

3 Matriz de Sensibilidade QV

3.1 Introdução

A matriz de sensibilidade QV, aqui definida e denominada $[J_{SQV}]$, é obtida a partir da matriz Jacobiana do problema de fluxo de carga com o objetivo de identificar grupos de barras que tenham características similares frente a variações de potência reativa no sistema. Neste capítulo, apresenta-se a formulação do problema de fluxo de carga para calcular a matriz $[J_{SQV}]$. Uma vez obtida a matriz $[J_{SQV}]$, analisam-se seus autovalores e autovetores com a finalidade de determinar áreas de controle de tensão em sistemas-teste.

3.2 Cálculo da Matriz de Sensibilidade $[J_{SQV}]$

O cálculo da matriz $[J_{SQV}]$ parte da formulação expandida da matriz Jacobiana do problema de fluxo de carga, tal como é apresentado em [Henriques, R. M., 2009]. Esta matriz Jacobiana expandida é mostrada em (3.1):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde, os vetores ΔP e $\Delta \theta$ incluem as barras PV e PQ, os vetores ΔQ e ΔV incluem todas as barras do sistema, e os vetores Δy e Δx representam as equações que modelam os equipamentos de controle e incluem as barras de tensão controlada (Vθ e PV).

Os erros das equações da potência reativa e de controle para uma barra k de tensão controlada são dados por:

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{calc} = (Q_G + Q_{Gk} - Q_L) - Q_k^{calc} \quad (3.2)$$

$$\Delta y = V_k^{esp} - V_k^{calc} \quad (3.3)$$

$$\Delta x = \Delta Q_{Gk} \quad (3.4)$$

Ao final de cada iteração do processo de solução, a potência reativa gerada na barra k é atualizada da seguinte forma:

$$Q_{Gk}^{(v+1)} = Q_{Gk}^{(v)} + \Delta Q_{Gk}^{(v)} \quad (3.5)$$

Uma vez obtido o ponto de operação pelo algoritmo de fluxo de carga, as equações adicionais de controle Δy são retiradas e o sistema linear de equações apresentado em (3.1) passa a ter a forma mostrada em (3.6):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde,

$$[A] = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Nota-se que a submatriz J_{QV} contém todas as barras do sistema. Se somente estiveram incluídas as barras PQ, como é usual na formulação do problema de fluxo de carga tradicional, a matriz de sensibilidade resultante traria apenas as relações QV entre as barras PQ, e tirar-se-ia a possibilidade de se capturar a sensibilidade da variação da tensão terminal dos geradores nas demais barras do sistema.

Supondo-se que $\Delta P = 0$, ou seja, que não existe variação nas demandas de potência ativa das barras do sistema e que as equações adicionais de controle de tensão estão atendidas, faz-se a redução do sistema de equações em (3.6), obtendo-se:

$$\Delta Q = [J_{SQV}] \cdot \Delta V \quad (3.8)$$

onde a matriz de sensibilidade QV denominada $[J_{SQV}]$ é dada por (3.9):

$$J_{SQV} = J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \quad (3.9)$$

Nota-se que a submatriz $J_{P\theta}$ deve ser inversível.

A matriz $[J_{SQV}]$ determina a relação entre a variação incremental das variáveis de estado de tensão com a variação incremental das equações de potência reativa. A dimensão da matriz $[J_{SQV}]$ é $(nb \times nb)$, onde nb é o número de barras do sistema.

É importante destacar que o cálculo da matriz $[J_{SQV}]$ deve ser feito em um ponto de equilíbrio das equações de potência, obtido através da solução completa do problema de fluxo de carga, com a incorporação dos equipamentos de controle existentes no sistema.

3.3 Determinação de Áreas de Controle de Tensão com Base na Matriz de Sensibilidade QV

3.3.1 Método de Determinação de Áreas de Controle de Tensão

O método proposto para a determinação de áreas de controle de tensão consiste na decomposição em autovalores e autovetores da matriz $[J_{SQV}]$. A análise de seus autovalores de menor módulo tem por objetivo destacar as barras com os fatores de sensibilidade maiores, identificando a interação entre barras cujo comportamento é semelhante, formando assim as áreas de controle de tensão.

Expressando a matriz $[J_{SQV}]$ de dimensões $(nb \times nb)$ – onde nb é o número de barras do sistema – através das matrizes dos autovetores à direita (φ), autovetores à esquerda (ψ) e diagonal (Λ), obtém-se que:

$$J_{SQV} = \varphi \cdot \Lambda \cdot \psi \quad (3.10)$$

$$\text{ou: } J_{SQV}^{-1} = \varphi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \psi \quad (3.11)$$

onde a inversa da matriz diagonal Λ é dada por:

$$\Lambda^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\lambda_{nb}} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Substituindo (3.10) em (3.13) chega-se a (3.14) e (3.15). Nota-se que (3.13) tem a forma $x = [A]^{-1} \cdot b$.

$$\Delta V = [J_{SQV}]^{-1} \cdot \Delta Q \quad (3.13)$$

$$\Delta V = (\varphi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \psi) \Delta Q \quad (3.14)$$

$$\Delta V = \left(\sum_{i=1}^{nb} \frac{\varphi_i \cdot \psi_i}{\lambda_i} \right) \Delta Q \quad (3.15)$$

Observa-se em (3.15) que cada autovalor λ_i , em conjunto com os respectivos autovetores à direita e à esquerda, define o i -ésimo modo da matriz sensibilidade $[J_{SQV}]$.

Pode-se perceber que para a k -ésima barra do sistema tem-se a seguinte relação de sensibilidade entre a variável de estado associada à tensão da barra e o respectivo erro da equação de potência reativa:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_{i=1}^{nb} \frac{\varphi_{ki} \cdot \psi_{ik}}{\lambda_i} \quad (3.16)$$

Na equação (3.16), a sensibilidade da variável de estado tensão V_k em relação ao erro da equação de potência reativa Q_k , é obtida através de uma combinação de todos os autovalores e dos elementos de seus respectivos autovetores da matriz $[J_{SQV}]$.

Em linhas gerais, o método utilizado para identificação de áreas de controle com base na matriz $[J_{SQV}]$ consiste em, a partir dos módulos dos menores autovalores e através dos mode-shape destes autovalores, construir a sensibilidade QV do sistema, observando de que forma as barras se relacionam.

3.3.2 Algoritmo de Busca de Áreas de Controle de Tensão

Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma simplificado do processo de busca de áreas a partir da consideração dos autovalores de menor módulo da matriz $[J_{SQV}]$. A variável i representa o número de autovalores da matriz $[J_{SQV}]$, σ é o módulo mínimo considerado no mode-shape, nb_{em_grupos} é o percentual total de barras já inseridas em alguma área, ε_1

é o percentual mínimo de barras que se quer agrupar, e ε_2 é o número de autovalores que deve ser utilizado na busca.

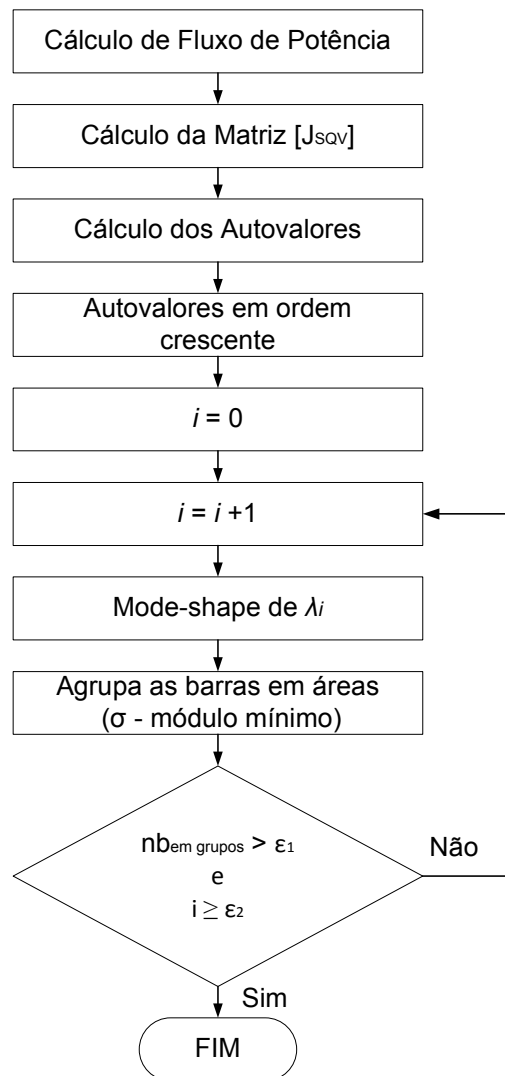


Figura 3.1 – Fluxograma Simplificado da Busca de Áreas de Controle pelos Menores Autovalores da Matriz $[J_{sqv}]$

3.4 Resultados da Definição de Áreas de Controle de Tensão

Com o objetivo de avaliar o método baseado na análise dos menores autovalores da matriz $[J_{sqv}]$ e compará-lo com o método baseado na análise dos maiores autovalores da matriz $[VCS]$, serão usados os mesmos sistemas-teste do capítulo anterior:

- Sistema 10 Barras;
- Sistema 18 Barras;
- Sistema *New England* 39 Barras;
- Sistema IEEE 118 Barras;
- Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras.

Os dados destes sistemas-teste estão no Apêndice C. Os resultados da definição de áreas de controle de tensão serão apresentados a seguir.

3.4.1 Sistema 10 Barras

O primeiro sistema a ser analisado é mostrado na Figura 3.2. Este sistema consta de 10 barras, 9 circuitos e 4 geradores. O sistema é dividido em duas partes: uma parte à direita da barra 30 e a outra parte à esquerda da barra 130. Entre as duas, há uma reatância jX variável.

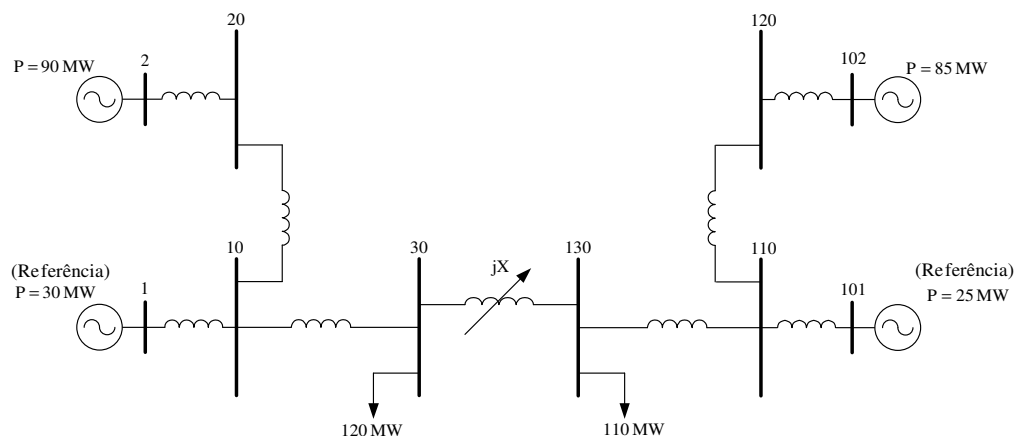


Figura 3.2 – Diagrama Unifilar do Sistema 10 Barras

As barras 1 e 101 foram consideradas como barras de referência para evitar que parte do sistema fique sem referência angular quando a impedância jX for elevada. Para a determinação das áreas, foram considerados dois valores distintos para a reatância jX : 0,01% e 10000%.

3.4.1.1 Baixa Impedância de Interligação

O sistema de equações lineares construído para representar o sistema de 10 barras mostrado na Figura 3.2, é dado por (3.17):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_{10} \\ \Delta P_{20} \\ \Delta P_{30} \\ \Delta P_{102} \\ \Delta P_{110} \\ \Delta P_{120} \\ \Delta P_{130} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_{10} \\ \Delta Q_{20} \\ \Delta Q_{30} \\ \Delta Q_{101} \\ \Delta Q_{102} \\ \Delta Q_{110} \\ \Delta Q_{120} \\ \Delta Q_{130} \\ \hline \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_{101} \\ \Delta V_{102} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_{130}} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_{130}} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{130}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_{130}}{\partial \theta_{130}} & \frac{\partial P_{130}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_{130}}{\partial V_{130}} & 0 & \dots & 0 \\ \hline \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{130}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_{130}} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{130}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{130}}{\partial \theta_{130}} & \frac{\partial Q_{130}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_{130}}{\partial V_{130}} & 0 & \dots & 1 \\ \hline 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_{10} \\ \Delta \theta_{20} \\ \Delta \theta_{30} \\ \Delta \theta_{102} \\ \Delta \theta_{110} \\ \Delta \theta_{120} \\ \Delta \theta_{130} \\ \hline \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_{10} \\ \Delta V_{20} \\ \Delta V_{30} \\ \Delta V_{101} \\ \Delta V_{102} \\ \Delta V_{110} \\ \Delta V_{120} \\ \Delta V_{130} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_{101} \\ \Delta Q_{102} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

A matriz $[J_{SQV}]$ obtida através do procedimento de redução descrito na Seção 3.2 e considerando $jX = 0,01\%$, é dada em (3.18):

$$J_{SQV} = \begin{bmatrix} 5,07 & 0,00 & -5,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 14,40 & 0,00 & -14,31 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -4,93 & 0,00 & 29,71 & -14,09 & -11,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -14,17 & -14,17 & 28,17 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -10,94 & 0,00 & 9797,57 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -9786,83 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 5,07 & 0,00 & -5,01 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 14,40 & 0,00 & -14,31 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -4,93 & 0,00 & 29,74 & -14,09 & -11,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -14,18 & -14,18 & 28,20 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -9786,83 & 0,00 & 0,00 & -10,94 & 0,00 & 9797,58 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Os autovalores da matriz (3.18) são ordenados por módulo em forma crescente e dados pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i
1	0,1042	6	23,5752
2	1,9196	7	26,8991
3	5,1905	8	46,6742
4	5,1996	9	48,0100
5	8,1271	10	19584,4094

Observa-se que o primeiro menor autovalor λ_1 possui um módulo pequeno em comparação com os demais.

