

3 Identificação e Agrupamento dos Autovalores que possuem Informações Similares sobre as Interações dos Dispositivos de Controle

3.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior foi exposto o método de identificação de interações entre dispositivos de controle. Este método, baseada na análise dos menores autovalores da matriz de sensibilidade de controles [MSC] proposta, permitiu obter informações importantes sobre quais dispositivos de controle apresentam interações adversas (ações de controle conflitantes) e qual é a participação de cada um deles no respectivo autovalor avaliado. Como consequência desta análise, verificou-se a presença de autovalores contendo informação similar sobre as interações adversas dos equipamentos de controle. A presença destes autovalores foi percebida quando tinha-se a interação de mais de dois equipamentos de controle no mesmo conflito

Neste sentido, no presente capítulo, será proposta uma metodologia que seja capaz de identificar e agrupar os autovalores que proporcionem informação similar sobre as significativas interações dos equipamentos de controle. Esta proposta esta fundamentada tanto no uso dos índices de sensibilidade de uma matriz [MSC₄], extraída da matriz [MSC], para estimar as sensibilidades de todos os equipamentos de controle em relação às tensões controladas, quanto no uso do conceito de colinearidade [15] para determinar se os autovalores a serem agrupados proporcionam as informações necessárias sobre as interações que têm os dispositivos de controle.

Contudo, é importante observar que a metodologia apresentada no capítulo anterior e a metodologia proposta neste capítulo, estão ligadas através do uso da mesma matriz [MSC] e também pelo o fato de que as sensibilidades dos dispositivos de controle podem ser construídas a partir da combinação de autovalores e autovetores. Desta forma, é possível verificar a complementaridade de ambas as metodologias.

3.2 Método de Identificação e Agrupamento dos Autovalores por Índices de Sensibilidade e Conceito de Colinearidade

A inversa da matriz de sensibilidade de controles [MSC], dada pela equação (2.52), pode ser reescrita na forma mostrada em (3.1).

$$[MSC]^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} MSC_1 & MSC_2 \\ \hline MSC_3 & MSC_4 \end{array} \right] \quad (3.1)$$

Através da expressão (3.1), a equação (2.29) pode ser convenientemente adotada como sendo da forma:

$$\left[\begin{array}{c} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_{n_{PV}} \\ \hline \Delta x_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_{(n_{PV}+n_C)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} MSC_1 & MSC_2 \\ \hline MSC_3 & MSC_4 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n_{PV}} \\ \hline \Delta y_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta y_{(n_{PV}+n_C)} \end{array} \right] \quad (3.2)$$

onde Δx representam a variações incrementais das variáveis de estado dos dispositivos de controle e Δy representam a variações incrementais de suas respectivas equações de controle.

Por outro lado, sabe-se que, a decomposição em autovalores e autovetores da inversa da matriz [MSC] esta dada por:

$$[MSC]^{-1} = \phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \psi = \sum_{i=1}^{2n_{PV}+n_C} \frac{\phi_i \cdot \psi_i}{\lambda_i} \quad (3.3)$$

É possível constatar da equação (3.3), que cada elemento da matriz $[MSC]^{-1}$ é composto pela contribuição de todos os autovalores da matriz [MSC]. A partir desta expressão, conclui-se que a matriz $[MSC]^{-1}$ pode ser decomposta em

matrizes onde seus elementos estejam compostos somente pela contribuição de um dos autovalores da matriz [MSC], tal como verifica-se na equação (3.4).

$$[MSC]^{-1} = [MSC]_{\lambda_1}^{-1} + [MSC]_{\lambda_2}^{-1} + \dots + [MSC]_{\lambda_{(2n_{PV} + n_C)}}^{-1} \quad (3.4)$$

Através de (3.4), por exemplo, a matriz $[MSC]_{\lambda_1}^{-1}$ onde seus elementos estão compostos pela contribuição do primeiro autovalor λ_1 , de menor módulo, está dada pela expressão em (3.5).

$$[MSC]_{\lambda_1}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{11} \cdot \Psi_{11}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{11} \cdot \Psi_{1(n_{PV})}}{\lambda_1} & \frac{\phi_{11} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{11} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\phi_{(n_{PV})1} \cdot \Psi_{11}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV})1} \cdot \Psi_{1(n_{PV})}}{\lambda_1} & \frac{\phi_{(n_{PV})1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV})1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \\ \hline \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{11}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV})}}{\lambda_1} & \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{11}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV})}}{\lambda_1} & \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Comparando a equação (3.5) com a equação (3.1) e utilizando só os índices de sensibilidade que relacionam as variáveis de estado Δx com as equações de controle de tensão das barras controladas Δy , tem-se que.

$$[MSC_4] \approx \begin{bmatrix} \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+1)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+1)}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\phi_{(n_{PV}+n_C)1} \cdot \Psi_{1(n_{PV}+n_C)}}{\lambda_1} \end{bmatrix} = [MSC_4]_{\lambda_1} \quad (3.6)$$

Observando cuidadosamente a matriz da equação (3.6), percebe-se que é possível estimar os índices de sensibilidades de todos os equipamentos de controle em relação à tensão controlada de uma barra m qualquer utilizando o autovalor de menor módulo e seus respectivos autovetores. A partir desta análise e supondo

que se tem mais de um autovalor com módulo menor que $\varepsilon_1=0,06$, é possível afirmar que as sensibilidades da matriz $[MSC_4]$ podem ser estimadas a partir da avaliação dos menores autovalores e seus respectivos autovetores da matriz $[MSC]$. Também é importante destacar de (3.6) que as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ correspondentes à contribuição de cada um dos menores autovalores, oferecem de forma individual as informações sobre as interações que apresentam os equipamentos de controle.

Para entender melhor este último parágrafo, vamos utilizar a Etapa -1 do Sistema duplo de 14 barras apresentada na Seção 2.7.5.1 do capítulo anterior. Por comodidade, o diagrama deste sistema será reexibido na Figura 3.1 e os autovalores da matriz de sensibilidade de controles $[MSC]$ são rerepresentados na Tabela 3.1.

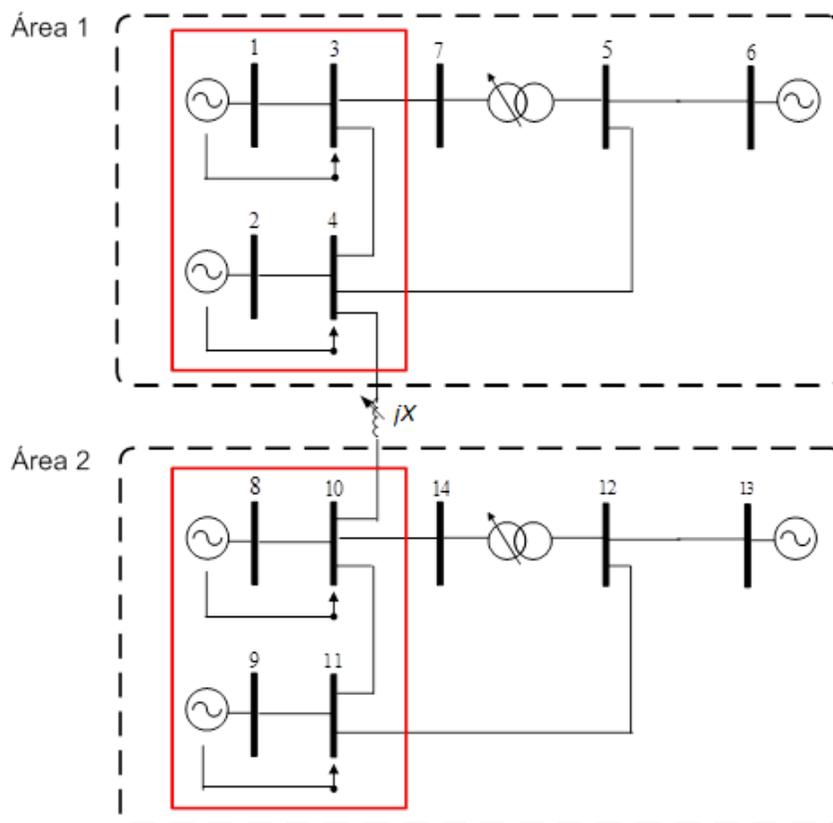


Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras - Etapa 1

Tabela 3.1 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras – Etapa 1

Nº dos Autovalores	Módulo dos Autovalores λ_i	Nº dos Autovalores	Módulo dos Autovalores λ_i
1	5,00E-06	7	9,99E-01
2	5,00E-06	8	9,99E-01
3	9,96E-01	9	1,01E+00
4	9,96E-01	10	1,01E+00
5	9,98E-01	11	3,72E+00
6	9,98E-01	12	7,43E+00

Para o sistema analisado a matriz [MSC₄], calculada para o ponto de operação dado na Tabela 2.19, é dada em (3.8).

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{G1} \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta Q_{G6} \\ \Delta Q_{G8} \\ \Delta Q_{G9} \\ \Delta Q_{G13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10002,69 & -10002,72 & -0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -10002,62 & 10002,51 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & 0,00 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 10001,73 & -10001,79 & -0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -10001,58 & 10001,36 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,01 & 0,00 & 0,01 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_{10} \\ \Delta V_{11} \\ \Delta V_{13} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[MSC_4] = \begin{bmatrix} 10002,69 & -10002,72 & -0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -10002,62 & 10002,51 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & 0,00 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 10001,73 & -10001,79 & -0,01 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -10001,58 & 10001,36 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,01 & 0,00 & 0,01 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A partir dos elementos realçados com cor vermelho e azul da expressão (3.8) (2.60), é possível verificar que a matriz [MSC₄] oferece de forma simultânea a informação das interações das potências reativas dos geradores G₁ e G₂, pertencentes à área 1 do sistema, da mesma forma que os geradores G₈ e G₉ da área 2. Este resultado também pode ser obtido a partir da avaliação dos menores autovalores, tal como é descrito a seguir.

Através da Tabela 3.1 verifica-se que os dois primeiros autovalores têm módulos muito menores em relação aos demais, ou seja, estes autovalores têm modulo

menor que 0,06. Neste sentido, com a utilização destes autovalores e seus respectivos autovetores são construídas as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_1}$ e $[MSC_4]_{\lambda_2}$, tal como são apresentadas nas equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$[MSC_4]_{\lambda_1} = \begin{bmatrix} 10002,69 & -10002,66 & 0,00 & 2,30 & -2,30 & 0,00 \\ -10002,62 & 10002,58 & 0,00 & -2,30 & 2,30 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 2,30 & -2,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -2,30 & 2,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[MSC_4]_{\lambda_2} = \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & -0,01 & -2,30 & 2,30 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 2,30 & -2,30 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -2,30 & 2,30 & 0,00 & 10001,73 & -10001,66 & 0,00 \\ 2,30 & -2,30 & 0,00 & -10001,57 & 10001,49 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Dos índices de sensibilidade realçados com cores das expressões acima, pode-se verificar que tanto a matriz $[MSC_4]_{\lambda_1}$ como a matriz $[MSC_4]_{\lambda_2}$ indicam de forma individual as interações dos equipamentos de controle correspondentes às áreas 1 e 2 do sistema, respectivamente. Além de isso, compondo estas matrizes é possível estimar as sensibilidades da matriz $[MSC_4]$, tal como é mostrado na equação (3.11).

$$[MSC_4] \approx [MSC_4]_{\lambda_1} + [MSC_4]_{\lambda_2} = \begin{bmatrix} 10002,69 & -10002,66 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -10002,62 & 10002,58 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 10001,73 & -10001,66 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -10001,57 & 10001,50 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Comparando as equações (3.11) e (3.8) comprova-se efetivamente, que com a utilização dos menores autovalores da matriz $[MSC]$ é possível estimar os índices de sensibilidade da matriz $[MSC_4]$.

