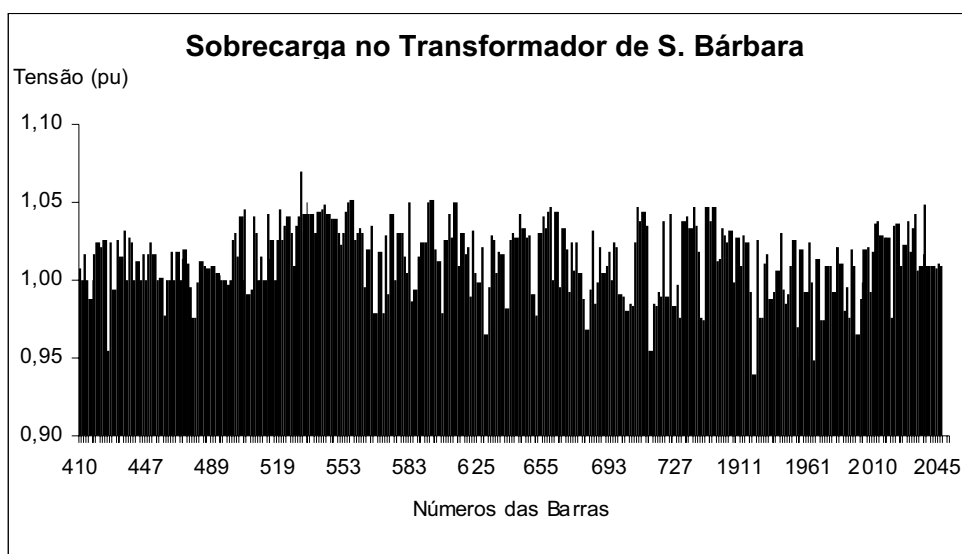
<b>Transformador</b>	<b><math>\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(un.)</b>	<b><math>\Delta P_{jk}</math></b> <b>(MW)</b>	<b><math>\Delta Q_{jk}</math></b> <b>(MVAr)</b>	<b><math>-\Delta Q_{jk}/\Delta\text{Tap}</math></b> <b>(MVAr/0,01un)</b>	<b>Fluxo</b> <b>(MVA)</b>	<b>Carreg.</b> <b>(%)</b>
-						
ANHANGUERA (430 – 431)	0,09	-0,94	-2,60	0,2889	299,35	99,78
A.VERMELHA (536 – 535)	-0,07	-1,35	-1,80	-0,2571	299,34	99,78
ARARAQUARA (560 – 559)	0,05	-0,88	-2,31	0,4620	299,53	99,84
RIB.PRETO (564 – 563)	0,05	-0,85	-2,21	0,4420	299,60	99,87
S.BARBARA (568 – 567)	-0,01	0,17	-6,03	-6,0300	298,80	99,60
S.BARBARA (569 – 567)	0,07	-0,97	-3,52	0,5029	298,85	99,62
SUMARE (571 – 570)	0,01	0,00	-4,90	4,9000	298,85	99,83
EMBUGUAÇU (582 – 581)	0,04	-0,56	-2,30	0,5750	299,82	99,94
CABREUVA (590 – 584)	0,09	-0,77	-2,63	0,2922	299,47	99,79
S.ANGELO (594 – 593)	0,04	-1,00	-3,47	0,8675	298,90	99,63
TAUBATE (599 – 598)	-0,09	-0,88	-3,45	-0,3833	299,01	99,67
BOTUCATU (625 – 626)	-0,10	-0,67	-3,44	-0,3510	299,20	99,73

Esta é uma sobrecarga aparentemente fácil de ser eliminada. Pode-se confirmar isto pelo número de barras e transformadores capazes de eliminá-la. Contudo, ainda falta realizar a análise do perfil de tensão para verificar se estas ações são realizáveis ou não. Quanto às sensibilidades, os métodos CRIC e CRIC-constante indicaram bem o comportamento do fluxo reativo do transformador sobrecarregado devido às alterações nos taps dos transformadores.

As melhores ações para eliminar esta sobrecarga são a redução no tap do transformador de S.BARBARA (568 – 567) e o aumento no tap do transformador de SUMARE (571 – 570), sendo necessária uma variação em seus taps de 0,01.