Com o objetivo de determinar áreas de controle de tensão a partir da análise dos menores autovalores da matriz $[J_{SQV}]$, utiliza-se o algoritmo apresentado na Figura 3.1. Os valores das variáveis utilizadas no algoritmo são: $\sigma=0,5$; $\varepsilon_1=70\%$ e $\varepsilon_2=2$. A visualização gráfica do primeiro autovetor à direita normalizado, que corresponde ao mode-shape do primeiro menor autovalor $\lambda_1 = 0,1042$, é dada pela Figura 3.3.

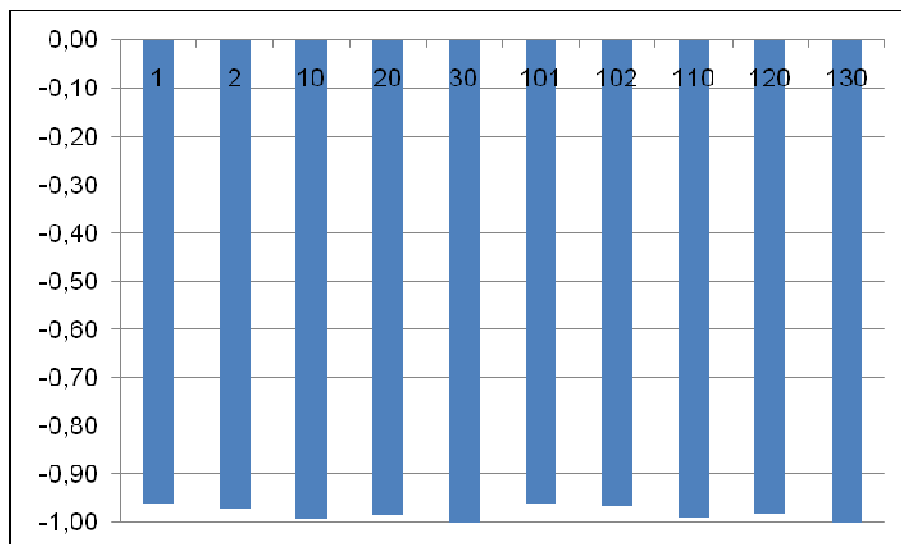


Figura 3.3 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Este mode-shape, onde todas as barras participam com um módulo muito semelhante, deve-se ao fato que a adição das equações de potência reativa de todos os geradores, incluindo as barras de referência na matriz $[J_{SQV}]$, resulta em um grupo de equações que se tornam próximos de serem linearmente dependentes.

O mode-shape referente ao autovalor $\lambda_2 = 1,9196$ é apresentado na Figura 3.4.

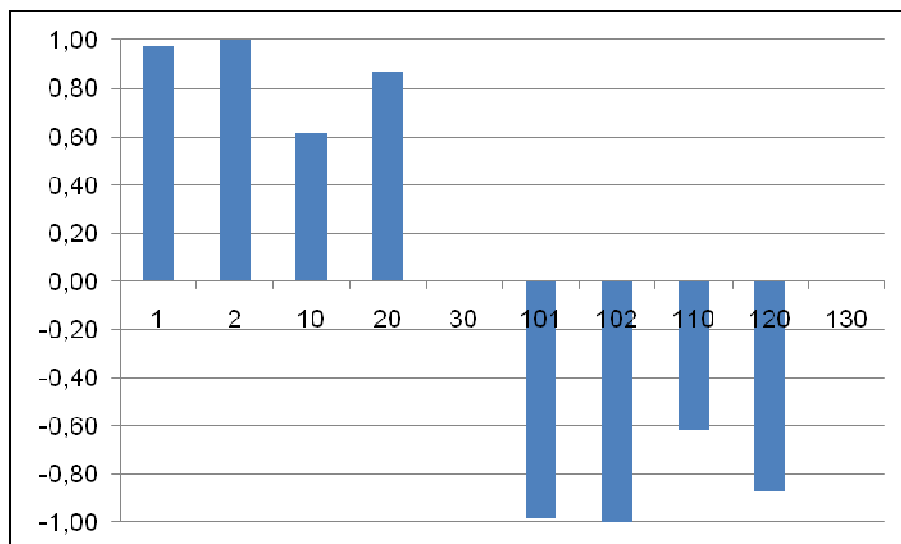


Figura 3.4 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Neste mode-shape percebe-se a divisão do sistema em dois grupos, sendo um composto pelas barras 1, 2, 10 e 20 que apresentam módulo superior a 0,5 (valor de σ) e sinal positivo, e outro grupo composto pelas barras 101, 102, 110 e 120 que apresentam módulo superior a 0,5 e sinal negativo. Nota-se que as barras 30 e 130 não participam de nenhum dos dois grupos porque seu módulo é próximo de zero e abaixo da tolerância σ .

Como após a avaliação do mode-shape de λ_2 , os critérios ε_1 e ε_2 foram atendidos, a busca de áreas de controle é concluída. Na Figura 3.5, apresenta-se o sistema de 10 barras dividido nas duas áreas de controle encontradas pelos menores autovalores λ_1 e λ_2 .

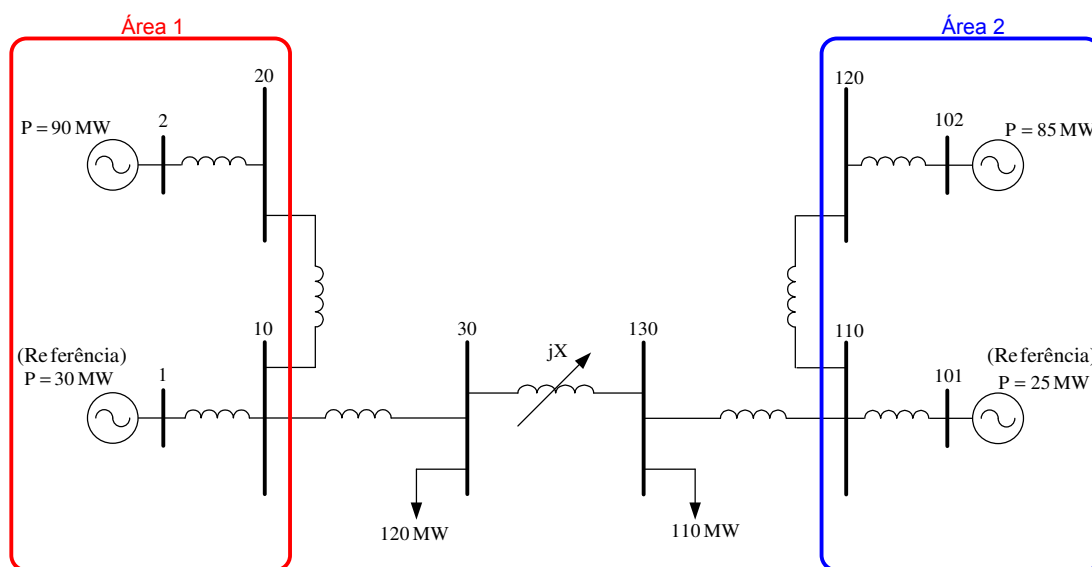


Figura 3.5 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras com $jX=0,01\%$

Com a preocupação de saber que tipo de informação traz os autovalores não utilizados na busca de áreas, analisam-se os mode-shape dos dois autovalores seguintes. Os resultados estão nas Figuras 3.6 e 3.7.

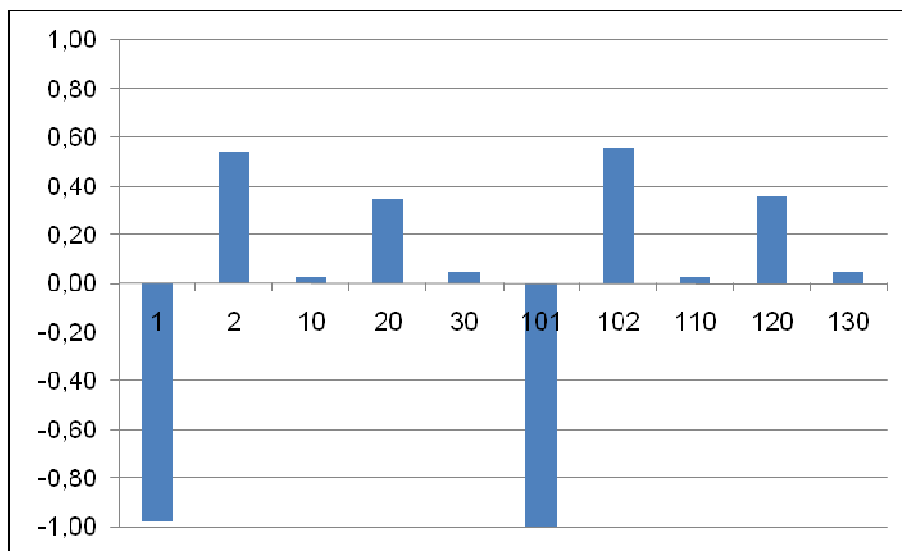


Figura 3.6 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

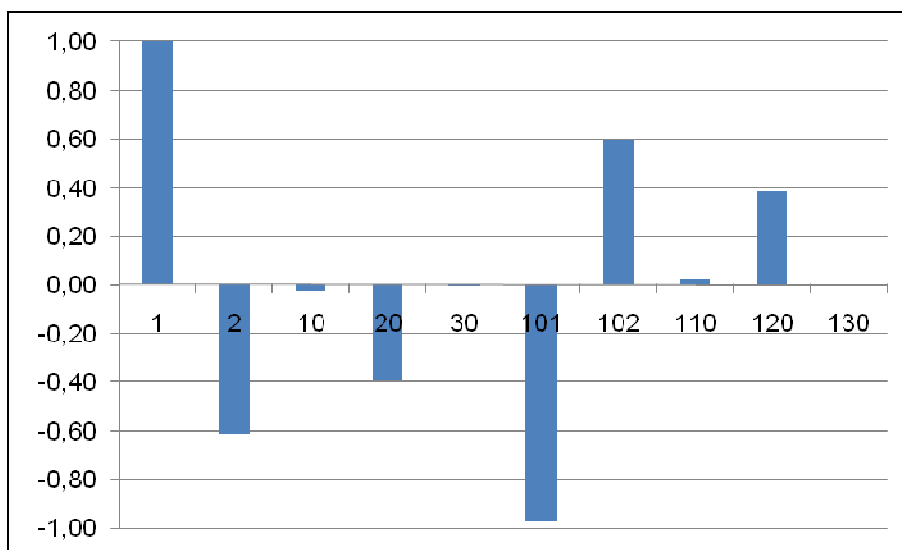


Figura 3.7 – Mode-Shape de λ_4 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Nota-se que nos mode-shape dos autovalores λ_3 e λ_4 não há nenhuma informação direta sobre áreas de controle.

3.4.1.2 Alta Impedância de Interligação

A mesma análise feita para o sistema de 10 barras com $jX = 0,01\%$ será agora realizada considerando $jX = 10000\%$. Logo, esta condição cria um desacoplamento entre as barras à esquerda da barra 30 e à direita da barra 130.

A matriz $[J_{SQV}]$ obtida a partir do sistema de equações lineares dado em (3.17), e aplicando o procedimento de redução descrito na Seção 3.2, é dada em (3.19):

$$J_{SQV} = \begin{bmatrix} 5,08 & 0,00 & -5,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 14,41 & 0,00 & -14,31 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -4,94 & 0,00 & 29,63 & -14,07 & -11,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -14,16 & -14,13 & 28,18 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -11,07 & 0,00 & 10,63 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 5,07 & 0,00 & -5,01 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 14,39 & 0,00 & -14,31 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -4,94 & 0,00 & 29,82 & -14,11 & -10,96 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -14,19 & -14,22 & 28,21 & -0,04 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,01 & 0,00 & 0,00 & -10,91 & 0,00 & 10,83 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Os autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ são ordenados por módulo em forma crescente e dados pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

i	Módulo do Autovalor λ_i	i	Módulo do Autovalor λ_i
1	0,0710	6	8,1978
2	0,1769	7	26,8883
3	5,1839	8	26,9478
4	5,1988	9	47,9508
5	8,0483	10	48,0832

Destaca-se que λ_1 e λ_2 possuem módulos pequenos em comparação com os demais. Estes autovalores indicam que no sistema de 10 barras, há na realidade, dois sistemas distintos de 5 barras devido à existência de $jX = 10000\%$ entre as barras 30 e 130. Estas áreas poderiam ser representadas como dois sistemas distintos que possuem suas próprias matrizes $[J_{SQV}]$, cada uma com um autovalor de módulo baixo.

Como se deseja determinar áreas de controle de tensão a partir da análise dos menores autovalores (em módulo) da matriz $[J_{SQV}]$ utiliza-se o algoritmo apresentado na Figura 3.1.

Os valores das variáveis utilizadas no algoritmo são: $\sigma = 0,5$; $\varepsilon_1 = 70\%$ e $\varepsilon_2 = 2$.

O mode-shape para o autovalor $\lambda_1 = 0,0710$ é dado pela Figura 3.8. Neste mode-shape a primeira área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,5 que são as barras 101, 102, 110, 120 e 130.

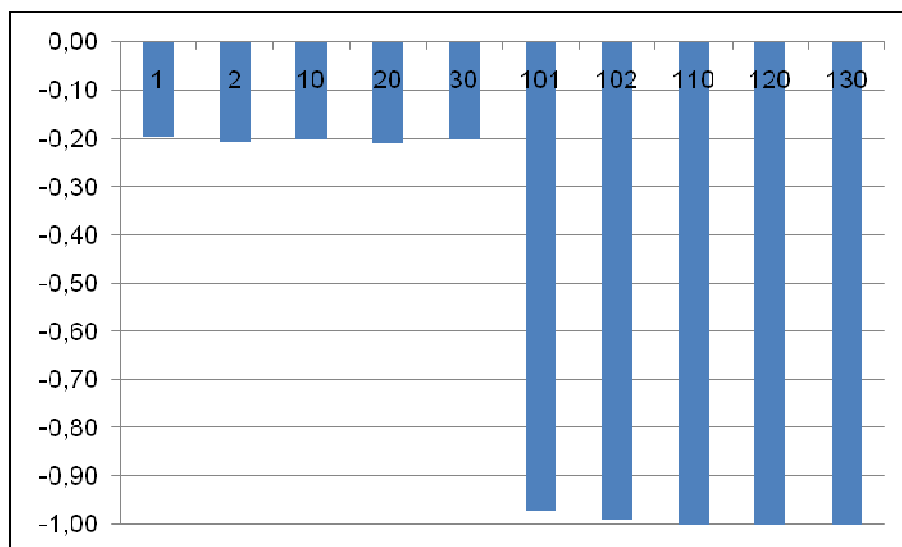


Figura 3.8 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

O mode-shape para o autovalor $\lambda_2 = 0,1769$ é apresentado na Figura 3.9. Neste mode-shape, a segunda área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,5 que são as barras 1, 2, 10, 20 e 30.