Baseado na avaliação do sistema-teste anterior e através da utilização do conceito de colinearidade é possível verificar se os autovalores a ser agrupados proporcionam as informações necessárias sobre as interações dos equipamentos de controle.

Colinearidade: diz-se que dois vetores são colineares quando estes apontam na mesma direção ou, em outras palavras, se os dois vetores são paralelos. Para verificar se os vetores são paralelos se utiliza o índice de colinearidade, dado por (3.12).

$$IC = \cos \theta = \frac{\langle r_i, r_j \rangle}{\|r_i\| \|r_j\|} \quad (3.12)$$

De (3.12), $\langle r_i, r_j \rangle$ representa o produto escalar entre os vetores e $\|r\|$ é a norma euclidiana dos vetores.

Se $IC = 1$, $\theta = 0^\circ$, os vetores são colineares (paralelos).

Se $IC = 0$, $\theta = 90^\circ$, os vetores são ortogonais.

Se $IC = -1$, $\theta = 180^\circ$, os vetores são colineares com direção oposta.

Para nosso estudo, os vetores r_i e r_j da equação (3.12) são formados pelas colunas das matrizes $[MSC_4]$ e $[MSC_4]_{\lambda_i}$ que contêm as maiores sensibilidades dos dispositivos de controle (o cálculo das maiores sensibilidades será detalhada mais adiante). Ao utilizar as maiores sensibilidades dos dispositivos de controle na equação (3.12), é possível afirmar se a informação que tem o autovalor λ_i em relação à interação dos equipamentos de controle é baixa, media ou alta.

Como os índices de colinearidade (IC) variam entre 0 e 1, pode-se dividir este intervalo em faixas e atribuir uma determinada cor para cada faixa do intervalo indicando assim se o autovalor analisado tem baixa, media ou alta informação da interação dos equipamentos de controle, conforme definido na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Faixas e Cores para os Valores de IC

Classificação do Índice de Colinearidade (IC)		
Faixa	Cor	Informação
$0 \leq IC \leq 0,85$	Vermelho	Baixa
$0,85 < IC \leq 0,96$	Amarelo	Media
$0,96 < IC \leq 1$	Verde	Alta

Do exposto anteriormente e complementando o método de identificação de interações entre dispositivos de controle, apresentada no capítulo anterior, o método proposto neste capítulo realiza os seguintes passos:

1. Extrair a matriz $[MSC_4]$ da matriz de sensibilidade de controles $[MSC]$, e calcular as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ correspondentes à contribuição de cada um dos menores autovalores.
2. Calculam-se os maiores índices de sensibilidade entre variáveis de estado dos dispositivos de controle Δx e suas respectivas equações de controle Δy , a partir da matriz $[MSC_4]$, para cada autovalor selecionado do critério estabelecido na Seção 2.6.3.

Para efetuar este cálculo, primeiramente determina-se o dispositivo de controle k que apresenta a maior participação em cada um dos autovalores λ_i . Uma vez identificado o dispositivo de controle k com a maior participação em um determinado autovalor λ_i , varia-se a tensão na sua barra controlada V_k ($\Delta y_{(n_{PV}+k)}$) em (3.13).

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_{(n_{PV}+k)} \\ \vdots \\ \Delta x_{(n_{PV}+n_C)} \end{bmatrix} = [MSC_4] \cdot \begin{bmatrix} \Delta y_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta y_{(n_{PV}+k)} \\ \vdots \\ \Delta y_{(n_{PV}+n_C)} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Ao variar-se a tensão do dispositivo de controle com maior fator de participação, obtêm-se os maiores valores dos índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras Δx e a variável controlada Δy .

3. Similarmente, calculam-se os maiores índices de sensibilidade entre variáveis de estado dos dispositivos de controle Δx e suas respectivas equações de controle Δy , a partir das matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada autovalor λ_i separadamente.

Para efetuar o cálculo dos maiores índices de sensibilidade dos dispositivos de controle a partir das matrizes obtidas pela contribuição de cada autovalor separadamente, segue-se o procedimento indicado no passo 2, mas substituindo a matriz $[MSC_4]$ pela matriz $[MSC_4]_{\lambda_i}$ quando estiver analisando o autovalor λ_i , tal como é mostrado em (3.14).

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_{(n_{PV}+k)} \\ \vdots \\ \Delta x_{(n_{PV}+n_C)} \end{bmatrix} = [MSC_4]_{\lambda_i} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y_{(n_{PV}+1)} \\ \vdots \\ \Delta y_{(n_{PV}+k)} \\ \vdots \\ \Delta y_{(n_{PV}+n_C)} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Nos itens 2 e 3, apresenta-se os maiores índices de sensibilidade normalizados em porcentagem – através da divisão de cada um de seus elementos pelo elemento de maior módulo – dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

4. Utilizando a equação (3.12), calcular os índices de colinearidade entre os maiores índices de sensibilidade dos dispositivos de controle obtidas pelas matrizes $[MSC_4]$ e $[MSC_4]_{\lambda_i}$.
5. Selecionar, para a análise de agrupamento, os autovalores que tenham os índices de colinearidade maiores que $\varepsilon_2 = 0,85$. Este valor foi obtido da

Tabela 3.2 indicando que os autovalores utilizados são só aqueles que têm informação média e alta sobre a interação dos equipamentos de controle.

6. Agrupam-se os autovalores com informações similares sobre as interações dos dispositivos de controle. Para esta análise, os seguintes critérios são adotados:
 - a. Da comparação entre os maiores índices de sensibilidade dos itens 2 e 3, considera-se somente aquelas sensibilidades que tenham em comum valores maiores que $\epsilon_3 = 20\%$.
 - b. Caso mais de 50% dos índices de sensibilidades dos dispositivos de controle, que têm a maior participação em um determinado autovalor, aparecem em outro autovalor subsequente, esses autovalores têm que ser agrupados, já que têm informações similares sobre as interações dos dispositivos de controle ($\epsilon_4 = 50\%$).

Portanto, o método permite identificar e agrupar os autovalores que apresentam informações similares sobre os dispositivos de controle com significativas interações entre si.

3.3 Algoritmo de Identificação e Agrupamento dos Autovalores

O fluxograma do processo de identificação e agrupamento de autovalores que proporcionam informação similar sobre as interações dos dispositivos de controle, mostrado na Figura 3.2, tem três blocos importantes. O primeiro bloco, referente aos dados de entrada, utiliza as seguintes variáveis:

1. n_{aut}° : é o número de autovalores obtidos do critério $\epsilon_1=0,06$ apresentado na Seção 2.6.3;

2. $FP-\lambda_i$: são os fatores de participação correspondentes aos autovalores obtidos do critério $\varepsilon_1=0,06$.

O segundo bloco, referente à identificação de autovalores que proporcionam as informações necessárias sobre as interações dos dispositivos de controle, utiliza as seguintes variáveis:

1. i : é o número do autovalor que esta sendo analisado;
2. ε_2 : é o módulo mínimo considerado nos índices de colinearidade;
3. X : é vetor que permite armazenar os maiores índices de sensibilidade da matriz $[MSC_4]$;
4. Y : é vetor que permite armazenar os maiores índices de sensibilidade da matriz $[MSC_4]_{\lambda_i}$.

Finalmente o terceiro bloco, referente ao agrupamento dos autovalores que oferecem informação similar sobre as interações dos equipamentos de controle, utiliza as seguintes variáveis:

1. j e l : são os número dos autovalores que esta sendo analisado;
2. ε_3 : é o percentual mínimo considerado nos índices de sensibilidade;
3. ε_4 : é o percentual mínimo de índices de sensibilidade que se necessita para agrupar os autovalores;
4. η : é o numero de autovalores selecionados pelo critério $IC_{\lambda_i} > \varepsilon_2$

É necessário destacar que para todos os sistemas-teste avaliados na seguinte seção, os valores de ε_3 e ε_4 são respectivamente 20% e 50%, e o valore de ε_2 considerado é de 0.86.

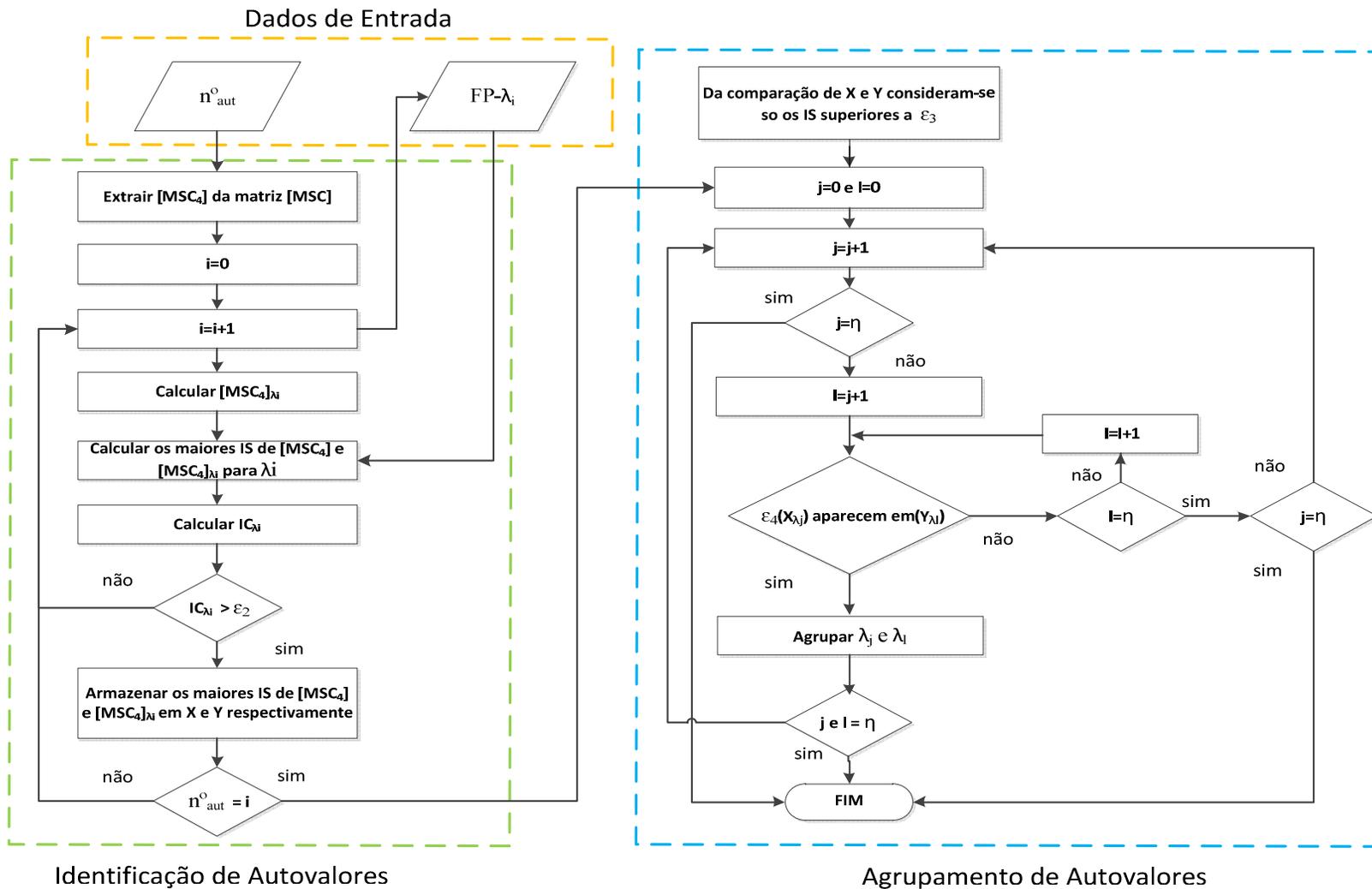


Figura 3.2 – Fluxograma do Algoritmo de Identificação e Agrupamento de Autovalores

3.4 Resultado do Método de Identificação e Agrupamento de Autovalores

Com objetivo de complementar a metodologia exposta no Capítulo 2, nesta seção será avaliada o método de identificação e agrupamento de autovalores, baseado no conceito de colinearidade e no uso dos índices de sensibilidade da matriz $[MSC_4]$, usando os mesmos sistemas-teste do capítulo anterior:

- Sistema 28 Barras;
- Sistema *New England* 39 Barras;
- Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras;
- Sistema Duplo de 14 Barras.