#### 4.2.4.3 Análise do nível de tensão após as ações corretivas

A figura 4.21 mostra o perfil de tensão do sistema de transmissão da CTEPP para a configuração de carga pesada de julho de 2005, com a ocorrência de uma sobrecarga no transformador de Santa Bárbara 440/138 kV. Para este caso, o menor valor de tensão é 0,940 pu, na barra de BASTOS-Y-138 (1920) e o maior valor de tensão é 1,069 pu, na barra de AVERMELH-500 (535).



**Figura 4.21** - Perfil de tensão com sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005.

A tabela 4.59 apresenta as variações percentuais das tensões nas barras cujos suportes de reativos foram alterados na tentativa de eliminar a sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV.

**Tabela 4.59** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV através da alteração do suporte de reativos das barras.

<b>Barras</b> -	$\Delta V_{\text{barra}}$ (%)	$V_{\text{mín}}$ (pu)	<b>Barra <math>V_{\text{mín}}</math></b>	$V_{\text{máx}}$ (pu)	<b>Barra <math>V_{\text{máx}}</math></b>
NORTE---088 (436)	6,81	0,940	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
REALE---345 (438)	5,84	0,940	BASTOS-Y-138 (1920)	1,087	AVERMELH-500 (535)
I.SOLTE-19GR (501)	-2,91	0,936	BASTOS-Y-138 (1920)	1,066	AVERMELH-500 (535)
CAPIVARA-4GR (507)	-9,09	0,924	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
P.PRIMA-12GR (510)	-11,54	0,919	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
LIMEIR-1-138 (692)	-5,39	0,928	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,068	AVERMELH-500 (535)
RCLARO-1-138 (701)	-5,95	0,923	ARARA-1-Y138 (1931)	1,068	AVERMELH-500 (535)
TIETE---138 (748)	22,53	0,941	BASTOS-Y-138 (1920)	1,240	AVERMELH-500 (535)
LIMEIR-4Y138 (1978)	-6,48	0,930	JAGRIUN-Y138 (1968)	1,068	AVERMELH-500 (535)

A única barra capaz de eliminar a sobrecarga do transformador de S. Bárbara 440/138 kV é a barra de I.SOLTE-19GR (501).

Os perfis de tensão resultantes das alterações do suporte de reativos das barras são apresentados na figura 4.22.