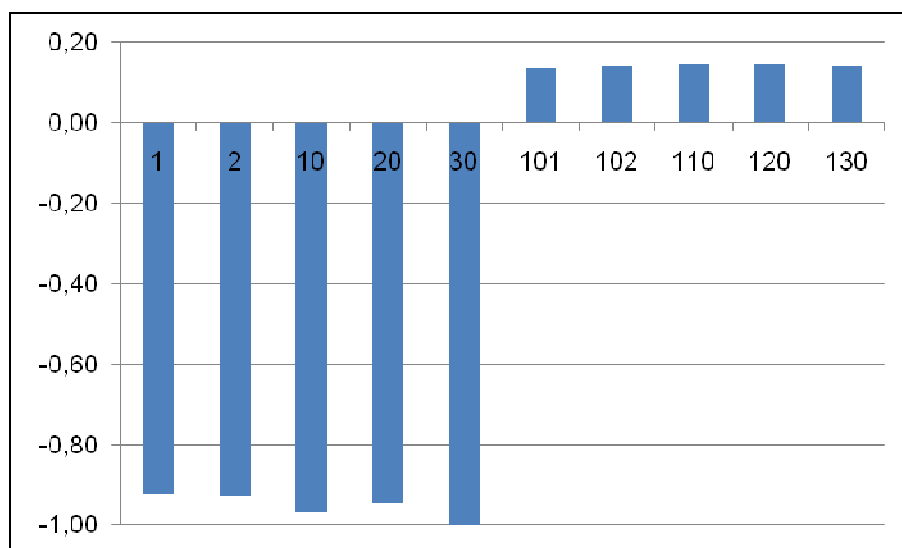


Figura 3.9 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Como após a avaliação do mode-shape de λ_2 , os critérios ε_1 e ε_2 foram atendidos, a busca de áreas de controle é encerrada. Na Figura 3.10, mostra-se a divisão do sistema de 10 barras através dos menores autovalores.

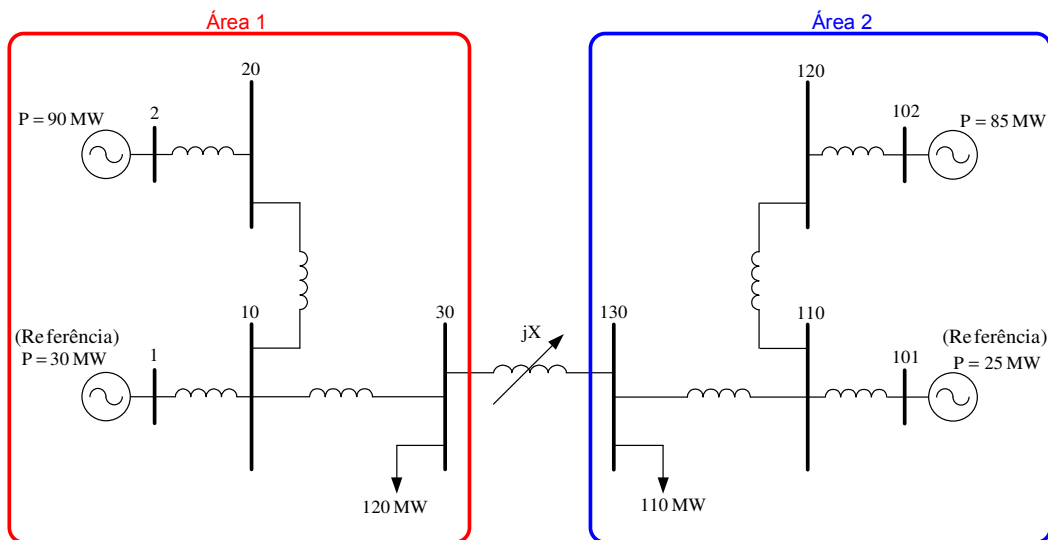


Figura 3.10 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras com $jX=10000\%$

Mesmo havendo concluído com a divisão do sistema em áreas de controle através do algoritmo de busca, analisa-se os mode-shape dos dois autovalores seguintes com o intuito de observar que tipo de informação traz os autovalores não utilizados na busca de áreas. Os resultados estão nas Figuras 3.11 e 3.12.

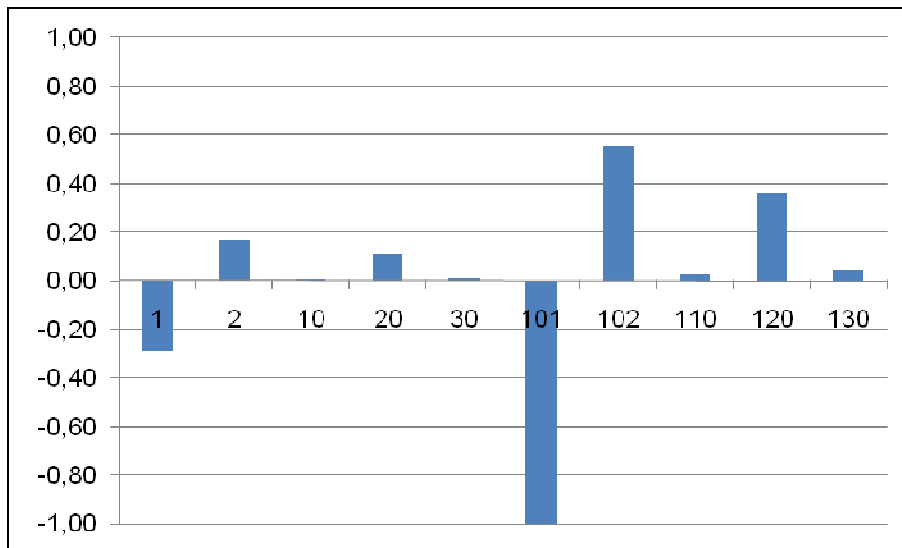


Figura 3.11 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

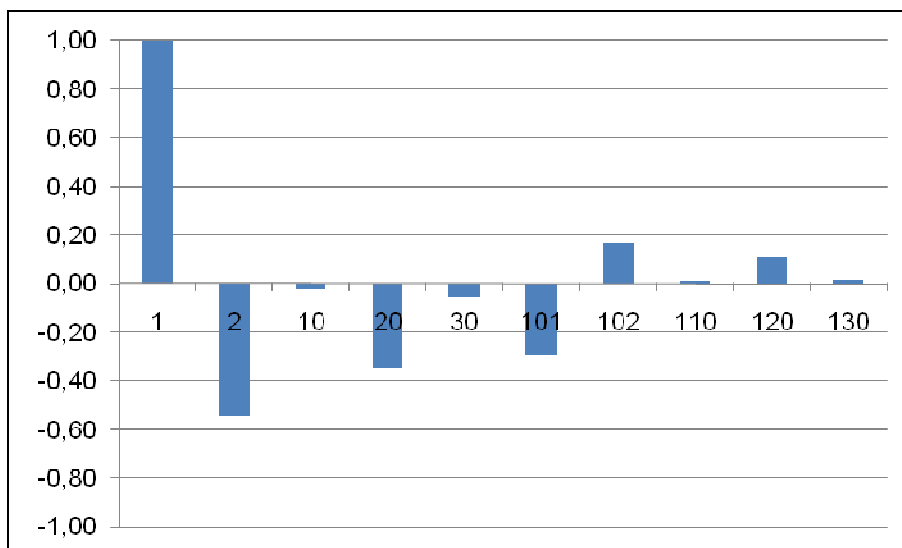


Figura 3.12 – Mode-Shape de λ_4 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Nota-se que nos mode-shape dos autovalores λ_3 e λ_4 , não há nenhuma informação sobre áreas de controle.

3.4.2 Sistema 18 Barras

O segundo sistema a ser analisado é o sistema de 18 barras mostrado na Figura 3.13. Este sistema é apresentado em [Henriques, R. M., 2009]. Foi gerado com o intuito de comprovar que os autovalores identificam subáreas de controle dentro de uma área. O sistema de 18 barras é uma duplicação do sistema de 10 barras da Figura 3.2, replicando abaixo do sistema original a mesma topologia à esquerda da barra 30 e à direita da barra 130, mantendo-se a interligação jX entre as barras 30 e 130.

O sistema consta de 18 barras, 17 circuitos, 8 geradores e uma reatância variável jX entre as barras 30 e 130.

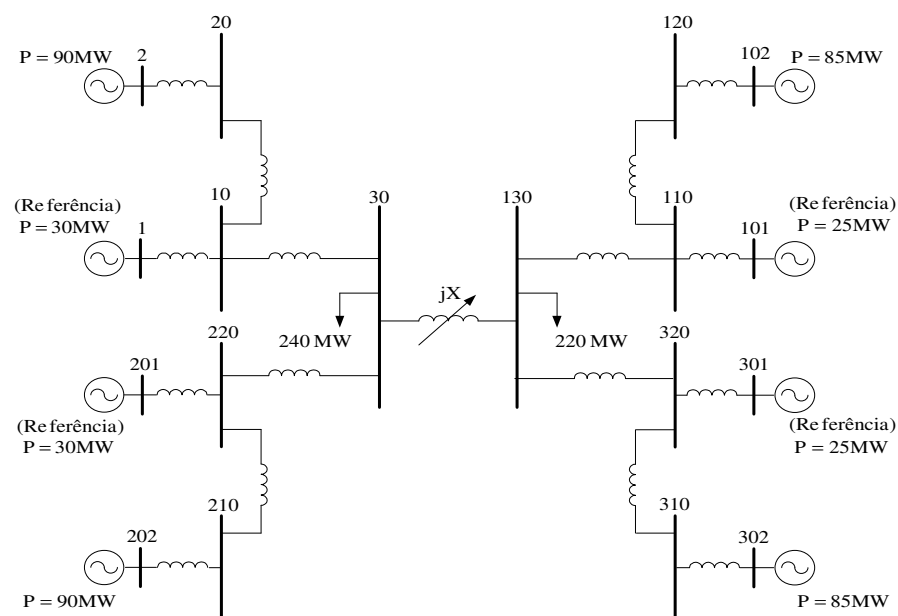


Figura 3.13 – Diagrama Unifilar do Sistema 18 Barras

Para a determinação das áreas, foram considerados dois valores distintos para a reatância jX : 0,01% e 10000%.

3.4.2.1 Baixa Impedância de Interligação

Neste item, apresenta-se a divisão do sistema de 18 barras em áreas de controle, obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ utilizando o algoritmo apresentado na Figura 3.1. Os valores das variáveis utilizadas no algoritmo são: $\sigma = 0,5$; $\varepsilon_1 = 70\%$ e $\varepsilon_2 = 4$. Os autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ para $jX = 0,01\%$ são ordenados por módulo em forma crescente e dados pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i
1	0,1167	7	5,1997	13	31,4800
2	1,9176	8	5,1998	14	46,6646
3	1,9190	9	11,8004	15	46,6717
4	1,9233	10	23,5714	16	46,6886
5	5,1934	11	23,5721	17	50,5119
6	5,1997	12	23,5849	18	19595,1614

Observa-se que o primeiro autovalor ($\lambda_1 = 0,1167$) possui um módulo pequeno em comparação com os demais. A visualização gráfica do primeiro autovetor à direita normalizado, que corresponde ao mode-shape do primeiro autovalor, é dada na Figura 3.14.

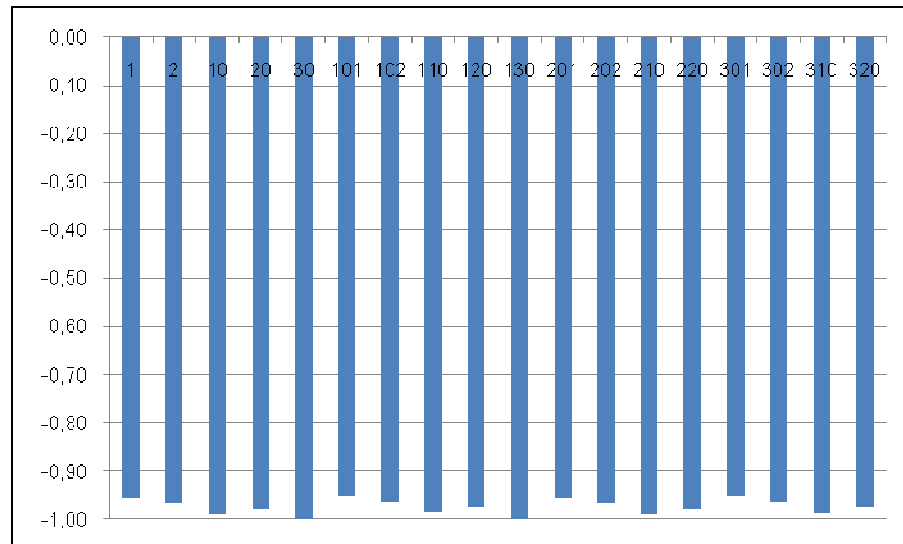


Figura 3.14 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Este mode-shape, onde todas as barras participam com um módulo muito semelhante, deve-se ao fato que a adição das equações de potência reativa de todos os geradores, incluindo as barras de referência na matriz $[J_{SQV}]$, resulta em um grupo de equações que se tornam próximos de serem linearmente dependentes.

O mode-shape referente ao autovalor $\lambda_2 = 1,9176$ é apresentado na Figura 3.15.