É importante destacar que devido à complementaridade dos métodos expostos neste trabalho, serão usados como dados de entrada nestes sistemas-teste os autovalores da matriz $[MSC]$, que apresentam módulo inferior a ε_1 ($\varepsilon_1 = 0,06$), e seus respectivos fatores de participação, os quais são obtidos dos sistemas-teste do capítulo anterior.

3.4.1 Sistema de 28 Barras

O primeiro sistema a ser analisado é mostrado na Figura 3.3. Este sistema de 28 barras é uma duplicação do Sistema IEEE 14 barras, replicando à direita do sistema original a mesma topologia, mantendo unidas as duas áreas através de uma impedância de interligação jX de valor 100%.

Este sistema possui de 10 geradores, 10 transformadores, 31 circuitos e uma reatância entre as barras 14 e 28.

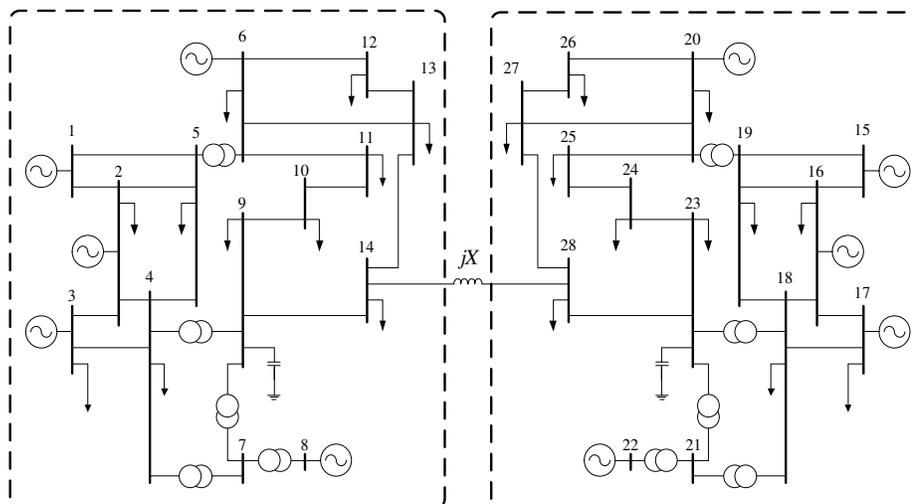


Figura 3.3 – Diagrama Unifilar do Sistema 28 Barras

Os dados de entrada para a avaliação deste método, mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4, estão formados, respectivamente, pelos autovalores da matriz [MSC] com módulo menor a ε_1 ($\varepsilon_1 = 0,06$) e os fatores de participação correspondentes a estes autovalores.

Tabela 3.3 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 28 Barras

Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i	Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i
1	5,00E-05	3	3,31E-02
2	7,00E-05	4	4,68E-02

Tabela 3.4 – Fatores de Participação para os Autovalores Selecionados

Dispositivo de Controle	Fatores de Participação para cada Autovalor (%)			
	FP- λ_1	FP- λ_2	FP- λ_3	FP- λ_4
QG1	0,00	0,00	62,98	0,00
QG2	50,05	0,00	18,48	0,00
QG3	49,95	0,00	18,57	0,00
QG15	0,00	0,00	0,00	62,37
QG16	0,00	50,00	0,00	18,83
QG17	0,00	49,90	0,00	18,93

* Os geradores g_6 , g_8 , g_{20} e g_{22} não são exibidos nesta Tabela porque não têm nenhuma participação nestes autovalores analisados.

Utilizando o algoritmo apresentado na Figura 3.2, calculam-se os índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras (potências reativas geradas pelos geradores Q_{Gi}) e as variáveis controladas (tensões controladas pelos geradores V_i) a partir da $[MSC_4]$, para cada autovalor selecionado no item anterior.

Para efetuar este cálculo, primeiramente determina-se o dispositivo de controle k que apresenta a maior participação em cada um dos autovalores λ_i . Na Tabela 3.4, observa-se que o gerador G_2 tem a maior participação (50,05%) no primeiro autovalor λ_1 , o gerador G_{16} no segundo autovalor λ_2 , o gerador G_1 no terceiro autovalor λ_3 e o gerador G_{15} no quarto autovalor λ_4 .

Uma vez identificado o dispositivo de controle k com a maior participação em um determinado autovalor λ_i , varia-se a tensão na sua barra controlada V_k em (3.13). Para o caso do primeiro autovalor λ_1 , o G_2 é o dispositivo de controle com a maior participação e, por tanto, a tensão na sua barra controlada V_2 é incrementada em $\Delta V_2 = +0,01$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade resolvendo (3.13) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}.b$. Este procedimento é repetido para os demais autovalores λ_2 , λ_3 e λ_4 , variando as tensões V_{16} , V_1 e V_{15} respectivamente.

Na Tabela 3.5, apresentam-se os índices de sensibilidade normalizados – através da divisão de cada um de seus elementos pelo elemento de maior módulo – dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.5 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz $[MSC_4]$

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas da Matriz $[MSC_4]$			
	X_{λ_1} (%)	X_{λ_2} (%)	X_{λ_3} (%)	X_{λ_4} (%)
ΔQ_{G1}	-0,18	0,00	100,00	0,35
ΔQ_{G2}	100,00	0,00	-97,89	-1,35
ΔQ_{G3}	-98,79	0,00	-3,51	-0,07
ΔQ_{G15}	0,00	-0,17	0,00	98,86
ΔQ_{G16}	0,00	100,00	-0,05	-100,00
ΔQ_{G17}	0,00	-98,79	0,00	-3,55

Similarmente, calculam-se os índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras (potências reativas geradas pelos geradores Q_{Gi}) e as variáveis controladas (tensões controladas pelos geradores V_i) a partir das matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada autovalor λ_i separadamente.

Por exemplo, para o caso do primeiro autovalor λ_1 , sabe-se que o gerador G_2 é o dispositivo de controle com a maior participação e, portanto, a tensão na sua barra controlada V_2 é incrementada em $\Delta V_2 = +0,01$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade dos dispositivos de controle resolvendo (3.14) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}.b$. Este procedimento é repetido para os demais autovalores λ_2 , λ_3 e λ_4 , variando as tensões V_{16} , V_1 e V_{15} respectivamente.

Na Tabela 3.6, apresentam-se os índices de sensibilidade normalizados – através da divisão de cada um de seus elementos pelo elemento de maior módulo – dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.6 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada Autovalor

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$			
	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_2} (%)	Y_{λ_3} (%)	Y_{λ_4} (%)
ΔQ_{G1}	-0,08	0,00	100,00	-1,80
ΔQ_{G2}	100,00	0,00	-55,98	0,52
ΔQ_{G3}	-99,90	0,00	-56,08	0,52
ΔQ_{G15}	0,00	-0,08	0,00	100,00
ΔQ_{G16}	0,00	100,00	0,00	-57,08
ΔQ_{G17}	0,00	-99,90	0,00	-57,23

A partir do conceito de colinearidade, descrito pela equação (3.12), a Tabela 3.7 apresenta o cálculo dos índices de colinearidade entre cada coluna da Tabela 3.5 e cada coluna da Tabela 3.6.

Tabela 3.7 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.5 Vs.3.6

Dispositivos de Controle	Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)							
	X_{λ_1}	Y_{λ_1}	X_{λ_2}	Y_{λ_2}	X_{λ_3}	Y_{λ_3}	X_{λ_4}	Y_{λ_4}
ΔQ_{G1}	-0,18	-0,08	0,00	0,00	100,00	100,00	0,35	-1,8
ΔQ_{G2}	100,00	100,00	0,00	0,00	-97,89	-55,98	-1,35	0,52
ΔQ_{G3}	-98,79	-99,90	0,00	0,00	-3,51	-56,08	-0,07	0,52
ΔQ_{G15}	0,00	0,00	-0,17	-0,08	0,00	0,00	98,86	100,00
ΔQ_{G16}	0,00	0,00	100,00	100,00	-0,05	0,00	-100,00	-57,08
ΔQ_{G17}	0,00	0,00	-98,79	-99,90	0,00	0,00	-3,55	-57,23
Índice de Colinearidade	X_{λ_1} vs. Y_{λ_1}		X_{λ_2} vs. Y_{λ_2}		X_{λ_3} vs. Y_{λ_3}		X_{λ_4} vs. Y_{λ_4}	
	1,000		1,000		0,877		0,871	

A partir das colunas x_{λ_1} e y_{λ_1} da Tabela 3.7 obtém-se um índice de colinearidade de 1,000, indicando assim que o autovalor λ_1 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_2 e G_3 . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_1} versus y_{λ_1} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando aos dispositivos de controle G_2 e G_3 .

Igualmente, das colunas x_{λ_2} e y_{λ_2} da Tabela 3.7 obtém-se um índice de colinearidade de 1,000, indicando assim que o autovalor λ_2 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{16} e G_{17} . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_2} versus y_{λ_2} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando aos dispositivos de controle G_{16} e G_{17} .

Das colunas x_{λ_3} e y_{λ_3} , mostradas na Tabela 3.7, obtém-se um índice de colinearidade de 0,877, indicando assim que o autovalor λ_3 oferece informação media sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_1 e G_2 . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_3} versus y_{λ_3} , nota-se que, a coluna y_{λ_3} , que corresponde somente à contribuição do autovalor λ_3 , tem os maiores índices de sensibilidade apontando

aos geradores G_1 , G_2 e G_3 , enquanto que a coluna x_{λ_3} tem os maiores índices de sensibilidade apontando aos geradores G_1 e G_2 .