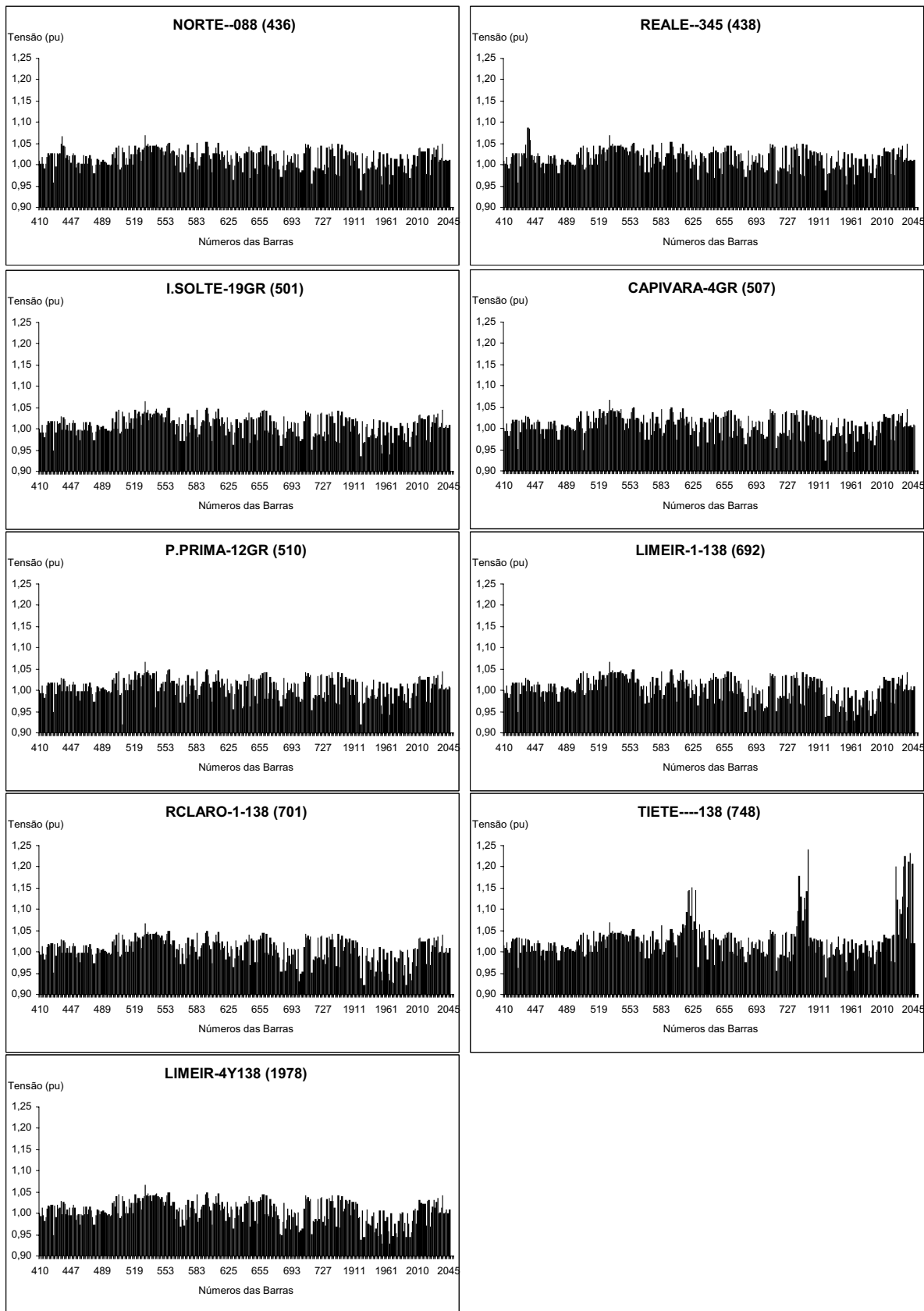


Figura 4.22 - Perfis de tensão após as alterações dos suportes de reativos das barras para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005.

É possível observar picos de tensão devido à alteração do suporte de reativos das barras NORTE----088 (436), REALE----345 (438) e TIETE----138 (748) e afundamentos quando alterados os suportes de reativos das barras CAPIVARA-4GR (507), P.PRIMA-12GR (510), LIMEIR-1-138 (692), RCLARO-1-138 (701) e LIMEIR-4Y138 (1978).

A tabela 4.60 mostra as variações das tensões terminais dos transformadores após a alteração dos taps para eliminar a sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV.

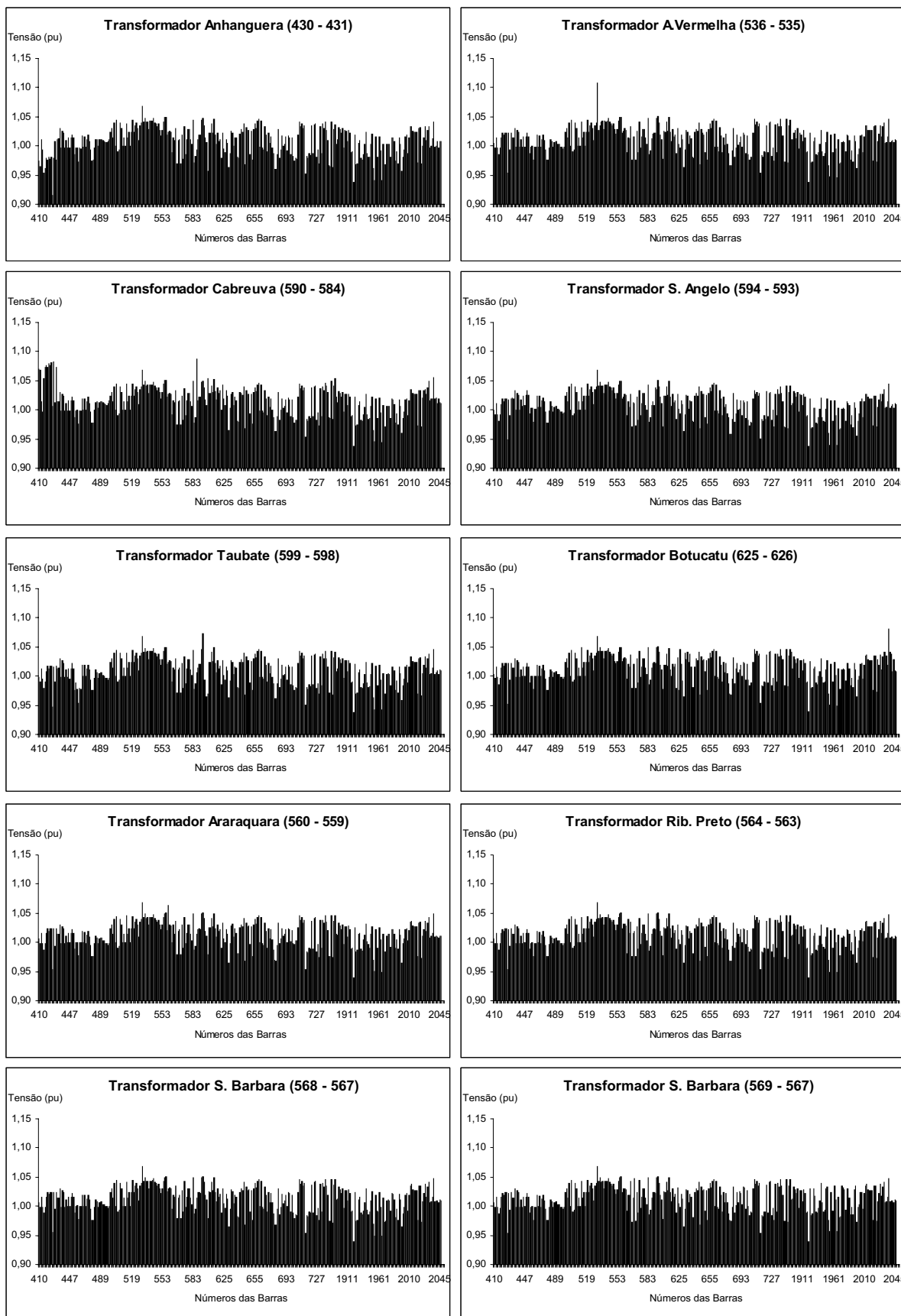
**Tabela 4.60** – Variação da tensão nas barras após a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV através da alteração dos taps dos transformadores.