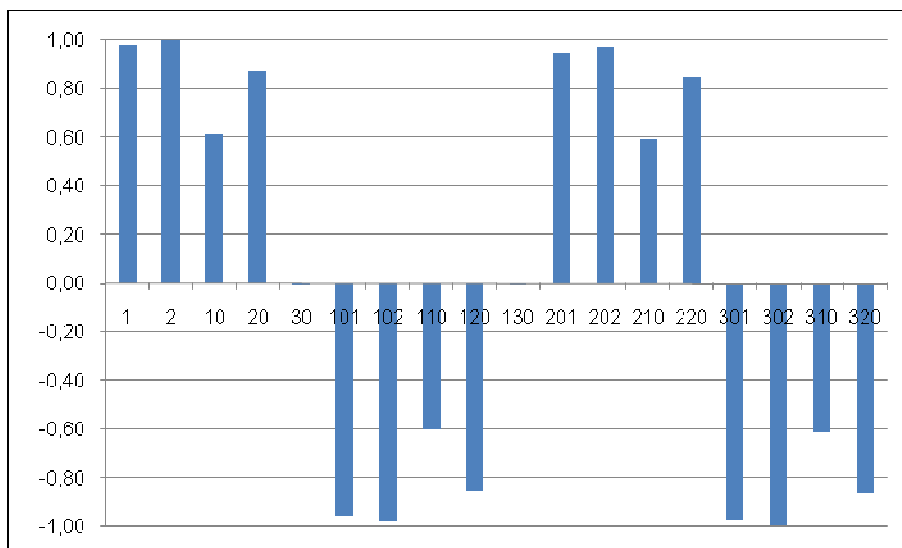


Figura 3.15 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SOV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Neste mode-shape percebe-se a divisão do sistema em dois grupos, sendo um composto pelas barras 1, 2, 10, 20, 201, 202, 210 e 220 que apresentam módulo superior a 0,5 (valor de σ) e sinal positivo, e outro grupo composto pelas barras 101, 102, 110, 120, 301, 302, 310 e 320 que apresentam módulo superior a 0,5 e sinal negativo.

O mode-shape para o autovalor $\lambda_3 = 1,9190$ é dado pela Figura 3.16 e o mode-shape para o autovalor $\lambda_4 = 1,9233$ é dado pela Figura 3.17.

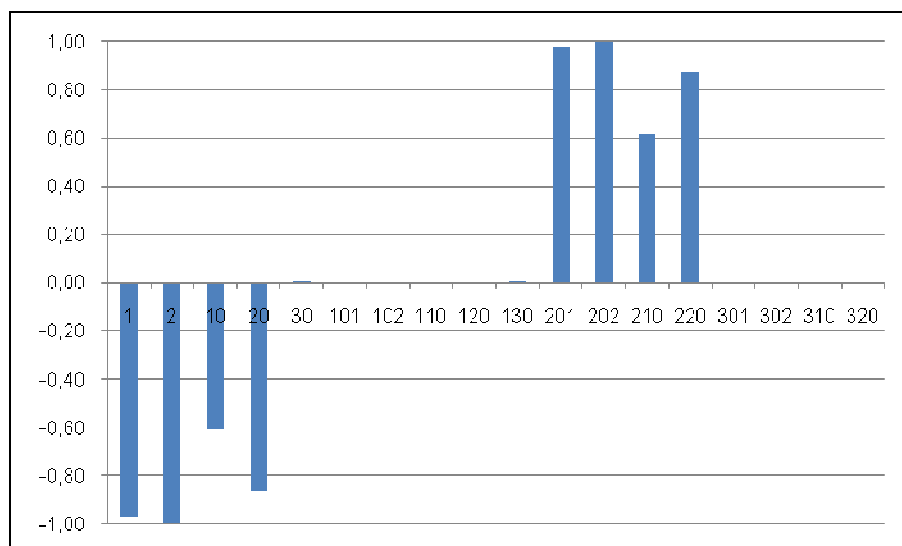


Figura 3.16 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz $[J_{SOV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

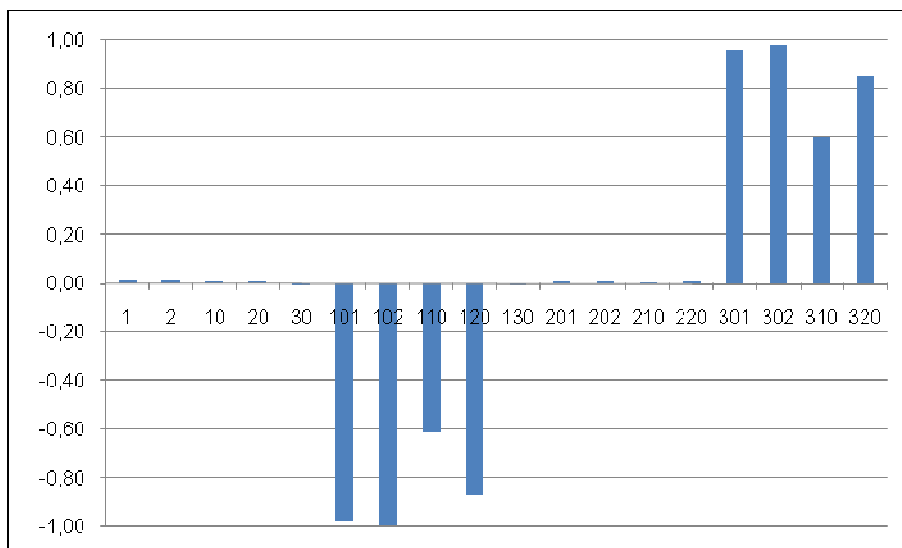


Figura 3.17 – Mode-Shape de λ_4 da Matriz $[J_{SOV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Nas Figuras 3.16 e 3.17, nota-se que os autovalores λ_3 e λ_4 subdividem as áreas que foram determinadas através do autovalor λ_2 . Se os autovalores λ_3 e λ_4 , foram considerados na divisão do sistema de 18 barras em áreas de controle, este sistema seria dividido em quatro áreas A, B, C e D, como é mostrado na Figura 3.18.

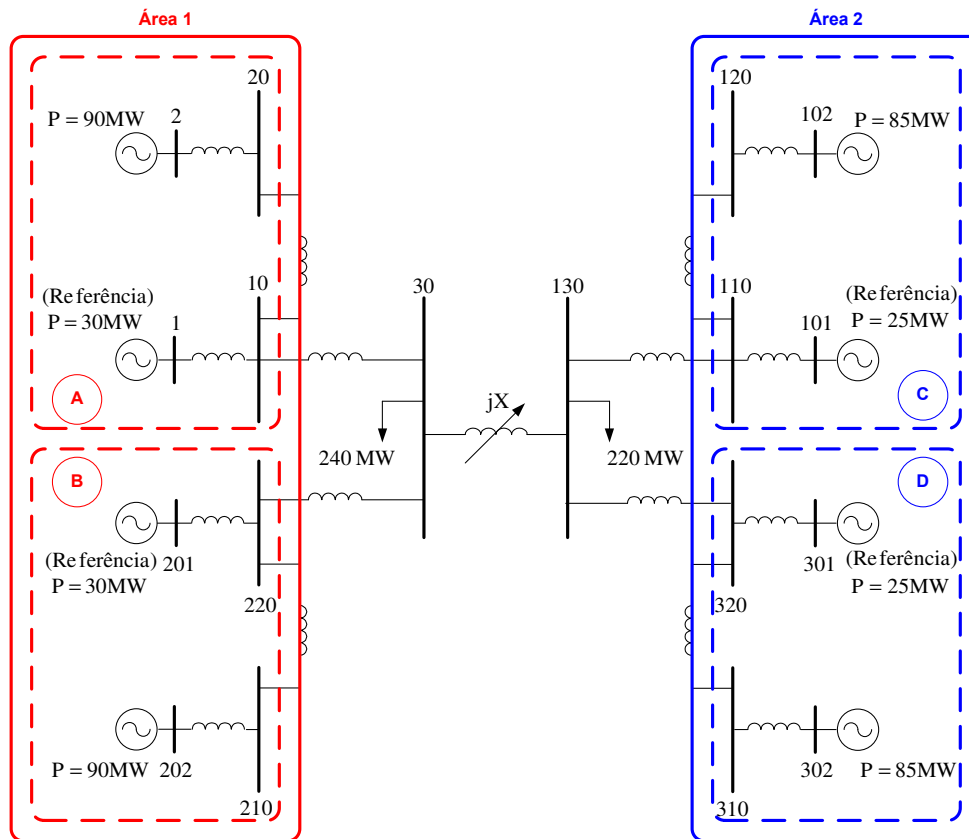


Figura 3.18 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras com $jX=0,01\%$

3.4.2.2 Alta Impedância de Interligação

A mesma análise feita para o sistema da Figura 3.13 com $jX = 0,01\%$ será agora realizada considerando $jX = 10000\%$. Logo, esta condição cria um desacoplamento entre as barras à esquerda da barra 30 e à direita da barra 130.

Os autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ são ordenados por módulo em forma crescente e dados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i
1	0,1062	7	5,1941	13	31,4236
2	0,1455	8	5,2020	14	31,5089
3	1,9071	9	11,7209	15	46,6224
4	1,9181	10	11,8192	16	46,7205
5	5,1879	11	23,5437	14	50,4488
6	5,1917	12	23,5933	18	50,5752

Observa-se que λ_1 e λ_2 possuem módulos pequenos em comparação com os demais. Estes autovalores indicam que no sistema de 18 barras, há na realidade, dois sistemas distintos devido à existência de $jX = 10000\%$ entre as barras 30 e 130. Estas áreas poderiam ser representadas como dois sistemas distintos que possuem suas próprias matrizes $[J_{SQV}]$, cada uma com um autovalor de módulo baixo.

Como se deseja determinar áreas de controle de tensão a partir da análise dos menores autovalores (em módulo) da matriz $[J_{SQV}]$ utiliza-se o algoritmo apresentado na Figura 3.1. Os valores das variáveis utilizadas no algoritmo são: $\sigma = 0,5$; $\varepsilon_1 = 70\%$ e $\varepsilon_2 = 4$.

O mode-shape para o autovalor $\lambda_1 = 0,1062$ é dado pela Figura 3.19. Neste mode-shape a primeira área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,5 que são as barras 101, 102, 110, 120, 130, 301, 302, 310 e 320.

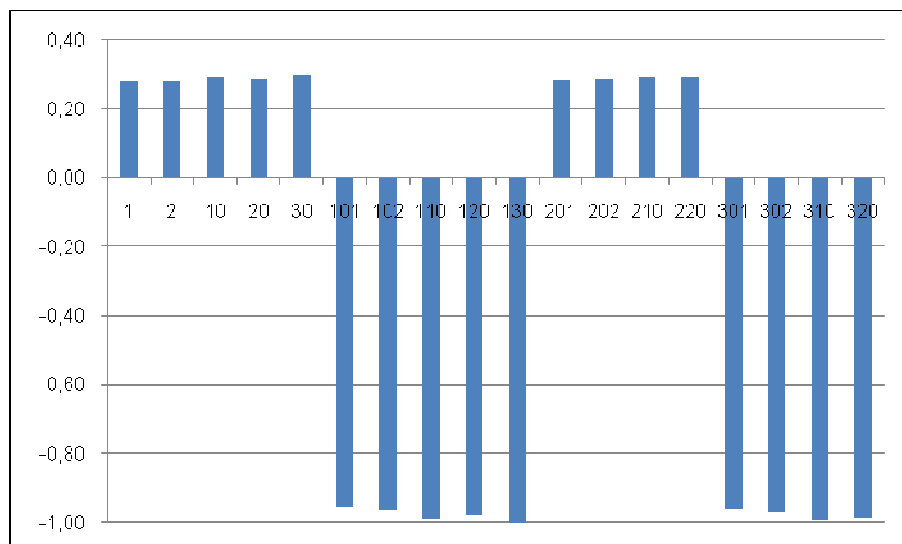


Figura 3.19 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

O mode-shape para o autovalor $\lambda_2 = 0,1455$ é apresentado na Figura 3.20. Neste mode-shape a segunda área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,5 que são as barras 1, 2, 10, 20, 30, 201, 202, 210 e 220.

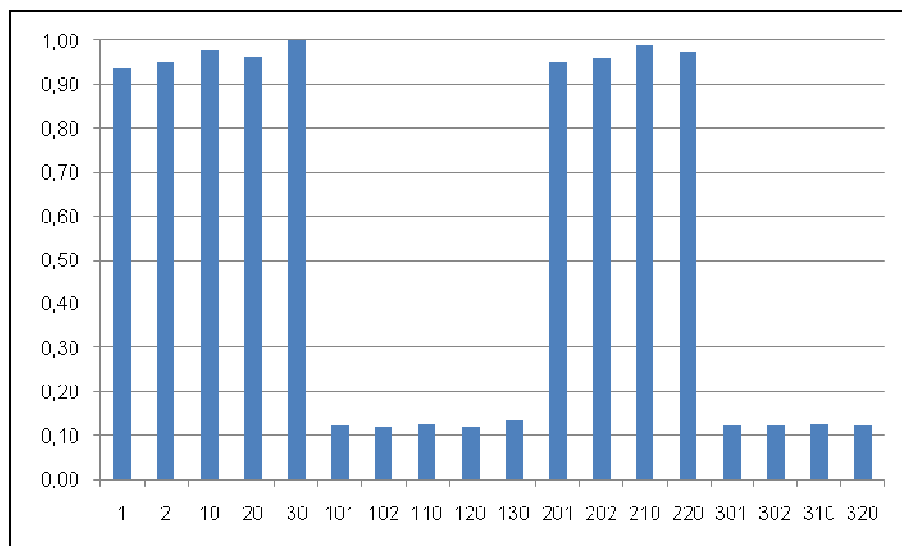


Figura 3.20 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Pode-se observar que os mode-shape dos autovalores λ_1 e λ_2 representam o desacoplamento entre as barras à esquerda da barra 30 e à direita da barra 130. Percebe-se que as áreas 1 e 2 determinadas pelos autovalores λ_1 e λ_2 não influenciam

uma a outra. Os mode-shape para os autovalores $\lambda_3 = 1,9071$ e $\lambda_4 = 1,9181$ são dados pelas Figuras 3.21 e 3.22.