Finalmente, das colunas x_{λ_4} e y_{λ_4} , mostradas na Tabela 3.7, obtém-se um índice de colinearidade de 0,871, indicando assim que o autovalor λ_4 oferece informação média sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{15} e G_{16} . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_4} versus y_{λ_4} , nota-se que, a coluna y_{λ_4} , que corresponde somente à contribuição do autovalor λ_4 , tem os maiores índices de sensibilidade apontando aos geradores G_{15} , G_{16} e G_{17} . Por outro lado, a coluna x_{λ_4} tem os maiores índices de sensibilidade apontando aos geradores G_{15} e G_{16} .

Uma vez identificada a qualidade da informação que têm os autovalores analisados em relação às interações dos equipamentos de controle, procede-se ao agrupamento dos autovalores que proporcionam informação similar sobre estas interações. Para esta análise se adotará os seguintes critérios:

a) Da comparação entre as colunas x_{λ_i} e y_{λ_i} , apresentada na Tabela 3.7, consideram-se somente os índices de sensibilidades da coluna y_{λ_i} que tenham em comum, com a coluna x_{λ_i} , valores maiores que $\varepsilon_3=20\%$. Desta forma, obtém-se que:

- A partir da comparação entre as colunas x_{λ_1} e y_{λ_1} , mostrada na Tabela 3.7, podem-se verificar índices de sensibilidade em comum maiores que 20%, apontando aos geradores G_2 e G_3 , portanto, consideram-se estas duas sensibilidades da coluna y_{λ_1} para a análise.
- Similarmente, da comparação das colunas x_{λ_2} e y_{λ_2} , verifica-se que têm-se em comum índices de sensibilidade, com valores maiores que 20%, apontando aos geradores G_{16} e G_{17} , então, consideram-se estes índices de sensibilidades da coluna y_{λ_2} para a análise.

- No caso da comparação das colunas X_{λ_3} e Y_{λ_3} , percebe-se que existe índices de sensibilidade em comum maiores que 20%, apontando aos geradores G_1 e G_2 , por tanto, utiliza-se esta sensibilidade da coluna Y_{λ_3} para a avaliação.
- Finalmente, a comparação entre as colunas X_{λ_4} e Y_{λ_4} , permite observar que em ambas as colunas têm-se índices de sensibilidade em comum maiores que 20%, apontando para os geradores G_{15} e G_{16} . Por tanto, utiliza-se também esta duas últimas sensibilidades para a análise.

Na Tabela 3.8, mostra-se o resumo da aplicação do critério descrito em a).

Tabela 3.8 – Índice de Sensibilidade obtidas pela aplicação do Critério a)

Dispositivos de Controle	Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)			
	Y_{λ_1}	Y_{λ_2}	Y_{λ_3}	Y_{λ_4}
ΔQ_{G1}	-	-	100,00	-
ΔQ_{G2}	100,00	-	-55,98	-
ΔQ_{G3}	-99,90	-	-	-
ΔQ_{G15}	-	-	-	100,00
ΔQ_{G16}	-	100,0	-	-57,08
ΔQ_{G17}	-	-99,9	-	-

b) Se mais de 50% das variáveis controladoras (potências reativas dos geradores), que têm a maior participação em um determinado autovalor, aparecem em outro autovalor subsequente, estes autovalores têm que ser agrupados, já que oferecem informações similares sobre as interações dos dispositivos de controle ($\varepsilon_4 = 50\%$). Desta forma, percebe-se que:

- Na coluna Y_{λ_1} , correspondente ao autovalor λ_1 , 50% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_3} , correspondente ao autovalor λ_3 , ou seja, os autovalores λ_1 e λ_3 têm em comum a maior participação do gerador G_2 e, então, estes dois autovalores devem ser agrupados.

Ao analisar o agrupamento dos autovalores λ_1 e λ_3 , nota-se que o autovalor λ_1 indica a interação que tem os geradores G_2 e G_3 , enquanto que o autovalor λ_3 aponta ao acoplamento que tem os geradores G_1 e G_2 . Portanto, desta análise, pode-se dizer que os geradores G_1 e G_3 , também estão acoplados.

Considera-se, então, que os autovalores λ_1 e λ_3 têm informações similares sobre as regiões onde os dispositivos de controle têm significativos acoplamentos, neste caso a região formada pelos geradores G_1 , G_2 e G_3 .

Aplicando o mesmo critério, pode-se verificar que, os autovalores λ_2 e λ_4 também têm que ser agrupados, já que oferecem informação similar sobre a significativa interação dos geradores G_{15} , G_{16} e G_{17} .

Portanto, a metodologia proposta conseguiu reconhecer os autovalores que oferecem a informação necessária sobre os acoplamentos dos dispositivos de controle. Neste caso foram os autovalores λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 . Também, agruparam-se aqueles autovalores que oferecem informações similares sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle. Este foi o caso dos autovalores λ_1 e λ_3 que apontam a uma região composta pelos geradores G_1 , G_2 e G_3 e o outro grupo de autovalores λ_2 e λ_4 , que apontam a outra região composta pelos geradores G_{15} , G_{16} e G_{17} , estabelecida no critério descrito em b).

3.4.2 Sistema *New England* 39 Barras

O segundo sistema-teste a ser analisado é o *New England* 39 barras. Este sistema é obtido da referência em [2]. O diagrama unifilar deste sistema é exibido na Figura 3.4. Os dados deste sistema são mostrados no Apêndice C, no formato do programa desenvolvido no ambiente MATLAB.

Na Tabela 3.9 apresenta-se um resumo das características principais do sistema

Tabela 3.9 – Características Principais do Sistema New England 39 Barras

Parâmetros Principais do Sistema	Quantidade
Geradores	11
Transformadores	13
Carga Ativa	6400,5 MW
Carga Reativa	1408,9 Mvar

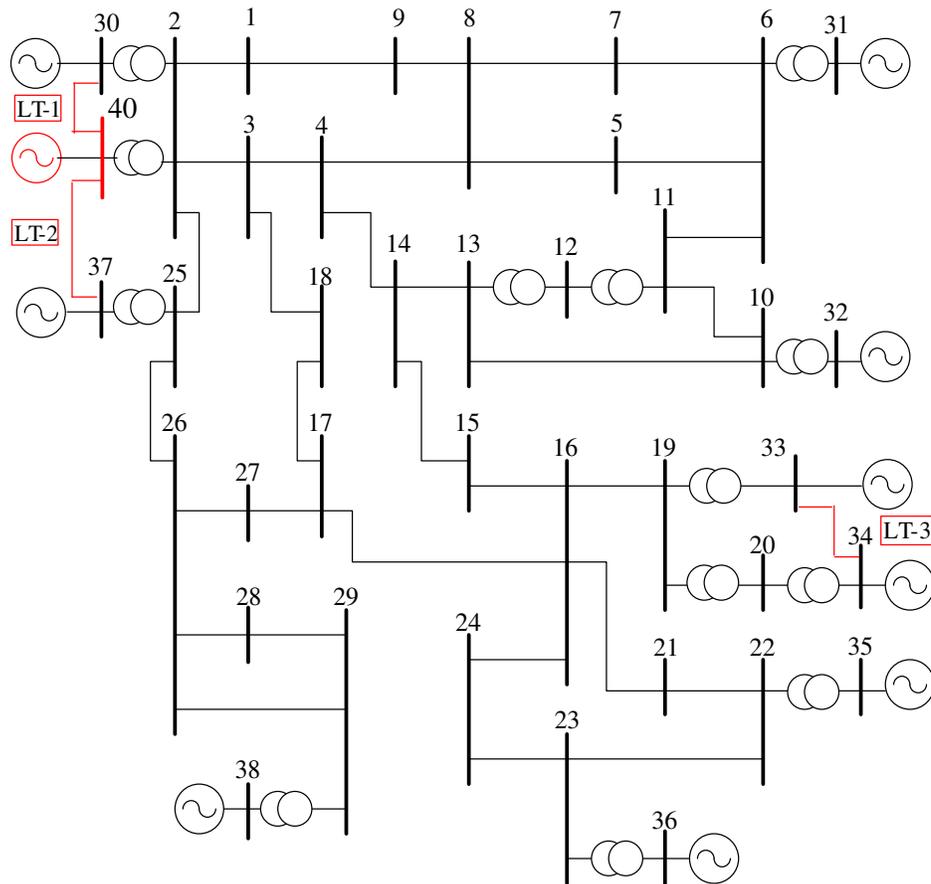


Figura 3.4 – Diagrama Unifilar do Sistema New England 39 Barras

Nas Tabelas 3.10 e 3.11 mostram-se, respectivamente, os autovalores da matriz [MSC], com módulo menor a ε_1 ($\varepsilon_1 = 0,06$), e os fatores de participação correspondente a estes autovalores.

Tabela 3.10 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 39 Barras

Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i	Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i
1	3,22E-04	5	2,73E-02
2	3,37E-04	6	3,38E-02
3	4,87E-04	7	5,63E-02
4	2,21E-02	8	5,85E-02

Tabela 3.11 – Fatores de Participação para os Autovalores Selecionados

Dispositivos de Controle	Fatores de Participação para cada Autovalor (%)							
	FP- λ_1	FP- λ_2	FP- λ_3	FP- λ_4	FP- λ_5	FP- λ_6	FP- λ_7	FP- λ_8
Q_{G38}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	2,60	24,70
Q_{G30}	34,60	33,50	0,00	0,00	0,00	2,00	0,90	13,60
Q_{G31}	0,00	0,00	0,00	0,00	49,70	5,10	2,00	12,10
Q_{G32}	0,00	0,00	0,00	0,20	49,40	12,00	1,50	10,30
Q_{G33}	0,00	0,00	49,10	0,20	0,00	0,00	16,50	4,10
Q_{G34}	0,00	0,00	50,90	0,20	0,00	0,00	16,00	4,00
Q_{G35}	0,00	0,00	0,00	62,60	0,00	0,00	18,40	0,70
Q_{G36}	0,00	0,00	0,00	36,70	0,10	0,10	40,40	1,60
Q_{G37}	4,50	61,50	0,00	0,00	0,00	2,20	1,00	14,50
Q_{G39}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	76,30	0,20	0,00
Q_{G40}	60,90	5,00	0,00	0,00	0,00	2,20	1,00	14,60

Novamente, utilizando o algoritmo da Figura 3.2, calculam-se os índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras (potências reativas geradas pelos geradores Q_{Gi}) e as variáveis controladas (tensões controladas pelos geradores V_i) a partir da $[MSC_4]$, para cada autovalor da Tabela 3.10.

Para efetuar este cálculo, primeiramente se determina o dispositivo de controle k que apresenta a maior participação em cada um dos autovalores λ_i . Na Tabela 3.11, observa-se que o gerador G_{40} tem a maior participação (60,90%) no primeiro autovalor λ_1 , o gerador G_{37} no segundo autovalor λ_2 , o gerador G_{34} no terceiro autovalor λ_3 , o gerador G_{35} no quarto autovalor λ_4 , o gerador G_{31} no quinto autovalor λ_5 , o gerador G_{39} no sexto autovalor λ_6 , o gerador G_{36} no sétimo autovalor λ_7 , e o gerador G_{38} no oitavo autovalor λ_8 .