<b>Transformador</b>	$\Delta V_i$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$V_{\min}$ (pu)	<b>Barra</b> $V_{\min}$	$V_{\max}$ (pu)	<b>Barra</b> $V_{\max}$
ANHANGUERA (430 – 431)	1,45	-4,73	0,915	CENTRO----88 (428)	1,068	AVERMELH-500 (535)
A.VERMELHA (536 – 535)	-1,53	3,65	0,938	BASTOS-Y-138 (1920)	1,108	AVERMELH-500 (535)
ARARAQUARA (560 – 559)	3,30	2,61	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
RIB.PRETO (564 – 563)	1,96	0,28	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
S.BARBARA (568 – 567)	-0,39	0,11	0,940	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
S.BARBARA (569 – 567)	2,85	-0,55	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
SUMARE (571 – 570)	0,39	-3,60	0,940	BASTOS-Y-138 (1920)	1,069	AVERMELH-500 (535)
EMBUGUAÇU (582 – 581)	1,29	1,01	0,938	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
CABREUVA (590 – 584)	7,19	-4,54	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,088	CABREUVA-230 (590)
S.ANGELO (594 – 593)	1,47	-4,18	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,068	AVERMELH-500 (535)
TAUBATE (599 – 598)	-4,57	7,65	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,074	AVERMELH-500 (535)
BOTUCATU (625 – 626)	-2,85	2,05	0,939	BASTOS-Y-138 (1920)	1,082	BOTUCATU—88 (2040)

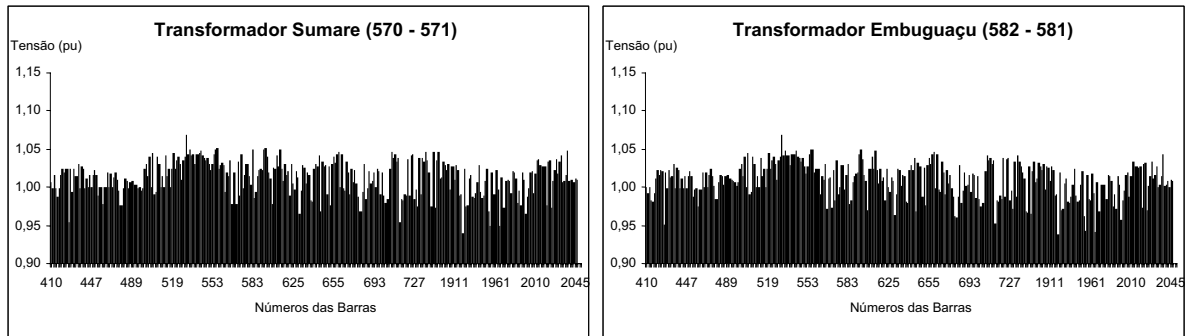
Na figura 4.23.1 são mostrados os perfis de tensão em que ocorrem problemas. Na figura 4.23.2 são mostrados os perfis referentes às alterações que eliminam a sobrecarga sem causar problemas de tensão no sistema.