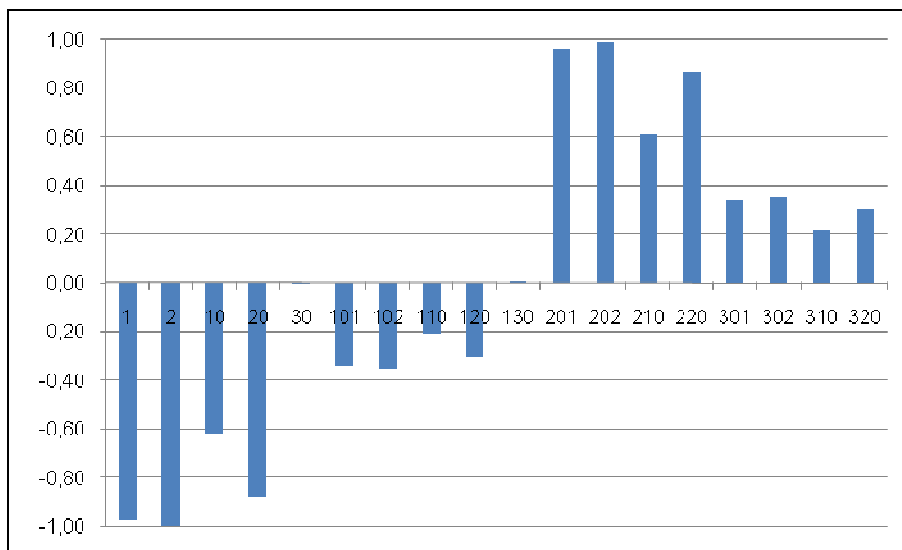


Figura 3.21 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

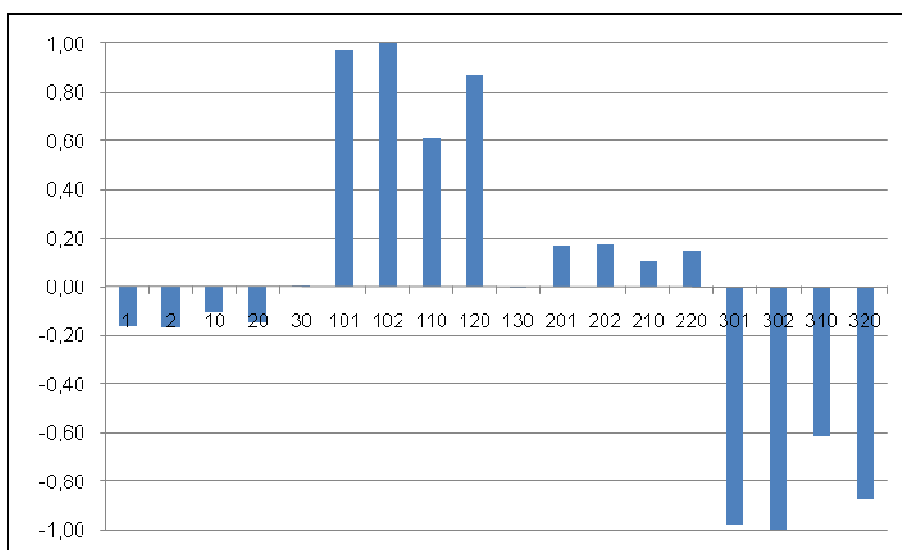


Figura 3.22 – Mode-Shape de λ_4 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Nota-se que os mode-shape dos autovalores λ_3 e λ_4 representam subdivisões nas áreas que foram determinadas através dos autovalores λ_1 e λ_2 , explicitando assim a existência de áreas de controle de menor porte.

Se os autovalores λ_3 e λ_4 foram considerados na divisão do sistema de 18 barras em áreas de controle, o resultado obtido seria o mesmo encontrado no item anterior. Na Figura 3.23, mostra-se o sistema dividido duas áreas 1 e 2 com suas respectivas subáreas A, B, C e D.

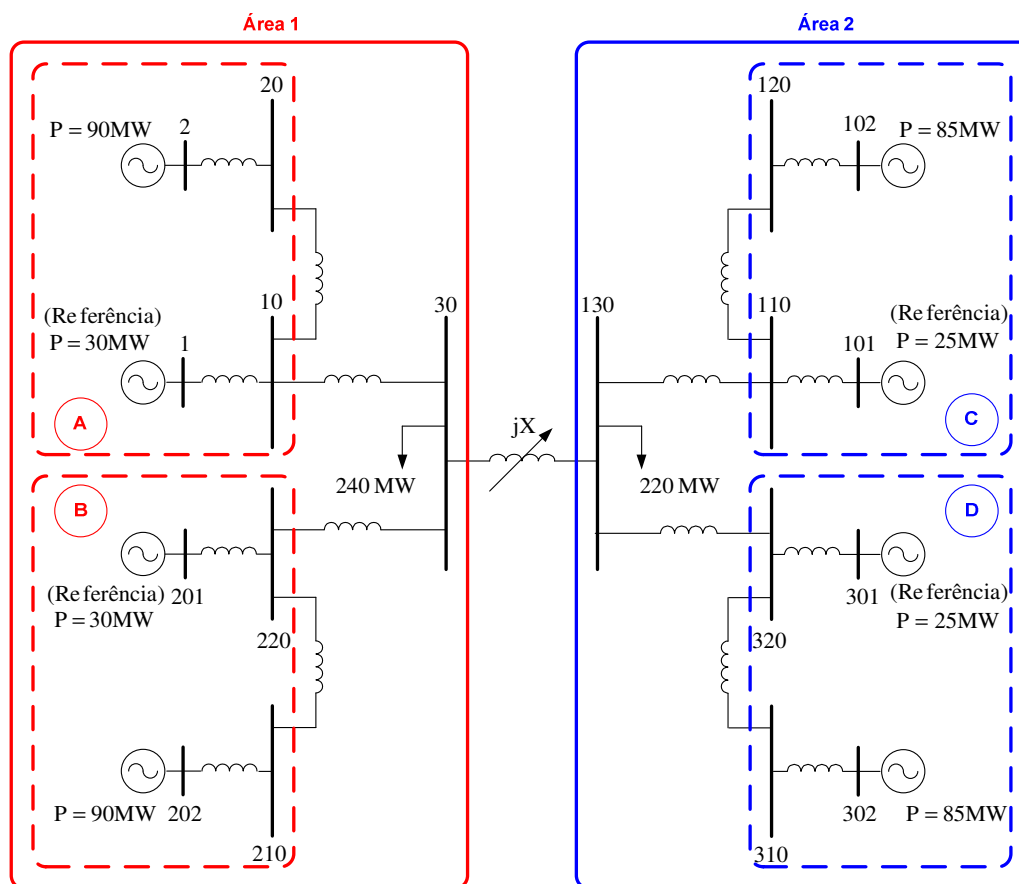


Figura 3.23 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 18 Barras com $jX=10000\%$

3.4.3 Sistema *New England* 39 Barras

Neste item, apresenta-se a determinação de áreas de controle para o sistema *New England*. O diagrama unifilar deste sistema é exibido na Figura 3.24. As características principais do sistema estão na Tabela 3.5. Os dados do sistema são mostrados no Apêndice C.

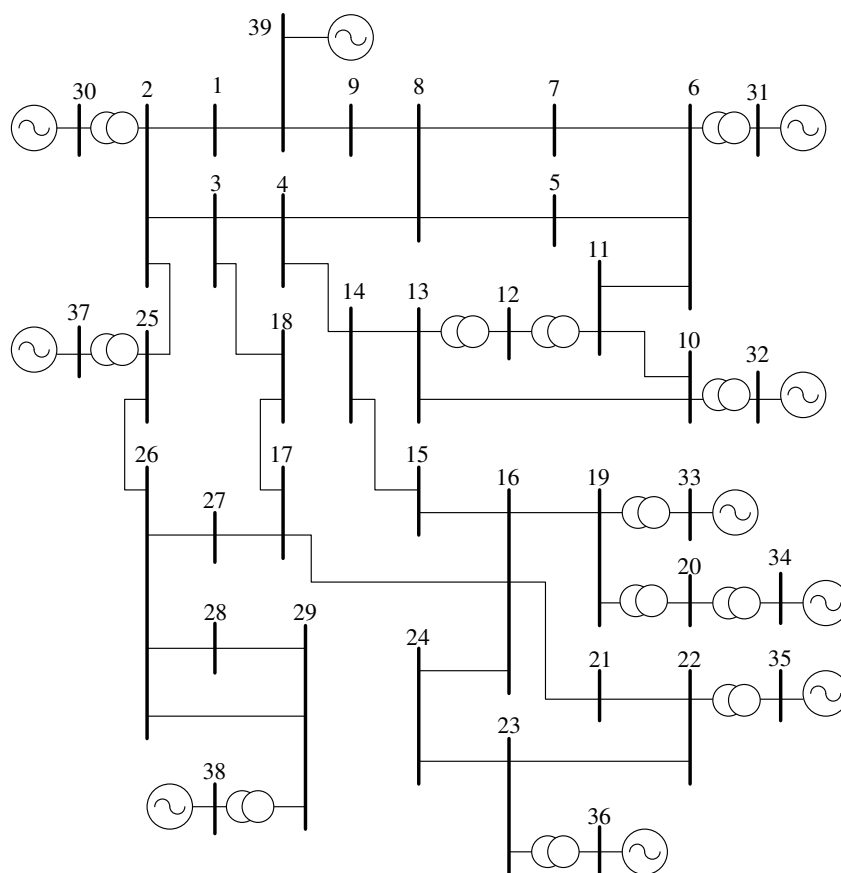


Figura 3.24 – Diagrama Unifilar do Sistema *New England* 39 Barras

Tabela 3.5 – Características Principais do Sistema *New England* 39 Barras

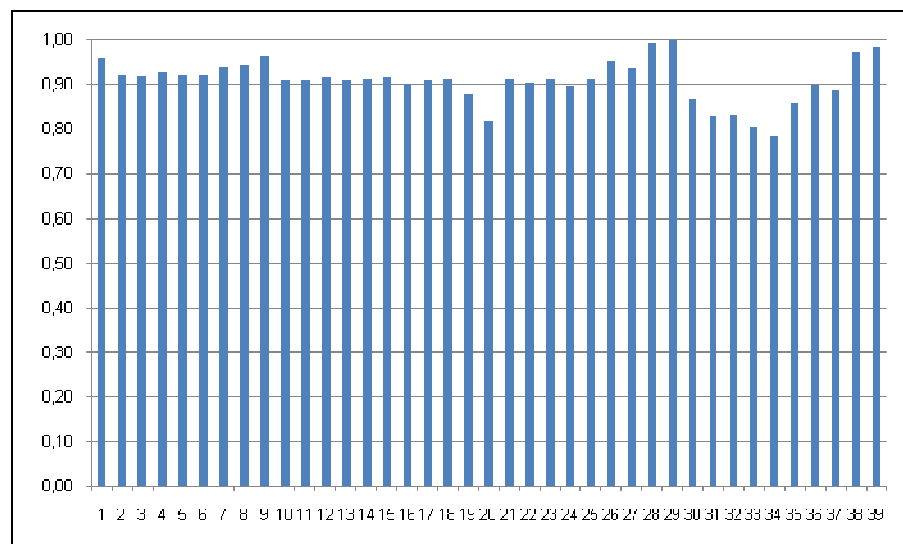
Parâmetros Principais do Sistema	Quantidade
Barras	39
Circuitos	46
Geradores	10
Transformadores	12
Carga Ativa	6150,5 MW
Carga Reativa	1408,9 MVar

Novamente o algoritmo da Figura 3.1 é utilizado para determinar as áreas de controle de tensão a partir da análise dos menores autovalores da matriz $[J_{SQV}]$. Os valores das variáveis utilizadas no algoritmo são: $\sigma = 0,2$; $\varepsilon_1 = 70\%$ e $\varepsilon_2 = 3$. Os autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ são ordenados por módulo em forma crescente e dados pela Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema 39 Barras

i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i	i	Autovalor λ_i
1	0,9678	14	61,3076	27	221,1197
2	4,4328	15	70,0682	28	223,9045
3	4,7963	16	79,9206	29	236,9538
4	11,1492	17	88,4739	30	277,9636
5	11,2635	18	93,7675	31	338,2320
6	17,3769	19	121,5888	32	367,5344
7	32,7822	20	126,4766	33	375,6414
8	33,4259	21	135,4548	34	398,5193
9	41,2912	22	138,0975	35	413,1317
10	44,3985	23	147,8699	36	529,5831
11	47,8958	24	157,0620	37	676,0993
12	48,0591	25	179,6960	38	796,5805
13	53,3735	26	210,1978	39	1041,0851

A visualização gráfica do mode-shape para o primeiro menor autovalor $\lambda_1 = 0,9678$ é dada na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 39 Barras

Este mode-shape, onde todas as barras participam com um módulo muito semelhante, deve-se ao fato que a adição das equações de potência reativa de todos os geradores,

incluindo as barras de referência na matriz $[J_{SQV}]$, resulta em um grupo de equações que se tornam próximos de ser linearmente dependentes.

O mode-shape correspondente ao segundo autovalor $\lambda_2 = 4,4328$ é mostrado na Figura 3.26.

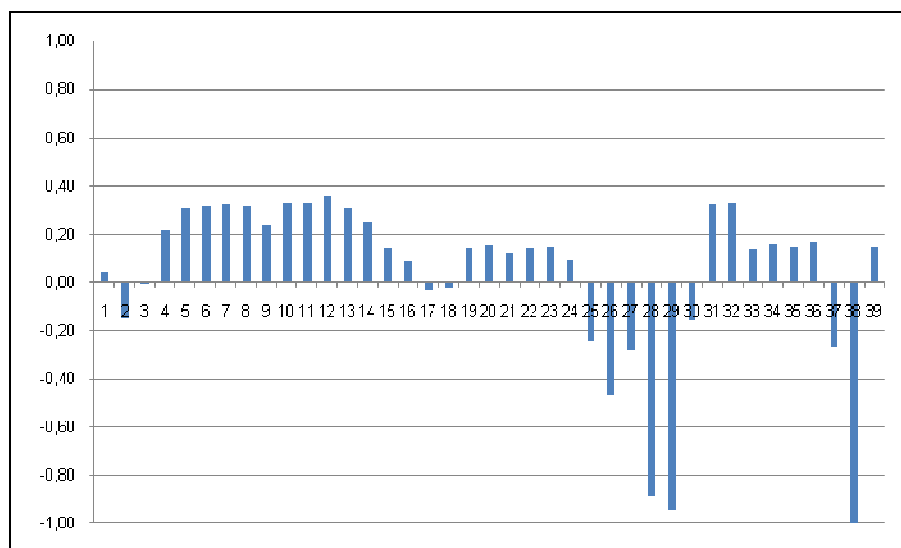


Figura 3.26 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 39 Barras

Neste mode-shape percebe-se a primeira divisão do sistema. A primeira área é composta pelas barras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 31 e 32 que apresentam módulos positivos e superiores a 0,2 (valor estabelecido para σ). Outro grupo é composto pelas barras 25, 26, 27, 28, 29, 37 e 38 que apresentam módulos negativos e superiores a 0,2.