Uma vez identificado o dispositivo de controle k com a maior participação em um determinado autovalor λ_i , varia-se a tensão na sua barra controlada V_k em (3.13). Para o caso do primeiro autovalor λ_1 , o G_{40} é o dispositivo de controle com a maior participação e, portanto, a tensão na sua barra controlada V_{40} é incrementada em $\Delta V_{40} = +0.01$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade resolvendo (3.13) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}.b$. Este procedimento é repetido para os demais autovalores.

Na Tabela 3.12, apresentam-se os índices de sensibilidade normalizados dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.12 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz $[MSC_4]$

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas da Matriz $[MSC_4]$							
	X_{λ_1} (%)	X_{λ_2} (%)	X_{λ_3} (%)	X_{λ_4} (%)	X_{λ_5} (%)	X_{λ_6} (%)	X_{λ_7} (%)	X_{λ_8} (%)
ΔQ_{G38}	0,00	-0,23	-0,08	-5,76	-4,45	-5,99	-4,11	100,00
ΔQ_{G30}	-51,27	-49,06	-0,10	-7,74	-12,00	-33,12	-5,50	-31,55
ΔQ_{G31}	0,00	-0,08	-0,08	-6,26	100,00	-27,01	-4,46	-8,48
ΔQ_{G32}	0,00	-0,09	-0,11	-8,52	-48,41	-21,90	-6,06	-10,38
ΔQ_{G33}	0,00	-0,08	-96,47	-16,85	-7,63	-5,57	-12,00	-13,59
ΔQ_{G34}	0,00	-0,04	100,00	-7,77	-3,51	-2,55	-5,54	-6,26
ΔQ_{G35}	0,00	-0,09	-0,25	100,00	-8,74	-6,37	-62,93	-15,57
ΔQ_{G36}	0,00	-0,05	-0,14	-49,43	-4,91	-3,56	100,00	-8,73
ΔQ_{G37}	-50,29	100,00	-0,07	-5,48	-6,93	-17,34	-3,91	-36,33
ΔQ_{G39}	0,00	-0,21	-0,06	-4,74	-28,08	100,00	-3,39	-12,11
ΔQ_{G40}	100,00	-52,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Similarmente, calculam-se os índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras (potências reativas geradas pelos geradores Q_{Gi}) e as variáveis controladas (tensões controladas pelos geradores V_i) a partir das matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada autovalor λ_i separadamente.

Para o caso do primeiro autovalor λ_1 , sabe-se que o gerador G_{40} é o dispositivo de controle com a maior participação, portanto, a tensão na sua barra controlada V_{40} é incrementada em $\Delta V_{40} = +0,01$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade dos dispositivos de controle resolvendo (3.14) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}.b$.

Este procedimento é repetido para os demais autovalores $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ e λ_8 variando as tensões $V_{37}, V_{34}, V_{35}, V_{31}, V_{39}, V_{36}$ e V_{38} , respectivamente.

Na Tabela 3.13, apresentam-se os índices de sensibilidade normalizados dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.13 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada Autovalor

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$							
	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_2} (%)	Y_{λ_3} (%)	Y_{λ_4} (%)	Y_{λ_5} (%)	Y_{λ_6} (%)	Y_{λ_7} (%)	Y_{λ_8} (%)
ΔQ_{G38}	0,13	-0,06	0,04	-2,12	0,60	3,46	-24,41	100,00
ΔQ_{G30}	-75,97	-74,44	-0,02	-1,41	2,42	-16,36	14,92	-75,12
ΔQ_{G31}	0,08	0,02	0,05	-0,99	100,00	-25,14	-21,48	68,96
ΔQ_{G32}	0,09	0,02	0,06	-5,48	-99,40	-38,40	-18,27	63,27
ΔQ_{G33}	0,10	0,00	-97,48	-6,11	1,81	1,95	-61,79	-40,28
ΔQ_{G34}	0,00	0,00	100,00	-6,11	1,81	1,91	-61,23	-40,05
ΔQ_{G35}	0,08	0,00	0,15	100,00	-0,93	0,98	67,09	17,77
ΔQ_{G36}	0,04	0,00	0,08	-76,93	4,62	3,99	100,00	26,07
ΔQ_{G37}	-27,13	100,00	0,02	-1,45	2,47	-16,85	15,20	-76,78
ΔQ_{G39}	0,23	0,06	0,04	-0,85	-12,97	100,00	-6,83	2,37
ΔQ_{G40}	100,00	-28,54	0,10	-1,48	2,53	-16,98	15,34	-77,25

Com o objetivo de determinar se os autovalores utilizados na análise oferecem informação baixa, média ou alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle (conforme definido na Tabela 3.2), é apresentado na Tabela 3.14 o cálculo dos índices de colinearidade entre cada coluna x_{λ_i} da Tabela 3.12 e cada coluna y_{λ_i} da Tabela 3.13.

Tabela 3.14– Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.12 Vs.3.13

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)															
	X _{λ₁}	Y _{λ₁}	X _{λ₂}	Y _{λ₂}	X _{λ₃}	Y _{λ₃}	X _{λ₄}	Y _{λ₄}	X _{λ₅}	Y _{λ₅}	X _{λ₆}	Y _{λ₆}	X _{λ₇}	Y _{λ₇}	X _{λ₈}	Y _{λ₈}
ΔQ _{G38}	0,00	0,13	-0,23	-0,06	-0,08	0,04	-5,76	-2,12	-4,45	0,60	-5,99	3,46	-4,11	-24,41	100,00	100,00
ΔQ _{G30}	-51,27	-75,97	-49,06	-74,44	-0,10	-0,02	-7,74	-1,41	-12,00	2,42	-3,12	-16,36	-5,50	14,92	-31,55	-75,12
ΔQ _{G31}	0,00	0,08	-0,08	0,02	-0,08	0,05	-6,26	-0,99	100,00	100,00	-27,01	-25,14	-4,46	-21,48	-8,48	68,96
ΔQ _{G32}	0,00	0,09	-0,09	0,02	-0,11	0,06	-8,52	-5,48	-48,41	-99,40	-21,90	-38,40	-6,06	-18,27	-10,38	63,27
ΔQ _{G33}	0,00	0,10	-0,08	0,00	-96,47	-97,48	-16,85	-6,11	-7,63	1,81	-5,57	1,95	-12,00	-61,79	-13,59	-40,28
ΔQ _{G34}	0,00	0,00	-0,04	0,00	100,00	100,00	-7,77	-6,11	-3,51	1,81	-2,55	1,91	-5,54	-61,23	-6,26	-40,05
ΔQ _{G35}	0,00	0,08	-0,09	0,00	-0,25	0,15	100,00	100,00	-8,74	-0,93	-6,37	0,98	-62,93	67,09	-15,57	17,77
ΔQ _{G36}	0,00	0,04	-0,05	0,00	-0,14	0,08	-49,43	-76,93	-4,91	4,62	-3,56	3,99	100,00	100,00	-8,73	26,07
ΔQ _{G37}	-50,29	-27,13	100,00	100,00	-0,07	0,02	-5,48	-1,45	-6,93	2,47	-17,34	-16,85	-3,91	15,20	-36,33	-76,78
ΔQ _{G39}	0,00	0,23	-0,21	0,06	-0,06	0,04	-4,74	-0,85	-28,08	-12,97	100,00	100,00	-3,39	-6,83	-12,11	2,37
ΔQ _{G40}	100,00	100,00	-52,32	-28,54	0,00	0,10	0,00	-1,48	0,00	2,53	0,00	-16,98	0,00	15,34	0,00	-77,25
Índice de Colinearidade	X _{λ₁} vs. Y _{λ₁}		X _{λ₂} vs. Y _{λ₂}		X _{λ₃} vs. Y _{λ₃}		X _{λ₄} vs. Y _{λ₄}		X _{λ₅} vs. X _{λ₅}		X _{λ₆} vs. Y _{λ₆}		X _{λ₇} vs. Y _{λ₇}		X _{λ₈} vs. Y _{λ₈}	
	0,9647		0,9623		1,0000		0,9711		0,9181		0,9681		0,3808		0,6148	

Através das colunas x_{λ_1} e Y_{λ_1} da Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 0,9647, indicando assim que o autovalor λ_1 oferece informação alta sobre os acoplamentos entre os dispositivos de controle G_{30} , G_{37} e G_{40} . Este índice de colinearidade justifica-se, porque ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_1} versus Y_{λ_1} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_{30} , G_{37} e G_{40} .

Do mesmo modo, das colunas x_{λ_2} e Y_{λ_2} da Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 0,9623, indicando assim que o autovalor λ_2 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{30} , G_{37} e G_{40} . Este índice de colinearidade justifica-se, porque ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_2} versus Y_{λ_2} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_{30} , G_{37} e G_{40} .

Das colunas x_{λ_3} e Y_{λ_3} da Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 1,000, indicando assim que o autovalor λ_3 oferece informação alta sobre os significativos acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{33} e G_{34} . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_3} versus Y_{λ_3} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_{33} e G_{34} .

A partir das colunas x_{λ_4} e Y_{λ_4} da Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 0,9711; indicando assim que o autovalor λ_4 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{35} e G_{36} . Este índice de colinearidade justifica-se, porque ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_4} versus Y_{λ_4} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_{35} e G_{36} .

No caso das colunas x_{λ_5} e Y_{λ_5} mostradas na Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 0,9181, indicando assim que o autovalor λ_5 oferece informação média sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{31} , G_{32} e G_{39} .

Este índice de colinearidade justifica-se, porque ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_5} versus Y_{λ_5} , nota-se que, a coluna Y_{λ_5} que corresponde somente à contribuição do autovalor λ_5 tem os maiores índices de sensibilidade apontando aos geradores G_{31} e G_{32} , enquanto que a coluna x_{λ_5} tem os maiores índices de sensibilidade apontando para os geradores G_{31} , G_{32} e G_{39} .

Similarmente, das colunas x_{λ_6} e Y_{λ_6} da Tabela 3.14 obtém-se um índice de colinearidade de 0,9681, indicando assim que o autovalor λ_6 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_{31} , G_{32} e G_{39} . Este índice de colinearidade justifica-se porque, ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_6} versus Y_{λ_6} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_{31} , G_{32} e G_{39} .

Finalmente, verificar-se que os índices de colinearidade dos autovalores λ_7 e λ_8 têm índices de colinearidade de 0,3808 e 0,6148, respectivamente, indicando assim que estes autovalores oferecem informações baixas sobre os acoplamentos entre os dispositivos de controle, e, portanto, não serão considerados na análise.

Logo, agrupam-se os autovalores com informações similares sobre dispositivos de controle com fortes acoplamentos. Para esta análise se adotará os seguintes critérios:

- a) Da comparação entre as colunas x_{λ_i} e Y_{λ_i} , apresentada na Tabela 3.14, consideram-se somente os índices de sensibilidades da coluna Y_{λ_i} que tenham em comum, com a coluna x_{λ_i} , valores maiores que $\varepsilon_3=20\%$. Desta forma, na Tabela 3.15, são mostrados os índices de sensibilidade obtidos da aplicação deste critério.