As alterações nos taps dos transformadores de A.VERMELHA (536 – 535), CABREUVA (590 – 584), TAUBATE (599 – 598) e BOTUCATU (625 – 626) causam picos de tensão no sistema. O caso mais grave é o de Cabreúva, em que além de criar um pico de tensão, eleva as tensões de várias outras barras do sistema.

As alterações nos transformadores de ANHANGUERA (430 – 431) e de S.ANGELO (594 – 593) causam afundamentos de tensão. No caso do transformador de Anhanguera, ocorre queda de tensão em diversas barras do sistema. No caso do transformador de S. Ângelo, ocorre afundamento de tensão apenas na barra de saída do transformador.



**Figura 4.23.1** - Perfis de tensão com problemas após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005.



**Figura 4.23.2** - Perfis de tensão sem problemas após as alterações dos taps de transformadores para a eliminação da sobrecarga no transformador de S. Bárbara 440/138 kV no caso de julho de 2005.

### 4.3 Avaliação do tempo de processamento

Para os testes realizados com o sistema Sul-Sudeste brasileiro, foram medidos os tempos de processamento para cada método. O equipamento utilizado nos testes foi um microcomputador com processador Pentium 4, 2.8 GHz, 512 MB de RAM. Os tempos gastos para cada simulação são apresentados na tabela 4.61:

**Tabela 4.61** – Tempos de processamento dos cálculos dos fatores de sensibilidade para os casos do sistema Sul-Sudeste brasileiro.

Sobrecarga	Tempo de Processamento (s.)		
	CRIC	CRIC-constante	Newton
Embu Guaçu – Parelheiros	10,4	12,6	36,0
Araraquara – São Carlos	10,1	12,4	34,0
Jupia 440/138 kV	10,0	12,3	34,2
S. Bárbara 440/138 kV	10,1	12,4	34,2
<b>Tempo médio</b>	10,15	12,43	34,6

O método CRIC apresenta o menor custo computacional. Como a maior parcela deste tempo deve-se ao processo de fatoração da matriz de sensibilidades reativas ( $L_c$  e jacobiana), o método Newton apresenta o maior tempo de processamento, pois para este método é necessária a inversão da matriz jacobiana completa.

Na implementação dos métodos foram utilizadas variáveis dinâmicas para alocar valores que são utilizados em apenas uma etapa do processo de cálculo, o que permite liberar memória para a execução dos cálculos quando desalocam-se essas variáveis. Para alocar os valores de resistência e reatância das linhas do sistema, utilizadas na formação da matriz de admitâncias, foram utilizadas variáveis deste tipo.

No método CRIC, a matriz  $Lc$  não necessita dos valores de reatância das linhas, o que permite desalocar sua matriz, liberando memória para a realização dos cálculos. Para o método CRIC-constante não é possível desalocar essa matriz, pois seus valores são necessários para formação da matriz  $Lc$ -constante. Assim, a diferença nos tempos de processamento entre os métodos CRIC e CRIC-constante deve-se ao tempo demandado na formação das matrizes  $Lc$  e  $Lc$ -constante.

Os gastos computacionais apresentados pelos três métodos foram menores do que esperados para um sistema deste porte, e mostram que eles são aplicáveis em tempo real.

## 5 Conclusões

---

Neste trabalho foi apresentado um estudo da aplicação de fatores de sensibilidade de primeira ordem para indicação de elementos capazes de aliviar ou eliminar sobrecargas no sistema através da diminuição do fluxo reativo na linha. Foi desenvolvido um modelo baseado nas sensibilidades fornecidas pela matriz  $Lc$ , que busca melhorar a qualidade das informações passadas ao operador do sistema, bem como reduzir o tempo computacional gasto na execução do programa; e um modelo baseado no modelo constante do método CRIC.