Na Figura 3.27, mostra-se o mode-shape referente ao terceiro autovalor $\lambda_3 = 4,7963$.

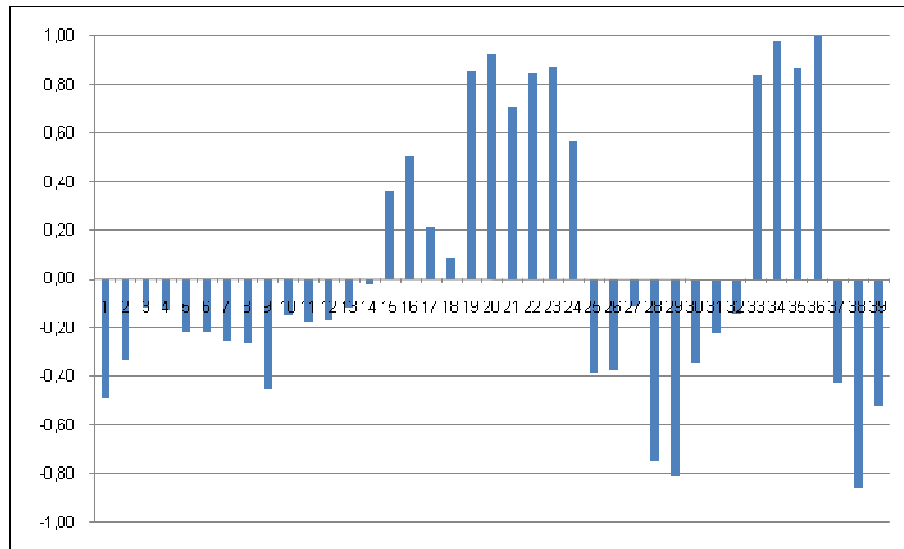


Figura 3.27 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz [VCS] para o Sistema 39 Barras

Neste mode-shape, apresenta-se a segunda divisão do sistema. A terceira área é composta pelas barras 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 33, 34, 35 e 36. De outro lado, das barras que apresentam módulos negativos e superiores a 0,2: as barras 1, 2, 30 e 39 são adicionadas à segunda área que, finalmente, é composta pelas barras 1, 2, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 e 39. As barras 5, 6, 7, 8, 9 e 31 pertencem à primeira área de controle.

Como após a avaliação do mode-shape de λ_3 , os critérios ε_1 e ε_2 foram atendidos, a busca de áreas de controle é concluída. A divisão do sistema *New England* é apresentada na Figura 3.28.

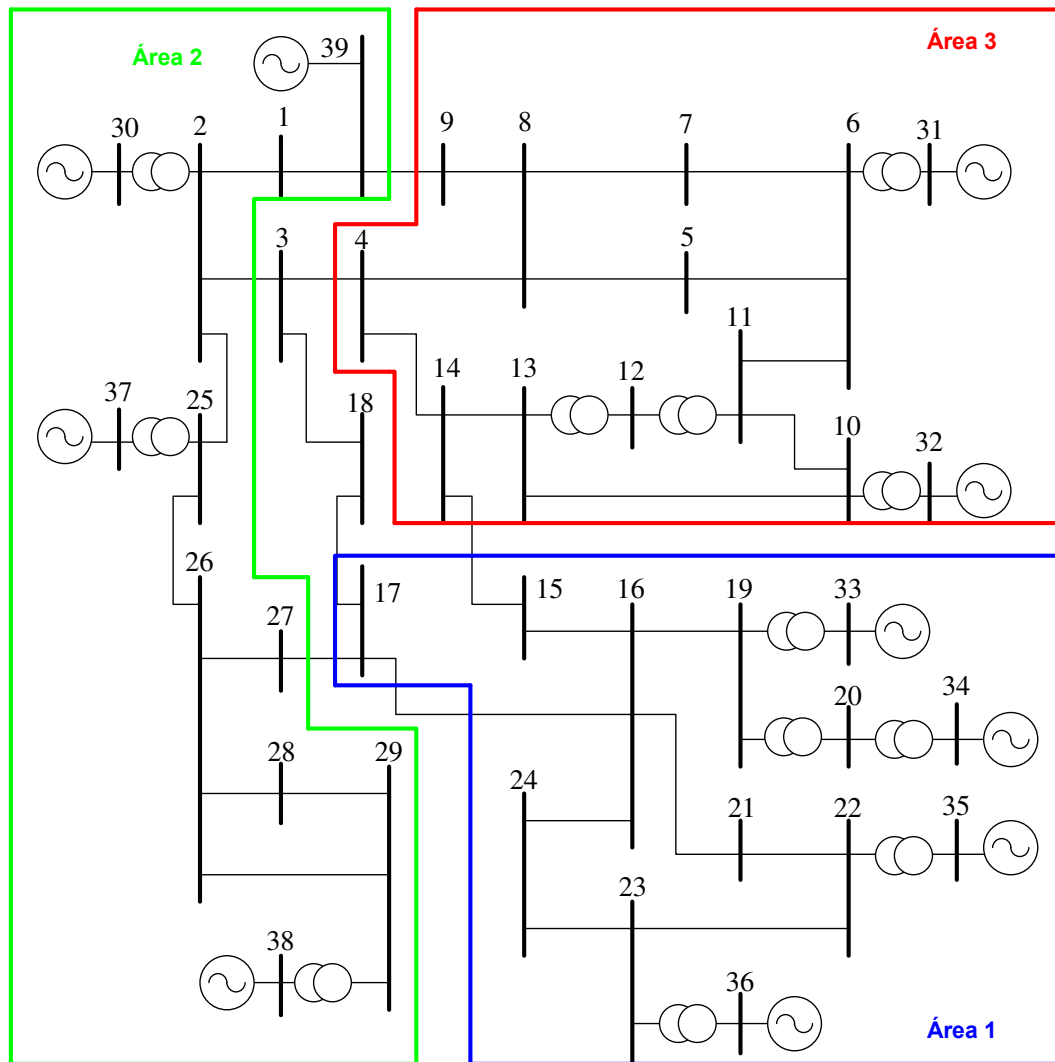


Figura 3.28 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema 39 Barras

3.4.4 Sistema IEEE 118 Barras

As áreas de controle para o sistema de 118 barras foram determinadas utilizando o algoritmo da Figura 3.1. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 3.29. Suas características principais estão na Tabela 3.7. Os dados do sistema são apresentados no Apêndice C.

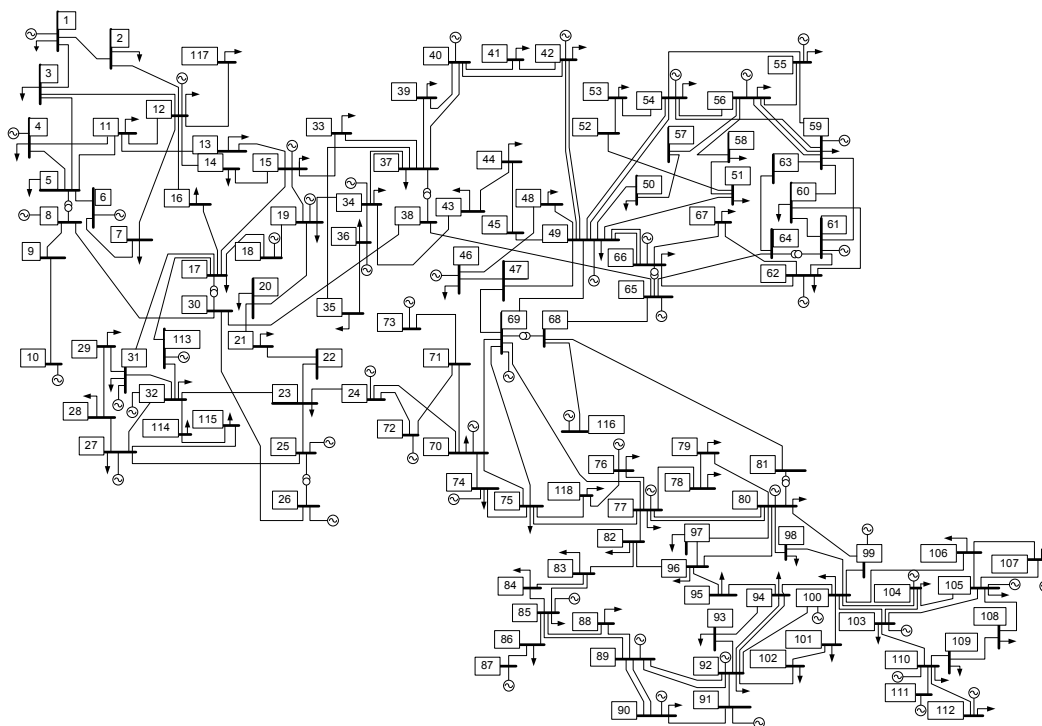


Figura 3.29 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 118 Barras

Tabela 3.7 – Características Principais do Sistema IEEE 118 Barras

Parâmetros Principais do Sistema	Quantidade
Barras	118
Circuitos	186
Geradores	54
Transformadores	9
Carga Ativa	3668 MW
Carga Reativa	1438 MVar

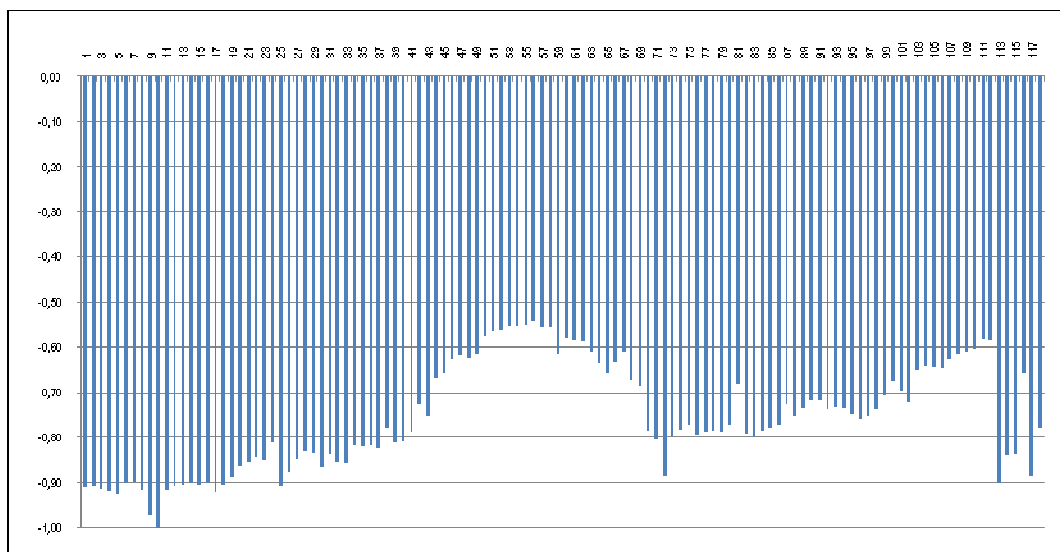
Os valores das variáveis do algoritmo de busca de áreas são: $\sigma = 0,5$; $\varepsilon_1 = 70\%$ e $\varepsilon_2 = 3$.

Os 10 maiores autovalores da matriz [VCS] são dados pela Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema IEEE 118 Barras

i	Módulo do Autovalor λ_i	i	Módulo do Autovalor λ_i
1	0,0171	6	1,7489
2	0,3394	7	2,1706
3	0,6158	8	2,5522
4	1,0495	9	3,6783
5	1,2727	10	3,8630

O mode-shape para o primeiro maior autovalor $\lambda_1 = 0,0171$ é mostrado na Figura 3.30.

Figura 3.30 – Mode-Shape de λ_1 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema IEEE 118 Barras

Observa-se que, este mode-shape, onde todas as barras participam com um módulo muito semelhante, é caracterizado pela dependência linear das equações de potência reativa, devido a que não se está considerando uma barra de referência.

Analisado o primeiro autovalor, pode-se partir para a avaliação do segundo autovalor. O mode-shape referente ao autovalor $\lambda_2 = 0,3394$ é apresentado na Figura 3.31.

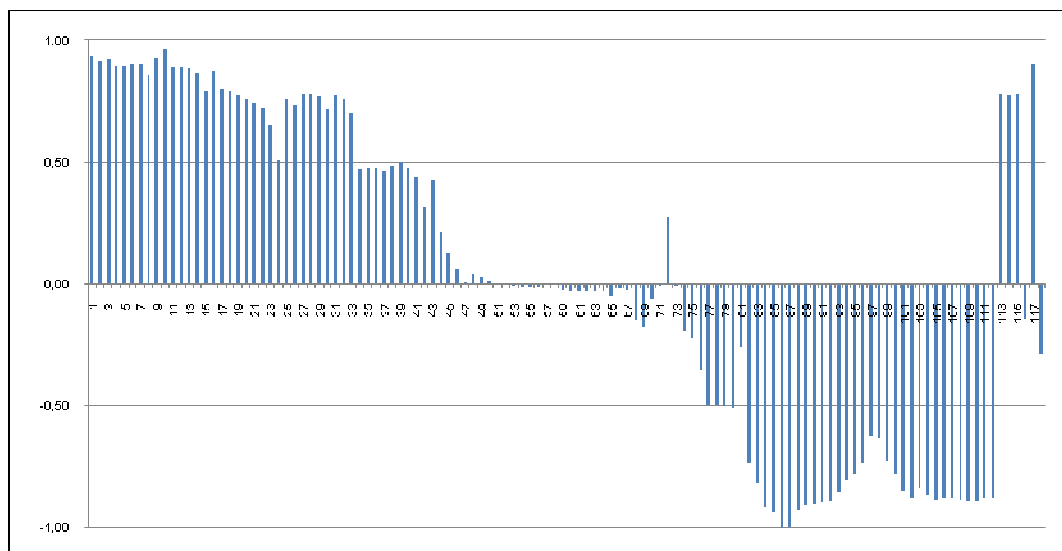


Figura 3.31 – Mode-Shape de λ_2 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema IEEE 118 Barras

Neste mode-shape percebe-se a divisão do sistema em duas áreas, sendo a primeira definida pelas barras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 113, 114, 115 e 117 que apresentam módulos positivos e superiores a 0,5 (valor estabelecido para σ), e a outra área definida pelas barras 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 e 112 que apresentam módulos negativos e superiores a 0,5.