Tabela 3.15 – Índice de Sensibilidades obtidas pela aplicação do Critério a)

Dispositivos de Controle	Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)					
	Y_{λ_1}	Y_{λ_2}	Y_{λ_3}	Y_{λ_4}	Y_{λ_5}	Y_{λ_6}
ΔQ_{G38}	-	-	-	-	-	-
ΔQ_{G30}	-75.97	-74.44	-	-	-	-
ΔQ_{G31}	-	-	-	-	100.00	-25.14
ΔQ_{G32}	-	-	-	-	-99.40	-38.40
ΔQ_{G33}	-	-	-97.48	-	-	-
ΔQ_{G34}	-	-	100.00	-	-	-
ΔQ_{G35}	-	-	-	100.00	-	-
ΔQ_{G36}	-	-	-	-76.93	-	-
ΔQ_{G37}	-27.13	100.00	-	-	-	-
ΔQ_{G39}	-	-	-	-	-	100.00
ΔQ_{G40}	100.00	-28.54	-	-	-	-

b) Se mais de 50% das variáveis controladoras (potências reativas dos geradores), que têm a maior participação em um determinado autovalor, aparecem em outro autovalor subsequente, estes autovalores têm que ser agrupados, já que têm informações similares sobre as interações dos dispositivos de controle ($\varepsilon_4 = 50\%$). Desta forma, obtém-se que:

- Na coluna Y_{λ_1} correspondente ao autovalor λ_1 , 100% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_2} correspondente ao autovalor λ_2 , ou seja, que os autovalores λ_1 e λ_2 têm em comum a maior participação dos geradores G_{30} , G_{37} e G_{40} . Logo, estes dois autovalores devem ser agrupados.
- Na coluna Y_{λ_3} correspondente ao autovalor λ_3 , suas variáveis controladoras não aparecem em nenhuma outra coluna, indicando assim que este autovalor é o único responsável pelos acoplamentos entre os geradores G_{33} e G_{34} . Similarmente, na coluna Y_{λ_4} correspondente ao autovalor λ_4 , as variáveis controladoras não aparecem associadas a nenhum outro autovalor, indicando assim que este autovalor é o único responsável pelos acoplamentos entre os geradores G_{35} e G_{36} .

- Na coluna Y_{λ_5} correspondente ao autovalor λ_5 , 100% das variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_6} correspondente ao autovalor λ_6 , ou seja, os autovalores λ_5 e λ_6 têm em comum a maior participação dos geradores G_{31} , G_{32} e G_{39} , então estes dois autovalores devem ser agrupados.

Novamente, o método proposto conseguiu reconhecer os autovalores que oferecem a informação necessária sobre os acoplamentos dos dispositivos de controle. Neste caso, foram os autovalores λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 e λ_6 . Seguidamente, agrupou-se aqueles autovalores que proporcionam informações similares sobre as interações que têm dos dispositivos de controle, como foi o caso dos autovalores λ_1 e λ_2 que apontam uma mesma região composta pelos geradores G_{30} , G_{37} e G_{40} e o outro grupo de autovalores λ_5 e λ_6 , que apontam a outra região composta pelos geradores G_{31} , G_{32} e G_{39} , estabelecida no critério descrito em b).

3.4.3 Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

Neste item, apresenta-se a metodologia de identificação e agrupamentos de autovalores com informações similares sobre as interações dos equipamentos de controle para o sistema S/SE Brasileiro de 730 barras. Este sistema foi extraído da referência [13]. As características principais do sistema são mostradas na Tabela 3.16. O diagrama unifilar parcial do sistema é mostrado na Figura 3.5 (Obs. O diagrama unifilar foi extraído do Programa ANAREDE [16] e não contém todas as barras do sistema).

Tabela 3.16– Características Principais do Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras

Parâmetros Principais do Sistema	Quantidade
Geradores	104
Transformadores	254
Carga Ativa	29,840. 23 MW
Carga Reativa	6,573. 90 Mvar

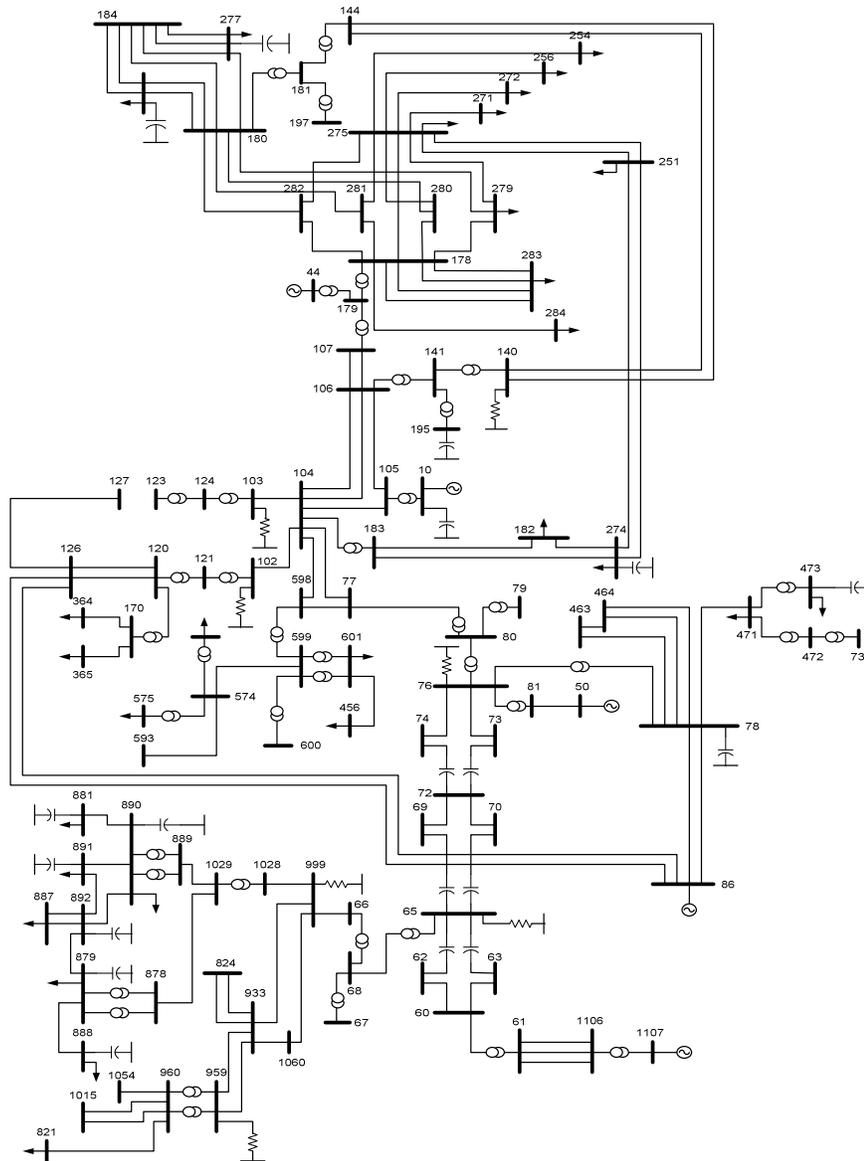


Figura 3.5 – Diagrama Unifilar Parcial do Sistema S/SE Brasileiro 730 de Barras

Com os dados de entrada, correspondente aos menores autovalores da matriz $[MSC]$, apresentados na Tabela 2.17, e seus respectivos fatores de participação, foram avaliadas as matrizes $[MSC_4]$ e $[MSC_4]_{\lambda_i}$ para encontrar os maiores índices de sensibilidade dos dispositivos de controle através das equações (3.13) e (3.14), respectivamente. Logo, calculam-se os índices de colinearidade para determinar se os autovalores utilizados na análise oferecem informação alta, média ou baixa sobre as interações que têm os dispositivos de controle, tal como é mostrado na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades de X_{λ_i} vs. Y_{λ_i}

Nº do Autovalor	X_{λ_i} vs. Y_{λ_i}	IC	Nº do Autovalor	X_{λ_i} vs. Y_{λ_i}	IC
1	X_{λ_1} vs. Y_{λ_1}	0,989	20	$X_{\lambda_{20}}$ vs. $Y_{\lambda_{20}}$	0,909
2	X_{λ_2} vs. Y_{λ_2}	0,989	21	$X_{\lambda_{21}}$ vs. $Y_{\lambda_{21}}$	0,503
3	X_{λ_3} vs. Y_{λ_3}	0,900	22	$X_{\lambda_{22}}$ vs. $Y_{\lambda_{22}}$	0,382
4	X_{λ_4} vs. Y_{λ_4}	0,900	23	$X_{\lambda_{23}}$ vs. $Y_{\lambda_{23}}$	0,377
5	X_{λ_5} vs. Y_{λ_5}	0,992	24	$X_{\lambda_{24}}$ vs. $Y_{\lambda_{24}}$	0,677
6	X_{λ_6} vs. Y_{λ_6}	0,953	25	$X_{\lambda_{25}}$ vs. $Y_{\lambda_{25}}$	0,876
7	X_{λ_7} vs. Y_{λ_7}	0,915	26	$X_{\lambda_{26}}$ vs. $Y_{\lambda_{26}}$	0,673
8	X_{λ_8} vs. Y_{λ_8}	0,929	27	$X_{\lambda_{27}}$ vs. $Y_{\lambda_{27}}$	0,657
9	X_{λ_9} vs. Y_{λ_9}	0,552	28	$X_{\lambda_{28}}$ vs. $Y_{\lambda_{28}}$	0,832
10	$X_{\lambda_{10}}$ vs. $Y_{\lambda_{10}}$	0,622	29	$X_{\lambda_{29}}$ vs. $Y_{\lambda_{29}}$	0,789
11	$X_{\lambda_{11}}$ vs. $Y_{\lambda_{11}}$	0,731	30	$X_{\lambda_{30}}$ vs. $Y_{\lambda_{30}}$	0,802
12	$X_{\lambda_{12}}$ vs. $Y_{\lambda_{12}}$	0,547	31	$X_{\lambda_{31}}$ vs. $Y_{\lambda_{31}}$	0,602
13	$X_{\lambda_{13}}$ vs. $Y_{\lambda_{13}}$	0,428	32	$X_{\lambda_{32}}$ vs. $Y_{\lambda_{32}}$	0,980
14	$X_{\lambda_{14}}$ vs. $Y_{\lambda_{14}}$	0,494	33	$X_{\lambda_{33}}$ vs. $Y_{\lambda_{33}}$	0,543
15	$X_{\lambda_{15}}$ vs. $Y_{\lambda_{15}}$	0,534	34	$X_{\lambda_{34}}$ vs. $Y_{\lambda_{34}}$	0,544
16	$X_{\lambda_{16}}$ vs. $Y_{\lambda_{16}}$	0,520	35	$X_{\lambda_{35}}$ vs. $Y_{\lambda_{35}}$	0,787
17	$X_{\lambda_{17}}$ vs. $Y_{\lambda_{17}}$	0,784	36	$X_{\lambda_{36}}$ vs. $Y_{\lambda_{36}}$	0,395
18	$X_{\lambda_{18}}$ vs. $Y_{\lambda_{18}}$	0,958	37	$X_{\lambda_{37}}$ vs. $Y_{\lambda_{37}}$	0,294
19	$X_{\lambda_{19}}$ vs. $Y_{\lambda_{19}}$	0,822			

Como primeira observação, verifica-se que os índices de colinearidade dos autovalores: λ_9 , λ_{10} , λ_{11} , λ_{12} , λ_{13} , λ_{14} , λ_{15} , λ_{16} , λ_{17} , λ_{19} , λ_{21} , λ_{22} , λ_{23} , λ_{24} , λ_{26} , λ_{27} , λ_{28} , λ_{29} , λ_{30} , λ_{31} , λ_{33} , λ_{34} , λ_{35} , λ_{36} e λ_{37} indicam que estes oferecem informações baixas sobre os acoplamentos entre os dispositivos de controle segundo o estabelecido na Tabela 3.2, e, portanto, não serão considerados na análise.