Essas matrizes foram obtidas a partir do modelo implicitamente acoplado e possui algumas vantagens em relação as matrizes apresentadas na literatura. Além de fornecer as sensibilidades necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, outros fatores foram decisivos: facilidade de obtenção, alto grau de esparsidade e a dimensão da matriz, que é igual ao número de barras. Este fato torna a execução do programa mais rápida do que quando se utiliza a matriz jacobiana, que possui dimensão igual a duas vezes o número de barras, visto que a maior parcela do custo computacional se refere ao processo de fatoração dessas matrizes.

É importante ressaltar que a diferença de tempo de processamento entre os métodos CRIC e CRIC-constante se deve apenas a maneira que foram implementados, sendo utilizadas variáveis dinâmicas, de maneira a liberar memória durante o processo de cálculo. Contudo, os custos computacionais dos três métodos são baixos, o que permite aplicá-los em tempo real.

Outra vantagem do método CRIC é observada comparando-se as sensibilidades obtidas. Em todos os testes, as barras e transformadores indicados pelo método CRIC foram capazes de eliminar com sucesso a sobrecarga. De um modo geral, o método CRIC-

constante também apresentou bons resultados. O método Newton se mostrou limitado, não fornecendo boas indicações para todos os casos.

A melhor qualidade do método CRIC é observada na análise dos sinais dos fatores de sensibilidade, pois o comportamento dos elementos de rede eficientes na eliminação das sobrecargas é descrito corretamente por este método em todos os casos. Para o método Newton, os sinais dos fatores de sensibilidade não funcionaram para todos os casos. Para o método CRIC-constante, a maioria das indicações respondeu de acordo com os sinais das sensibilidades fornecidas por este método.

A análise dos perfis de tensão após a realização das ações corretivas mostra que nem sempre os elementos que possuem maior influência sobre o fluxo reativo na linha sobrecarregada são a melhor opção para eliminar a sobrecarga. Isto porque enquanto elimina a sobrecarga, estas ações provocam grandes variações de tensão nas barras do sistema e podem violar outros limites da rede.

As características construtivas da matriz  $\mathbf{L}$  a torna muito atraente para utilização neste tipo de problema. No entanto, são necessárias algumas ações no sentido de melhorar a qualidade das informações oferecidas por este método.

A consideração dos limites dos elementos, como os limites de reativos das barras ou os limites dos taps dos transformadores poderiam ser levados em consideração na classificação dos elementos como possíveis eliminadores das sobrecargas.

Foi visto nos testes realizados que muitas vezes a atuação de um único elemento é o suficiente para eliminar uma sobrecarga. Porém, existem casos em que nem a atuação do mais influente elemento é capaz de eliminar a sobrecarga. A análise da ação conjunta de vários equipamentos poderia ser uma solução para esse problema. Além disso, com uma ação conjunta de elementos da rede, poder-se-ia eliminar sobrecargas mais severas do que as apresentadas nos testes realizados neste trabalho.

Sobrecargas como a causada na linha Araraquara – São Carlos, do sistema Sul-Sudeste brasileiro fornecem um “espaço” muito pequeno para se trabalhar, uma vez que o fluxo de potência nesta linha apresenta alto fator de potência. Assim, só são possíveis de se eliminar atuando também sobre o fluxo ativo da linha. Por menor que seja o acoplamento entre magnitude de tensão e potência ativa, esse efeito pode ser de grande valia em situações emergenciais. Uma análise do comportamento da componente ativa do fluxo da linha sobrecarregada pode fornecer um critério a mais na avaliação dos fatores de sensibilidade.

Seria interessante a formulação do problema para aplicação em ambiente competitivo e de múltiplos mercados, com algumas adaptações e considerando os custos destas sobrecargas.

A incorporação ao algoritmo da análise dos perfis de tensão após as ações corretivas através de um modelo de programação linear, por exemplo, poderia reduzir o trabalho manual e selecionar as ações sem que seja necessária a preocupação com este problema por parte do operador.

De maneira geral, os métodos CRIC e CRIC-constante apresentaram melhores resultados que o método Newton, principalmente para os testes com casos reais, sendo que o método CRIC apresenta uma vantagem no tempo de processamento e na qualidade dos fatores de sensibilidade. Deve-se ressaltar que o método CRIC-constante não depende do estado do sistema, o que pode ser visto pelas equações de formação de sua matriz. O objetivo de implementar este método para cálculo de sensibilidade foi de analisar os efeitos causados pelas suas aproximações, sendo que a alma deste trabalho é o método CRIC.