O mode-shape seguinte a ser analisado é o terceiro maior autovalor $\lambda_3 = 0,6158$. A visualização gráfica deste mode-shape é mostrada na Figura 3.32.

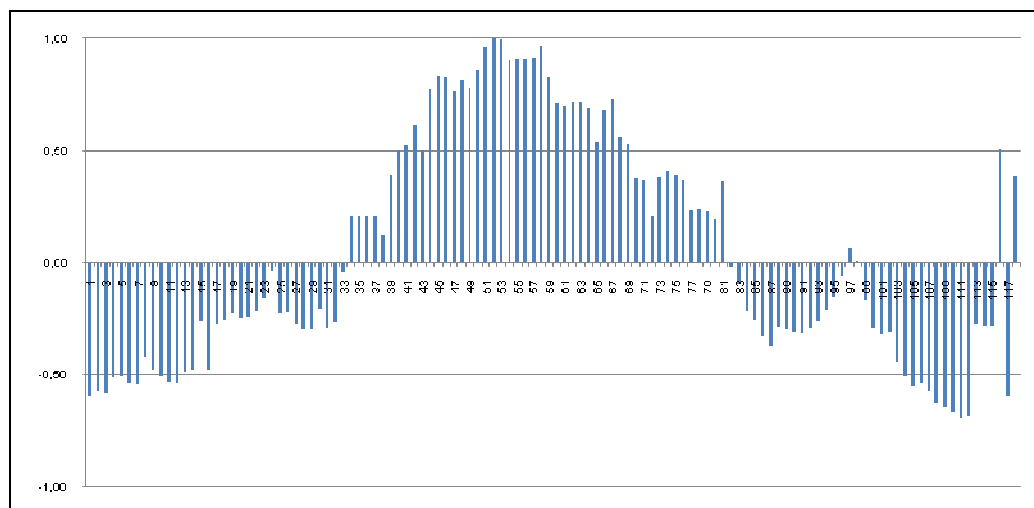


Figura 3.32 – Mode-Shape de λ_3 da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema IEEE 118 Barras

Neste mode-shape, mostra-se a divisão do sistema em uma terceira área de controle, definida pelas barras 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 116 que apresentam módulos positivos e superiores a 0,5.

Como após a avaliação do mode-shape de λ_3 , os critérios ε_1 e ε_2 foram atendidos, a busca de áreas de controle é encerrada, dividindo o sistema de 118 barras em três áreas de controle, tal como é mostrado na Figura 3.33.

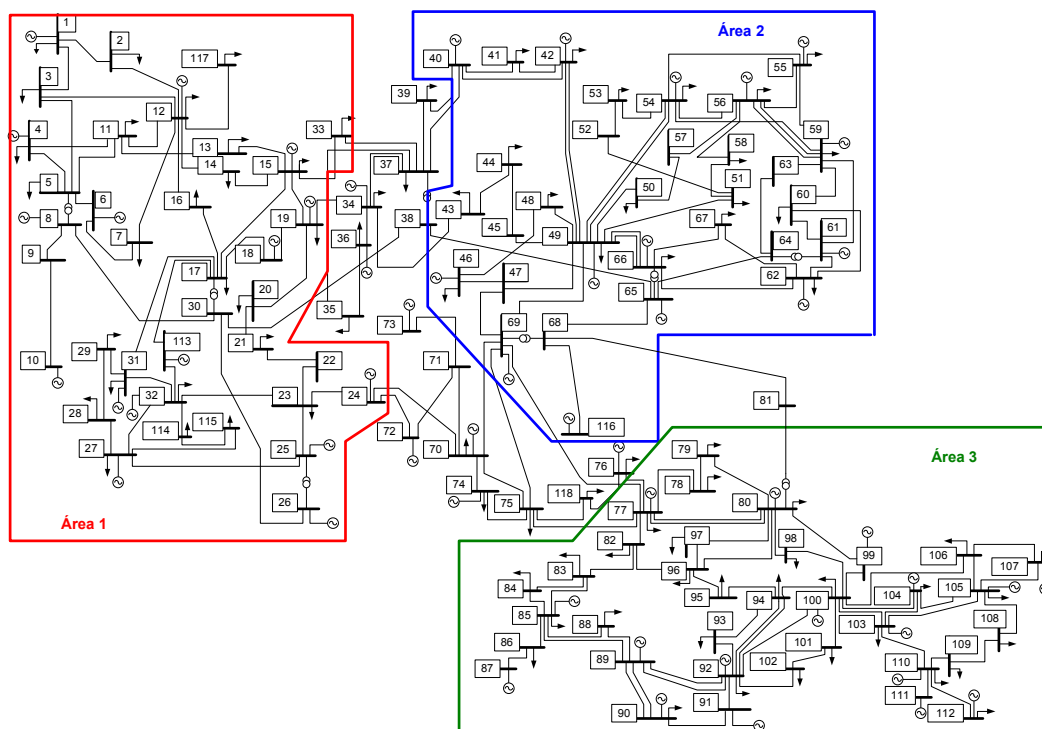


Figura 3.33 – Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema IEEE 118 Barras

3.4.5 Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

As áreas de controle para o sistema de 730 barras foram determinadas utilizando o algoritmo da Figura 3.1. Suas características principais estão na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características Principais do Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

Parâmetros Principais do Sistema	Quantidade
Barras	730
Circuitos	972
Geradores	104
Transformadores	300
Carga Ativa	28565,3 MW
Carga Reativa	6573,9 MVar

Os valores das variáveis do algoritmo de busca de áreas são: $\sigma = 0,1$; $\varepsilon_1 = 50\%$ e $\varepsilon_2 = 15$.

Os 10 menores autovalores da matriz $[J_{SQV}]$ são dados pela Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Autovalores da Matriz $[J_{SQV}]$ do Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

i	Módulo do Autovalor λ_i	i	Módulo do Autovalor λ_i
1	0,0662	6	0,3304
2	0,1355	7	0,3566
3	0,1552	8	0,3628
4	0,1703	9	0,3940
5	0,2539	10	0,4894

Após a avaliação do mode-shape de λ_5 , os critérios ε_1 e ε_2 foram atendidos, a busca de áreas de controle é concluída, dividindo o sistema de 730 barras em seis áreas de controle, tal como é mostrado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Áreas de Controle do Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

Área 1: Goiás / Brasília e Mato Grosso					
231	R.VERDE- 230	241	R.VERDE-TERC	782	QUIRINOP. 138
238	R.VERDE FCE	242	R.VERDE-REAT	783	RIO VERDE138
240	R.VERDE-FICT	750	CDOURADA 11	791	P. DAS EMAS --

Área 2: Minas Gerais, Paranaíba e Rio Grande					
304	TMARIAS---04MQ	382	TMARIAS-----138	870	PARANAVAI138
341	MCLAROS---345	394	VALADARE-230	1499	IGARAPE----138
342	MCLAROS2--138	398	VPALMA-----345	1500	IGARAPE-01MQ
380	TMARIAS-----345	399	VPALMA-----138	-	-
381	TMARIAS-----289	859	APARANA--138	-	-

Área 3: Rio de Janeiro / Espírito Santo					
45	VITORIA-----SIN	175	CAMPOS-----138	201	UTEC--1--1MQ
147	CAMPOS-----345	177	VITORIA-----138	202	UTEC-----FIC2
149	VITORIA-----345	186	CATAGUAZ-138	203	UTEC--2--1MQ
150	VITORIA-----FIC	199	VITORIA-----TER	-	-
174	FCE/CELF-RLE	200	UTEC-----FIC1	-	-

Área 4: São Paulo e Mato Grosso do Sul					
48	IBIUNA-----3MQ	517	IBITING-----3MAQ	732	TBAIXADA----138
87	IBIUNA-----500	518	NAVANHA--3MAQ	808	JMESQUIT1----13
124	CAMP.TRAFO-----	519	PROMISS----2MAQ	809	JMESQUIT2----13
126	GUARULHO-345B	546	ROSANA-----138	841	CEU-AZUL----138
127	GUARULHO-345A	547	TAQUARUCU--440	842	DVIZINHOS---138
161	MOGI-----230	548	TAQUARUCU--138	845	FBELTRAO----138
193	MOGI-TER-----13.	549	CAPIVARA-----440	848	JMESQUITA---138
196	CAMPINAS-----13	550	CAPIVARA-----138	849	MCRONDON--138
400	HBO-E-----5G+2P	551	ASSIS-LON-----230	850	MEDIANEIR---138
401	HBO-S-----6U+N8	552	ASSIS-----440	851	PALOTINA----138
403	PIRATIN-----13.8	553	ASSIS-MAR---230	855	REALEZA-----138
404	PIRATIN-----14.4	554	ASSIS--Y-----88	857	TOLEDO-----138
423	ANHANG-----345	555	ASSIS-EEVP--88	862	CGAUCHA----138
435	NORTE-----345	582	EMBUGUACU-345	863	GOIO-ERE-----138
436	NORTE-----088	595	STOANGELO--138	866	MAMBORE-----138
444	NORDESTE ---345	611	LNGARC-Y-----230	867	MANDAGUAR138
445	NORDESTE ---- 88	612	LNGARCEZ---230	874	UMUARAMA--138
446	MOGI-EP-----230	613	LNGARCEZ-----88	875	ANDIRA-----138
447	MOGI-EP-----88	615	XAVANTES-----230	876	ANDIRA-----88
448	MOGI-Q-----230	616	XAVANTES-----88	877	ANDIRA-A----138
449	ITAPETI-----230	618	JURUMIRIM---230	880	BANDEIRAN-138
459	APARECID-----088	619	JURUMIRIM---138	881	BVPARAISO-138
462	S.CABECA-----88	623	CBONITO-----230	882	CPROCPIO-138
465	LESTE-----088	624	CBONITO-----138	885	FLORESTOP-138
467	RAMON R F-----88	625	BOTUCATU---230	907	JLACERDA--1MQ
471	BAIXADA-----345	626	BOTUCATU---138	909	JLACERDA--0MQ
472	BAIXADA-----230	628	BOTUCATU---230	911	JLACERDB--1MQ
473	BAIXADA ----88KV	629	BOTUCATU-----88	1006	JLACERDA---230
474	SUL-----345	630	ARACATUBA-138	1007	JLACERDA----138
475	SUL-----088	633	BARIRI-----138	1008	JLACERDA-----69
478	H.BORDEN---230	634	BBONITA-----138	1009	JLACERDA-----44
480	H.BORDEN-----88	635	BBONITA----- 69	1010	JLACERDB---230
484	PIRATINI-----230	636	CATAND-2----138	1079	ANASTACIO---138
485	PIRATINI-----088	645	IBITINGA-----138	1088	I.GRANDE-----230
487	INTERL-----345	646	IPORA-----138	1089	IVINHEM.E-----138
488	INTERL-----230	648	PPRIMA-A-----138	1094	M.D.R.P-----138
491	XAVANTES---345	653	NAVANHAN---138	1096	NAN-ESUL----138
492	BANDEIRA----345	654	PENAPOLIS---138	1110	ACARAY-----11
493	BANDEIRA-----088	655	PENAPOLIS--- 69	1111	ACARAY-----138
494	BANDEIR-----34.5	657	PPRIMAV-----138	1137	CORU -----138
506	JURUMIR---1MAQ	661	PROMISSAO--138	1139	MIRAN -----138
507	CAPIVAR---4MAQ	665	SJRPRETO-----138	1228	PALMARES---138

511	ROSANA---2MAQ	666	SJRPRETO----- 69	1129	COUTO MI ----138
512	SGRANDE-4MAQ	671	UBARANA-----138	1131	A SCAFFA ----138
513	TAQUARU-1MAQ	672	UBARANA----- 69	1133	ALMOX -----138
514	XAVANTE--3MAQ	675	VVENTU-Y-----138	1135	AQUIDA -----138
515	BARIRI-----3MAQ	712	CARAGUA-----138	-	-
516	BBONITA---4MAQ	725	RPARDO-2-----138	-	-

Área 5: Paraná e Região Sul					
86	ITAIPU50-345	844	FIGUACU-----13	889	LONDRINA--230
804	GPARGOT1----13	847	GUAIRA-----138	890	LONDRINA--138
805	GPARGOT2----13	852	PBRANCO-----230	935	AREIA-----69
806	GPARGOT3----13	853	PBRANCO-----138	943	CANOINHA--230
807	GPARGOT4----13	860	CMOURAO-----138	954	CMOURAO--230
817	GPARGOTS--230	865	LOANDA-----138	1028	LONDRINA--500
818	GPARGOTU--230	868	MARINGA-----230	1029	LONDRI-E---230
829	PGROSSAN--230	869	MARINGA-----138	1031	MARINGA--E230
830	PGROSSAN--138	878	APUCARANA-230	1048	SOSORIO-----69
831	PGROSSAS--230	879	APUCARANA-138	1050	PBRANCOE-230
834	SMATEUS----230	884	FIGUEIRA-----230	1054	SMATEUSE--230
839	CASCAVEL--230	887	IBIPORA-----138	1061	SSANTIAG--69
840	CASCAVEL---138	888	IVAIPORA-----138	-	-

Área 6: Santa Catarina e Rio Grande do Sul					
917	PFUNDO1-----13	1016	JOINVILL-----138	1162	JACUI-6MQ---13
918	PFUNDO2-----13	1027	JOINVILL-----69	1175	PREAL-2MQ--13
938	BLUMENAU--525	1034	PALHOCA--230	1181	VAIRES-----13
939	BLUMENAU--230	1035	PALHOCA--138	1213	GUARITA----230
940	BLUMENAU--138	1041	PFUNDO-----230	1216	JACUI-----138
967	FLORIANO---138	1042	PFUNDO-----138	1232	OSORIO-A----138
968	FLORIANO-----69	1043	PFUNDO-----T00	1242	PREAL-----138
985	ILHOTA-----138	1044	PFUNDO-----T13	1243	PREAL-----230
986	ILHOTA-----69	1057	SIDEROP-----230	1280	SMARTA-----138
987	ILHOTA-----A00	1058	SIDEROP-----69	1281	SMARTA-----230
988	ILHOTA-----B00	1066	TIJUCAS-----138	1283	SROSA-----230
989	ILHOTA1-----13	1069	XANXERE---230	1297	VAIRES-----T1
990	ILHOTA2-----13	1071	XANXERE-----13	1298	VAIRES-----69
1015	JOINVILL-----230	1072	XANXERE-----00	-	-

A divisão do sistema de 730 barras é mostrada na Figura 3.34.