Continuando com a análise, pode-se verificar que os índices de colinearidade dos autovalores λ_1 , λ_2 , λ_5 e λ_{32} indicam que estes autovalores oferecem informações altas sobre os acoplamentos entre os dispositivos de controle, segundo o estabelecido na Tabela 3.2, e, portanto, são considerados na análise.

Os índices de colinearidade dos autovalores $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{18}, \lambda_{20}$ e λ_{25} indicam que estes autovalores oferecem informações médias sobre as interações que têm os dispositivos de controle, segundo o estabelecido na Tabela 3.2, dessa forma, também são considerados na análise.

Após a avaliação dos critérios a e b estabelecidos na Seção 3.2, para agrupar os autovalores que proporcionam informações similares sobre os acoplamentos dos dispositivos de controle, tem-se que:

- Na coluna Y_{λ_1} correspondente ao autovalor λ_1 , 100% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_3} , correspondente ao autovalor λ_3 , ou seja, os autovalores λ_1 e λ_3 , têm em comum a maior participação dos geradores G_{567} , G_{733} e G_{734} . Então estes dois autovalores devem ser agrupados;
- No caso da coluna Y_{λ_2} correspondente ao autovalor λ_2 , 100% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_4} , correspondente ao autovalor λ_4 , ou seja, os autovalores λ_2 e λ_4 têm em comum a maior participação dos geradores G_{449} , G_{731} e G_{732} . Então, estes dois autovalores devem ser agrupados;
- Na coluna $Y_{\lambda_{18}}$ correspondente ao autovalor λ_{18} , 100% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna $Y_{\lambda_{20}}$, correspondente ao autovalor λ_{20} , ou seja, os autovalores λ_{18} e λ_{20} têm em comum a maior participação dos geradores G_{489} , G_{490} e G_{491} , portanto, estes dois autovalores devem ser agrupados.

Portanto, a metodologia proposta foi capaz de reconhecer os autovalores que oferecem informação necessária sobre os acoplamentos dos dispositivos de controle. Neste caso foram os autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{18}, \lambda_{20}, \lambda_{25}$ e λ_{32} . A continuação, agrupou-se aqueles autovalores que têm informações similares sobre os acoplamentos dos dispositivos de controle, como foi o caso dos

autovalores λ_1 e λ_3 que apontam a uma mesma região composta pelos geradores G_{567} , G_{733} e G_{734} . Também o grupo de autovalores λ_2 e λ_4 , que apontam a outra região composta pelos geradores G_{449} , G_{731} e G_{732} e finalmente o grupo de autovalores λ_{18} e λ_{20} que apontam a uma mesma região composta pelos geradores G_{489} , G_{490} e G_{491} , estabelecida no critério descrito em b).

3.4.4 Sistema Duplo de 14 Barras

O ultimo sistema a ser analisado é o sistema duplo de 14 barras. Este sistema é uma duplicação do Sistema de 7 Barras, apresentado no Apêndice C, replicando abaixo do sistema original a mesma topologia, mantendo unidas as duas áreas através de uma impedância de interligação variável, tal como é mostrado na Figura 3.6.

O sistema inclui o modelo utilizado para representação de barras de geração PV, consta de 14 barras, 15 circuitos, 6 geradores ; 4 geradores com controle remoto de tensão e 2 com controle local de tensão, 2 transformadores do tipo LTC com controle local de tensão e uma reatância variável jX entre as barras 4 e 10 de valor 100%.

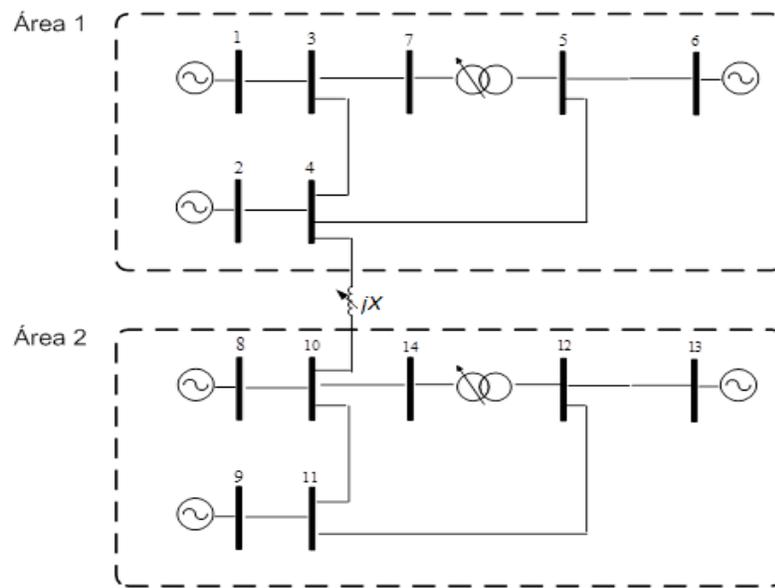


Figura 3.6– Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras

Para a avaliação da metodologia proposta, será utilizado como dados entrada os autovalores da matriz [MSC], com módulo menor a ε_1 ($\varepsilon_1 = 0,06$), e seus respectivos fatores de participação correspondentes à interação de geradores e transformadores tipo LTC (Etapa 2) apresentada na Seção 2.7.5.2. Estes dados de entrada são mostrados nas Tabelas 3.18 e 3.19, respectivamente.

Tabela 3.18 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema de Duplo 14 Barras - Etapa 2

Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i	Nº do Autovalor	Módulo dos Autovalores λ_i
1	3,44E-06	3	2,59E-05
2	3,54E-06	4	5,26E-05

Tabela 3.19 – Fatores de Participação para os Autovalores Selecionados

Dispositivos de Controle	Fatores de Participação (%)			
	FP- λ_1	FP- λ_2	FP- λ_3	FP- λ_4
Q_{G1}	63,92	0,00	0,00	13,96
Q_{G2}	33,36	0,00	0,00	9,33
Q_{G6}	0,00	0,00	0,00	0,00
Q_{G8}	0,00	61,81	14,24	0,00
Q_{G9}	0,00	33,54	8,05	0,00
Q_{G13}	0,00	0,00	0,00	0,00
t₇₋₅	2,72	0,00	0,00	76,71
t₁₄₋₁₂	0,00	4,65	77,71	0,00

A partir da utilização do algoritmo Figura 3.2, calculam-se os índices de sensibilidade entre as variáveis controladoras (Q_{Gi}) e as variáveis controladas (V_i) a partir da matriz $[MSC_4]$, para cada autovalor selecionado.

Para efetuar este cálculo, primeiramente determina-se o dispositivo de controle k que apresenta a maior participação em cada um dos autovalores λ_i . Na Tabela 3.19, observa-se que o gerador G_1 tem a maior participação (63,92%) no primeiro autovalor λ_1 , o gerador G_8 no segundo autovalor λ_2 , o LTC₁₄₋₁₂ no terceiro autovalor λ_3 e o LTC₇₋₅ no quarto autovalor λ_4 .

Uma vez identificado o dispositivo de controle k com a maior participação em um determinado autovalor λ_i , varia-se a tensão na sua barra controlada V_k em (3.13). Para o caso do primeiro autovalor λ_1 o gerador G_1 é o dispositivo de controle com a maior participação e, portanto, a tensão na sua barra controlada V_3 é incrementada em $\Delta V_3 = +0,000001$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade resolvendo (3.13) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}b$. Este procedimento é repetido para os demais autovalores: λ_2 , λ_3 e λ_4 , variando as tensões V_{10} , V_{14} e V_7 , respectivamente.

Na Tabela 3.20, apresentam-se os índices de sensibilidade, normalizados, dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.20 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz $[MSC_4]$

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas da matriz $[MSC_4]$			
	X_{λ_1} (%)	X_{λ_2} (%)	X_{λ_3} (%)	X_{λ_4} (%)
ΔQ_{G1}	100,00	0,00	0,00	-100,00
ΔQ_{G2}	-99,00	0,00	0,00	98,00
ΔQ_{G6}	-0,98	0,00	0,00	1,96
ΔQ_{G8}	0,00	100,00	-100,00	0,00
ΔQ_{G9}	0,00	-98,00	96,20	0,00
ΔQ_{G13}	0,00	-1,93	3,85	0,00
Δt_{7-5}	14,30	0,00	0,00	-28,60
Δt_{14-12}	0,00	28,25	-56,50	0,00

Similarmente, calculam-se os índices de sensibilidade entre as grandezas controladoras (Q_{Gi}) e as variáveis controladas (V_i), a partir das matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada autovalor λ_i separadamente. Para o caso do primeiro autovalor λ_1 , sabe-se que o gerador G_1 é o dispositivo de controle com a maior participação e, portanto, a tensão na sua barra controlada V_3 é incrementada em $\Delta V_3 = +0,000001$ p.u. Logo, obtêm-se os índices de sensibilidade dos dispositivos de controle resolvendo (3.14) como um sistema do tipo $x=[A]^{-1}b$. Este procedimento é repetido para os demais autovalores: λ_2 , λ_3 e λ_4 , variando as tensões V_{10} , V_{14} e V_7 , respectivamente.

Na Tabela 3.21, apresentam-se os índices de sensibilidade, normalizados, dos dispositivos de controle de tensão para cada autovalor.

Tabela 3.21 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada Autovalor

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$			
	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_2} (%)	Y_{λ_3} (%)	Y_{λ_4} (%)
ΔQ_{G1}	100,00	0,00	0,00	-33,49
ΔQ_{G2}	-99,39	0,00	0,00	26,64
ΔQ_{G6}	-0,61	0,00	0,00	6,85
ΔQ_{G8}	0,00	100,00	-31,54	0,00
ΔQ_{G9}	0,00	-98,86	24,73	0,00
ΔQ_{G13}	0,00	-1,14	6,81	0,00
Δt_{7-5}	8,97	0,00	0,00	-100,00
Δt_{14-12}	0,00	16,67	-100,00	0,00

Segundo o conceito de colinearidade, descrito pela expressão (3.12), na Tabela 3.22 mostra-se o cálculo dos índices de colinearidade entre cada coluna da Tabela 3.20 e cada coluna da Tabela 3.21.