O cálculo dos fatores de sensibilidade é rápido e em todos os testes suas indicações conseguiram eliminar as sobrecargas, podendo ser aplicados sem problemas em situações emergenciais.



## Referências Bibliográficas

---

- [1] F. I. Denny, D. E. Dismukes, “Power System Operations and Electricity Markets”, CRC Press, 2002.
- [2] J. L. Carpentier, “CRIC: A new active-reactive decoupling process in load flow, optimal load flows and system control,” in *IFAC Symposium on Power Systems and Plant Control*, Beijing, China, 1986.
- [3] A. Monticelli, A. Garcia, O. R. Saavedra, “Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations and Testing”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No.4, pp. 1425-1431, Nov. 1990.
- [4] C. A. Aumuller, K. Saha, “Determination of Power Systems Coherent Bus Groups by Novel Sensitivity-Based Method for Voltage Stability Assessment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, No. 3, pp. 1157-1164, August 2003.
- [5] F. C. Gaino, “Avaliação da Capacidade de Transferência e Alívio de Sobrecargas em Redes de Transmissão”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Ilha Solteira, SP, 2004.
- [6] S. Grijalva, “Complex Flow-Based Non-Linear ATC Screening”, Ph.D. dissertation, Univ. Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 2002.
- [7] P. I. Caro-Ochoa, “Evaluation of Transmission Congestion Impacts on Electricity Markets”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2003.
- [8] R. Rajaraman, F. L. Alvarado, “Inefficiencies of NERC’s Transmission Loading Relief Procedures”, *The Electricity Journal*, Vol. 11, No. 8, Oct. 1998.
- [9] J. A. O. Lala, “Um Modelo com Pré-Despacho com Gerenciamento de Congestionamento no Sistema de Transmissão”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002.

- 
- [10] M. Liu, "A Framework for Congestion Management Analysis", Tese de Doutorado, Universidade de Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2005.
- [11] "NERC Transmission Transfer Capability Task Force", in *Available Transfer Capability Definitions and Determination*. Princeton, NJ: North American Electric Reliability Council, 1996.
- [12] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. NY, 1996.
- [13] T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", John Wiley & Sons, Inc. NY, 1982
- [14] O. I. Elgerd, "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", McGraw-Hill do Brasil, Ltda. São Paulo, 1981.
- [15] T. K. P. Medicherla, R. Billinton, M. S. Sachdev, "Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviate Line Overloads – Analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 98, No.6, pp. 1876-1884 Nov./Dec. 1979.
- [16] C. B. Effiong, J. A. Momoh, "Power System Preventive Control Using Artificial Neural Networks Based Generation Rescheduling Method", in *Proceedings of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 1438-1439 Agosto 1997.
- [17] B. Delfino, G. B. Denergi, M. Invernizzi, A. Canonero, P. Forzano, "An Expert System for Alleviating Overloads in Electric Power Systems: General Concepts and Applications", in *Proceedings of the Fourth Conference on Artificial Intelligence Applications*, pp. 299-304 Mar. 1988.
- [18] P. R. Bijwe, D. P. Kothari, L. D. Arya, "Alleviation of line Overloads and Voltage Violations by Corrective Rescheduling", *IEE Proceedings C. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 140, No.4, pp. 249-255 Jul. 1993.
- [19] A. Shandilya, H. Gupta, J. Sharma, "Method for Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviate line Overloads Using Local Optimisation", *IEE Proceedings C. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 140, No.5, pp. 337-342 Sep. 1993.
- [20] M. El Arini, "An Efficient Method for Alleviating Line Overloads and Voltage Violations by Corrective and Reactive Rescheduling", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 1, pp. 373-378 May 1996.
- [21] G.A. Bakare, G. Krost, "Removal of Overloads and Voltage Problems in Electric Power Systems Using Genetic Algorithm and Knowledge Base"; *IEE 5th International Conference on Power System Management and Control (PSMC)*, pp. 53-58, London (UK), April 2002.