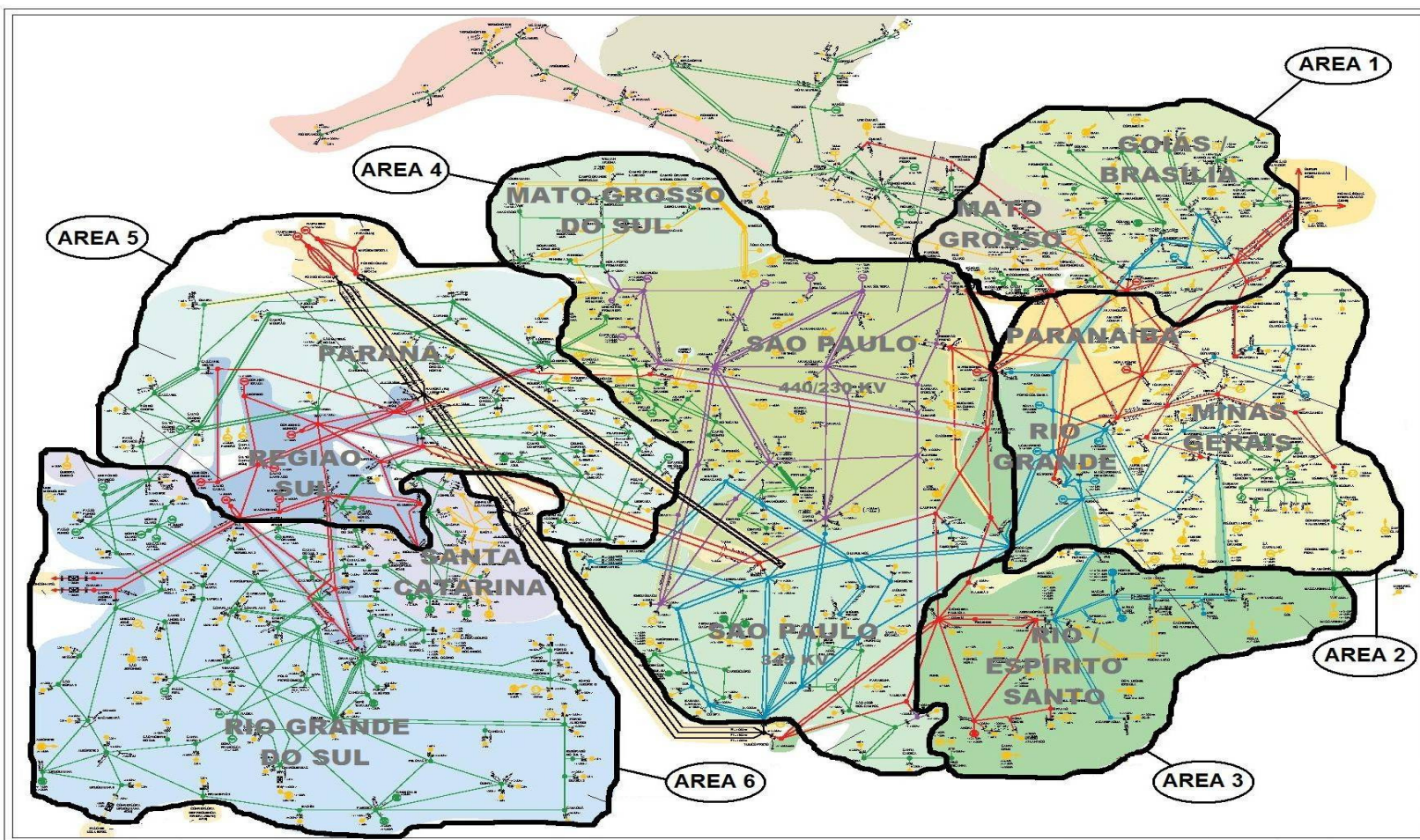


Figura 3.34 – Aproximação das Áreas de Controle de Tensão a partir da Matriz $[J_{SQV}]$ para o Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

3.5 Identificação de Áreas de Controle de Tensão Diretamente da Matriz de Sensibilidade QV

Com o mesmo método descrito na Seção 2.7, identifica-se áreas de controle de tensão diretamente da matriz de sensibilidade $[J_{SQV}]$ e comparam-se com as áreas obtidas através dos autovalores e autovetores.

O método utilizado está baseado no conceito de coerência de tensão que consiste em agrupar porções da rede elétrica a partir da eliminação dos ramos ditos fracos no sistema. Estes ramos são retirados através da observação dos elementos da matriz $[VCS]$ que tenham um valor menor que uma dada tolerância α . Logo, a matriz reduzida é dividida em submatrizes bloco-diagonal onde cada uma delas identifica um grupo de barras que delimitam uma área de controle de tensão.

3.5.1 Sistema 10 Barras

3.5.1.1 Baixa Impedância de Interligação

A matriz $[J_{SQV}]$ para o sistema de 10 barras com baixa impedância de interligação ($jX = 0,01\%$) é dada a seguir. Nesta matriz não foram impressos os elementos “zero”.

$$\begin{array}{l}
 \Delta Q_1 \\
 \Delta Q_2 \\
 \Delta Q_{10} \\
 \Delta Q_{20} \\
 \Delta Q_{30} \\
 \Delta Q_{101} \\
 \Delta Q_{102} \\
 \Delta Q_{110} \\
 \Delta Q_{120} \\
 \Delta Q_{130}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccccc}
 \boxed{\begin{array}{ccc} 5,07 & -5,01 & \\ & 14,40 & -14,31 \\ -4,93 & 29,71 & -14,09 \end{array}} & & & & \\
 & \boxed{\begin{array}{ccc} -14,17 & -14,17 & 28,17 \end{array}} & & & \\
 & & -10,94 & & \\
 & & & 9797,57 & \\
 & & & & -9786,83
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{l}
 \Delta V_1 \\
 \Delta V_2 \\
 \Delta V_{10} \\
 \Delta V_{20} \\
 \Delta V_{30} \\
 \Delta V_{101} \\
 \Delta V_{102} \\
 \Delta V_{110} \\
 \Delta V_{120} \\
 \Delta V_{130}
 \end{array}$$

Observa-se que o sistema pode ser dividido em duas áreas de controle. A presença dos elementos “9797,57 e -9786,83” indicam que as duas áreas estão fortemente relacionadas devido à baixa impedância de interligação entre as barras 30 e 130.

Na Tabela 3.12 apresenta-se a comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e as obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$.

Tabela 3.12 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão obtidas para o Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Área	Pelos Mode-shape	Pela Matriz $[J_{SQV}]$
1	1, 2, 10 e 20	1, 2, 10 e 20
2	101, 102, 110 e 120	101, 102, 110 e 120

3.5.1.2 Alta Impedância de Interligação

A matriz $[J_{SQV}]$ para o sistema de 10 barras com alta impedância de interligação ($jX=10000\%$) é dada a seguir. Nesta matriz foram desprezados os elementos cujo módulo é menor a “ $\alpha = 0,1$ ”.

$$\begin{array}{c} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_{10} \\ \Delta Q_{20} \\ \Delta Q_{30} \\ \Delta Q_{101} \\ \Delta Q_{102} \\ \Delta Q_{110} \\ \Delta Q_{120} \\ \Delta Q_{130} \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 5,08 & & -5,01 & & \\ \hline & 14,41 & & -14,31 & \\ \hline -4,94 & & 29,63 & -14,07 & -11,01 \\ \hline & -14,16 & -14,13 & 28,18 & \\ \hline & & -11,07 & & 10,63 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 5,07 & & -5,01 & & \\ \hline & 14,39 & & -14,31 & \\ \hline -4,94 & & 29,82 & -14,11 & -10,96 \\ \hline & -14,19 & -14,22 & 28,21 & \\ \hline & & -10,91 & & 10,83 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{c} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_{10} \\ \Delta V_{20} \\ \Delta V_{30} \\ \Delta V_{101} \\ \Delta V_{102} \\ \Delta V_{110} \\ \Delta V_{120} \\ \Delta V_{130} \end{array}$$

Na matriz podem-se distinguir duas áreas bem desacopladas. O desacoplamento deve-se à alta impedância de interligação entre as barras 30 e 130.

Na Tabela 3.13 apresenta-se a comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e as obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$.

Tabela 3.13 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão obtidas para o Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Área	Pelos Mode-shape	Pela Matriz $[J_{SQV}]$
1	1, 2, 10, 20 e 30	1, 2, 10, 20 e 30
2	101, 102, 110, 120 e 130	101, 102, 110, 120 e 130

3.5.2 Sistema 18 Barras

3.5.2.1 Baixa Impedância de Interligação

Para o sistema de 18 barras com baixa impedância de interligação ($jX = 0,01\%$), a matriz $[J_{SQV}]$ apresenta duas submatrizes (áreas) bloco-diagonal e quatro elementos de valor elevado (9797,57 e -9786,83) que indicam que as duas áreas estão fortemente relacionadas devido à baixa impedância de interligação entre as barras 30 e 130. Cada uma de estas submatrizes é, por sua vez, dividida em duas submatrizes de menor porte.

A comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e as obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$ é mostrada na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão obtidas para o Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Área	Subárea	Pelos Mode-shape	Pela Matriz $[J_{SQV}]$
1	A	1, 2, 10 e 20	1, 2, 10 e 20
	B	201, 202, 210 e 220	201, 202, 210 e 220
2	C	101, 102, 110 e 120	101, 102, 110 e 120
	D	301, 302, 310 e 320	301, 302, 310 e 320

3.5.2.2 Alta Impedância de Interligação

Na matriz $[J_{SQV}]$ para o sistema de 18 barras com alta impedância de interligação ($jX = 10000\%$) foram desprezados os elementos cujo módulo é menor a " $\alpha = 0,1$ ". Assim, apresentam-se duas submatrizes bloco-diagonal, onde cada uma delas, por sua vez, é dividida em duas submatrizes de menor porte.

Na Tabela 3.15 apresenta-se a comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e as áreas obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$.

Tabela 3.15 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão obtidas para o Sistema 18 Barras (jX=10000%)

Área	Subárea	Pelos Mode-shape	Pela Matriz [J_{SQV}]
1	A	1, 2, 10 e 20	1, 2, 10 e 20
	B	201, 202, 210 e 220	201, 202, 210 e 220
		30	30
2	C	101, 102, 110 e 120	101, 102, 110 e 120
	D	301, 302, 310 e 320	301, 302, 310 e 320
		130	130

3.5.3 Sistema *New England* 39 Barras

Com o objetivo de formar submatrizes bloco-diagonal para identificar as áreas de controle existentes na matriz [J_{SQV}] para o sistema de 39 barras foram desprezados os elementos cujo módulo é menor a “ $\alpha = 5$ ” identificando se três áreas de controle.

Na Tabela 3.16 apresenta-se a comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e aquelas obtidas diretamente da matriz [J_{SQV}].

Tabela 3.16 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão obtidas para o Sistema 39 Barras

Área	Pelos Mode-shape	Pela Matriz [J_{SQV}]
1	1, 2, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 e 39	1, 2, 3 , 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 e 39
2	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 31 e 32	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 31 e 32
3	15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 33, 34, 35 e 36	15, 16, 17, 18 , 19, 20, 21, 22, 23, 24, 33, 34, 35 e 36

Nota-se que as barras em negrito não são consideradas em nenhuma das áreas de controle obtidas pelos mode-shape.

3.5.4 Sistema 118 Barras

Na matriz $[J_{SQV}]$ para o sistema de 118 barras foram desprezados os elementos cujo módulo é menor que “ $\alpha = 0,1$ ”, com o objetivo de formar submatrizes bloco-diagonal para identificar as áreas de controle existentes. Foram identificadas três áreas de controle.

Na Tabela 3.17 apresenta-se a comparação entre as áreas obtidas através dos mode-shape e as áreas obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$.

Tabela 3.17 – Comparação entre as Áreas de Controle de Tensão para o Sistema 118 Barras

Área	Pelos Mode-shape	Pela Matriz $[J_{SQV}]$
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 113, 114, 115 e 117	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 113, 114 e 115
2	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 116	34, 35, 36, 37, 38, 39 , 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 116
3	77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 e 112	70, 71, 72, 73, 74, 75, 76 , 77, 78, 79, 80, 81 , 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112 e 118

A diferença entre as áreas obtidas através dos autovalores e autovetores da matriz $[J_{SQV}]$ e as áreas obtidas diretamente da matriz, pode-se dever aos valores especificados pelo especialista para desprezar elementos pequenos, σ no caso dos mode-shape e α no caso da matriz.

3.6 Conclusões do Capítulo

A matriz $[J_{SQV}]$ é obtida a partir da matriz Jacobiana do problema de fluxo de carga com o objetivo de identificar grupos de barras que tenham características similares frente a variações de potência reativa no sistema.

A matriz de sensibilidade QV inclui todas as barras do sistema. Se somente estiveram incluídas as barras PQ, como é usual na formulação do problema de fluxo de carga tradicional, a matriz $[J_{SQV}]$ traria apenas as relações QV entre as barras PQ, mas a informação do alcance da influência dos geradores é importante para este tipo de análise.

Para determinar áreas de controle de tensão em sistemas elétricos de potência, utilizou-se um método baseado na análise dos menores autovalores em módulo da matriz $[J_{SQV}]$ e seus respectivos mode-shape associados.

Este método de determinação de áreas a partir da matriz $[J_{SQV}]$ utiliza um algoritmo de busca baseado em três critérios: σ que é o módulo mínimo considerado no mode-shape, ε_1 é o percentual mínimo de barras que se quer agrupar, e ε_2 é o número de autovalores que deve ser utilizado na busca. Estes valores são arbitrários e dependem da experiência do especialista.

As características mais relevantes do algoritmo de busca de áreas de controle a partir da matriz $[J_{SQV}]$ serão detalhadas no Capítulo 4.

Ao comparar as áreas de controle obtidas diretamente da matriz $[J_{SQV}]$ com as áreas identificadas pelos mode-shape, encontraram-se resultados coerentes.