- [22] J. A. Momoh, J. Z. Zhu, G. D. Boswell, S. Hoffman, "Power System Security Enhancement by OPF with Phase Shifter", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No.2, pp. 287-293 May 2001.
- [23] C. A. Castro, H. D. Abrantes, "A New Efficient Nonlinear Programming Based Method for Branch Overload Elimination", *Electric Power Components And Systems*, v. 30, pp. 525-537 Philadelphia, PA, 2002.
- [24] Y. H. Song, A. T. Johns, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IEE, London, UK, 1999.
- [25] S. N. Singh, A. K. David, "Optimal Location of FACTS Devices for Congestion Management", *Electric Power System Research*, Vol. 58, pp. 71-79, 2001.
- [26] E. N. Asada, "Estudos Sobre Alterações Topológicas para Alívio de Sobrecargas em Sistemas de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.
- [27] A. S. Deif, "Advanced Matrix Theory for Scientists and Engineers", Second Edition, Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland, 2001.
- [28] J. Peschon, D. S. Piercy, W. F. Tinney, O. J. Tveit, "Sensitivity in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 87, No. 1, pp. 1687-1696, August 1968.
- [29] P. R. Gribik, D. Shirmohammadi, S. Hao, C. L. Thomas, "Optimal Power Flow Sensitivity Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, v.5, n.3, p 969-976, August 1990.
- [30] A. G. Exposito, J. L. M. Ramos, J. L. R. Macias, Y. C. Salinas, "Sensitivity-based reactive power control for voltage profile improvement", *IEEE Transactions on Power Systems*, v.8, n.3, p 937-945, August 1993.
- [31] S. Greene, "Margin and Sensitivity Methods for Security Analysis of Electrical Power Systems", Tese de Doutorado, Universidade de Wisconsin, Madison, 1998.
- [32] K. R. W. Bell, D. S. Kirschen, "Improved Sensitivities in MW Dispatch for Control of Voltage", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No.3, pp. 1034-1040 Aug. 1992.
- [33] I. Dobson, S. Greene, R. Rajaraman, C. L. DeMarco, F. L. Alvarado, M. Glavic, J. Zhang, R. Zimmerman "Electric Power Transfer Capability: Concepts, Applications, Sensitivity, Uncertainty", PSERC, Nov. 2001.
- [34] S. Greene, I. Dobson, F.L. Alvarado, "Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 1, Feb. 1997, pp. 262-272.

- [35] S. Chaitusaney, B. Eua-Arporn, “AC power flow sensitivities for transmission cost allocation”, *Asia Pacific. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Vol. 2, pp. 858-863, Oct. 2002.
- [36] S. W. Kang, A. P. Mellopoulos, “Contingency selection via quadratized power flow sensitivity analysis”, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 3, pp. 1494-1499, 2002.
- [37] E. Belati, “Sensibilidade em Fluxo de Potência Ótimo”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.
- [38] A. Kumar, S. C. Srivastasa, S. N. Singh, “A Zonal Congestion Management Approach Using Real and Reactive Power Rescheduling”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No.1, pp. 554-562, Feb. 2004.
- [39] A. Fattahi, M. Ehsan, “Sensitivity Based Redispatching Method for Congestion Management in a Pool Model”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 3, No. 2, article 1077, 2005.
- [40] A. Monticelli, “Fluxo de carga em redes de energia elétrica”, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1983.
- [41] J. R. S. Mantovani, “Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Solução Via Programação Linear Sucessiva Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1987.
- [42] T. Van Cutsem, “A Method to Compute Reactive Power Margins With Respect to Voltage Collapse”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 145–156, Feb. 1991.
- [43] M. C. Almeida, “Estabilidade de tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Um Método Baseado no Modelo Implicitamente Acoplado (CRIC)”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1999.
- [44] S. Ahmed, G. Strbac, “A Method for Simulation and Analysis of Reactive Power Market *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 1047–1052, Aug. 2000.
- [45] J. V. C. Santos, A. V. Garcia, “Um Método Para Auxiliar Processos de Restauração de Sistemas de Potência”, *Revista Brasileira de Controle & Automação (SBA)*, Vol. 15, No. 1, p. 85-92, Brasil, 2004.
- [46] J. R. S. Mantovani, “Um Modelo Heurístico para Solução do Problema de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1995.

- 
- [47] K. Zollenkopf, ‘Bi-factorization - Basic Computational Algorithm and Programming Techniques’, in J. K. Reid, ‘Large Sparse sets of Linear Equations’, (Academic, 1971), pp. 75-96.
- [48] ANAREDE – Programa de Análise de Redes, versão V-AGO04, CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.
- [49] L.F.N. Delboni. Conversas pessoais.