Tabela 3.22 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.21

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)							
	X_{λ_1}	Y_{λ_1}	X_{λ_2}	Y_{λ_2}	X_{λ_3}	Y_{λ_3}	X_{λ_4}	Y_{λ_4}
ΔQ_{G1}	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	-33,49
ΔQ_{G2}	-99,00	-99,39	0,00	0,00	0,00	0,00	98,00	26,64
ΔQ_{G6}	-0,98	-0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96	6,85
ΔQ_{G8}	0,00	0,00	100,00	100,00	-100,00	-31,54	0,00	0,00
ΔQ_{G9}	0,00	0,00	-98,00	-98,86	96,20	24,73	0,00	0,00
ΔQ_{G13}	0,00	0,00	-1,93	-1,14	3,85	6,81	0,00	0,00
Δt_{7-5}	14,30	8,97	0,00	0,00	0,00	0,00	-28,60	-100,00
Δt_{14-12}	0,00	0,00	28,25	16,67	-56,50	-100,00	0,00	0,00
Índice de Colinearidade	S- 1 VS. S-A1	S- 2 VS. S-A2	S- 3 VS. S-A3	S- 4 VS. S-A4				
	0,999	0,997	0,693	0,577				

Das colunas X_{λ_1} e Y_{λ_1} da Tabela 3.22 obtém-se um índice de colinearidade de 0,999, indicando assim que o autovalor λ_1 oferece informação alta sobre os

acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_1 , G_2 e LTC_{7-5} . Este índice de colinearidade justifica-se porque ao comparar os índices sensibilidades das colunas x_{λ_1} Versus y_{λ_1} , nota-se que, nestas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando para os dispositivos de controle G_1 , G_2 e LTC_{7-5} .

Similarmente, nas colunas x_{λ_2} e y_{λ_2} da Tabela 3.22 obtém-se um índice de colinearidade de 0,997, indicando assim que o autovalor λ_2 oferece informação suficiente sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} . Este índice de colinearidade justifica-se porque ao comparar as sensibilidades das colunas x_{λ_2} versus y_{λ_2} , nota-se que, em cada uma destas colunas têm-se os maiores índices de sensibilidade apontando aos dispositivos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} .

Nas colunas x_{λ_3} e y_{λ_3} , ao aplicar-lhes a equação (3.12) obtém-se um índice de colinearidade de 0,693, indicando que o autovalor λ_3 tem uma baixa informação dos acoplamentos, apesar de que ambas colunas têm os maiores índices de sensibilidade apontando aos dispositivos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} . Neste caso, não é que o autovalor λ_2 não tenha alta informação do acoplamento dos dispositivos de controle, na verdade o que acontece é que o autovalor λ_3 não esta agregando a informação necessária aos índices de sensibilidade. O mesmo acontece com o autovalor λ_4 . Neste sentido, para comprovar esta afirmação, primeiro agrupam-se os autovalores que oferecem informações similares sobre os acoplamentos dispositivos de controle. Para esta análise se adota a seguinte critério:

- a) Da Tabela 3.22, se mais de 50% das variáveis de estado dos dispositivos de controle (Q_{G_i} ou t_{i-j}) que têm a maior participação em um determinado autovalor, aparecem em outro autovalor subsequente, estes autovalores têm que ser agrupados, já que têm informações similares sobre os as interações dos dispositivos de controle ($\epsilon_4 = 50\%$). Desta forma, obtém-se que:

- Na coluna Y_{λ_1} correspondente ao autovalor λ_1 , 100% de suas variáveis estado aparecem na coluna Y_{λ_4} correspondente ao autovalor λ_4 , ou seja, que os autovalores λ_1 e λ_4 têm em comum a maior participação dos dispositivos de controle G_1 , G_2 e LTC_{7-5} , então estes dois autovalores devem ser agrupados.
 - Similarmente, na coluna Y_{λ_2} correspondente ao autovalor λ_2 , 100% de suas variáveis controladoras aparecem na coluna Y_{λ_3} correspondente ao autovalor λ_3 , ou seja, que os autovalores λ_2 e λ_3 têm em comum a maior participação dos dispositivos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} . Então estes dois autovalores devem ser agrupados.
- b) Somar as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_i}$ obtidas pela contribuição de cada autovalor λ_i , de cada grupo obtido do passo a).

Por exemplo, do primeiro grupo de autovalores λ_1 e λ_4 , somar $[MSC_4]_{\lambda_1}$ e $[MSC_4]_{\lambda_4}$ obtendo-se a matriz de sensibilidade $[MSC_4]_{\lambda_1+\lambda_4}$ apresentada na equação (3.15).

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{G1} \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta Q_{G6} \\ \Delta Q_{G8} \\ \Delta Q_{G9} \\ \Delta Q_{G13} \\ \Delta t_{7-5} \\ \Delta t_{14-12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200000,24 & -100000,14 & 0,05 & 0,87 & -0,44 & 0,00 & -100000,16 & -0,38 \\ -198039,37 & 100000,16 & -0,04 & -0,87 & 0,44 & 0,00 & 98039,27 & 0,37 \\ -1960,72 & -0,04 & -0,00 & -0,00 & 0,00 & 0,00 & 1960,77 & 0,00 \\ 1,62 & -0,87 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,75 & 0,00 \\ -1,55 & 0,81 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,74 & 0,00 \\ -0,01 & 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 28607,79 & 1,00 & 0,07 & 0,11 & -0,01 & 0,00 & -28608,84 & -0,05 \\ 0,24 & -0,15 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,09 & 0,00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_{10} \\ \Delta V_{11} \\ \Delta V_{13} \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Igualmente, do segundo grupo de autovalores λ_2 e λ_3 , somar $[MSC_4]_{\lambda_2}$ e $[MSC_4]_{\lambda_3}$ obtendo-se a matriz de sensibilidade $[MSC_4]_{\lambda_2+\lambda_3}$ apresentada na equação (3.16).

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{G1} \\ \Delta Q_{G2} \\ \Delta Q_{G6} \\ \Delta Q_{G8} \\ \Delta Q_{G9} \\ \Delta Q_{G13} \\ \Delta t_{7-5} \\ \Delta t_{14-12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,85 & 0,47 & 0,00 & 0,00 & 0,38 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,79 & -0,41 & 0,00 & 0,00 & -0,38 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,00 \\ -1,60 & 0,79 & 0,00 & 200000,63 & -100000,22 & 0,05 & 0,75 & -100000,33 \\ 1,58 & -0,78 & 0,00 & -196154,10 & 100000,07 & -0,04 & -0,74 & 96153,94 \\ 0,01 & -0,01 & 0,00 & -3846,09 & -0,04 & -0,00 & -0,00 & 3846,14 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,08 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,05 \\ 0,22 & 0,18 & 0,00 & 56461,50 & 1,05 & 0,09 & 0,09 & -56462,54 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_{10} \\ \Delta V_{11} \\ \Delta V_{13} \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_{14} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Calculam-se novamente os índices de sensibilidade entre as grandezas controladoras (Q_{Gi} ou t_{i-j}) e as variáveis controladas V_i , porém, neste caso, ao invés de se utilizar a matriz $[MSC_4]_{\lambda_i}$ da equação (3.14) considera-se as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_1+\lambda_4}$ e $[MSC_4]_{\lambda_2+\lambda_3}$ apresentadas nas equações (3.15) e (3.16) respectivamente. Nas Tabelas 3.23 e 3.24 são apresentados os índices de sensibilidade dos dispositivos de controle correspondentes as matrizes $[MSC_4]_{\lambda_1+\lambda_4}$ e $[MSC_4]_{\lambda_2+\lambda_3}$, respectivamente.

Tabela 3.23 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle utilizando a Matriz

$[MSC_4]_{\lambda_1+\lambda_4}$

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_1+\lambda_4}$			
	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)
ΔQ_{G1}	100,00	100,00	-100,00	-100,00
ΔQ_{G2}	-99,02	-99,11	99,06	98,04
ΔQ_{G6}	-0,98	-0,89	0,94	1,96
ΔQ_{G8}	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G9}	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G13}	0,00	0,00	0,00	0,00
Δt_{7-5}	14,30	13,01	-13,74	-28,61
Δt_{14-12}	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 3.24 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de controle utilizando a matriz

$$[MSC_4]_{\lambda_2+\lambda_3}$$

Dispositivos de Controle	Índices de Sensibilidade obtidas das Matrizes $[MSC_4]_{\lambda_2+\lambda_3}$			
	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)	Y_{λ_1} (%)
ΔQ_{G1}	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G2}	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G6}	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G8}	-100,00	100,00	-100,00	100,00
ΔQ_{G9}	99,05	-98,08	96,15	-99,16
ΔQ_{G13}	0,95	-1,92	3,85	-0,84
Δt_{7-5}	0,00	0,00	0,00	0,00
Δt_{14-12}	-13,90	28,23	-56,46	12,27

Calcular-se novamente os índices de colinearidade. Na Tabela 3.25 apresenta-se o cálculo dos índices de colinearidade entre cada coluna da Tabela 3.20 e cada coluna da Tabela 3.23.

Tabela 3.25 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.23

Dispositivos de Controle	Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)							
	X_{λ_1}	Y_{λ_1}	X_{λ_2}	Y_{λ_2}	X_{λ_3}	Y_{λ_3}	X_{λ_4}	y_{λ_4}
ΔQ_{G1}	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	-100,00	-100,00	-100,00
ΔQ_{G2}	-99,00	-99,02	0,00	-99,11	0,00	99,06	98,00	98,04
ΔQ_{G6}	-0,98	-0,98	0,00	-0,89	0,00	0,94	1,96	1,96
ΔQ_{G8}	0,00	0,00	100,00	0,00	-100,00	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G9}	0,00	0,00	-98,00	0,00	96,20	0,00	0,00	0,00
ΔQ_{G13}	0,00	0,00	-1,93	0,00	3,85	0,00	0,00	0,00
Δt_{7-5}	14,30	14,30	0,00	13,01	0,00	-13,74	-28,60	-28,61
Δt_{14-12}	0,00	0,00	28,25	0,00	-56,50	0,00	0,00	0,00
Índice de Colinearidade	S- 1 VS. S-A1		S- 2 VS. S-A2		S- 3 VS. S-A3		S- 4 VS. S-A4	
	1,000		-0,002		-0,005		1,000	

Das colunas X_{λ_4} e Y_{λ_4} da Tabela 3.25 obtém-se um índice de colinearidade de 1,000, verificando assim que efetivamente o autovalor λ_4 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_1 , G_2 e LTC_{7-5} , da mesma forma que o autovalor λ_1 . Neste contexto, pode-se afirmar que os autovalores λ_1 e λ_4 oferecem informação alta sobre os acoplamentos dos mesmos dispositivos de

controle. Similarmente, na Tabela 3.26 apresenta-se o cálculo dos índices de colinearidade entre cada coluna da Tabela 3.20 e cada coluna da Tabela 3.24.

Tabela 3.26 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.24

Dispositivos de Controle	Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle (%)							
	X_{λ_1}	Y_{λ_1}	X_{λ_2}	Y_{λ_2}	X_{λ_3}	Y_{λ_3}	X_{λ_4}	Y_{λ_4}
ΔQ_{G1}	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	0,00
ΔQ_{G2}	-99,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,00	0,00
ΔQ_{G6}	-0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96	0,00
ΔQ_{G8}	0,00	-100,00	100,00	100,00	-100,00	-100,00	0,00	100,00
ΔQ_{G9}	0,00	99,05	-98,00	-98,08	96,20	96,15	0,00	-99,16
ΔQ_{G13}	0,00	0,95	-1,93	-1,92	3,85	3,85	0,00	-0,84
Δt_{7-5}	14,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-28,60	0,00
Δt_{14-12}	0,00	-13,90	28,25	28,23	-56,50	-56,46	0,00	12,27
Índice de Colinearidade	S- 1 VS. S-A1		S- 2 VS. S-A2		S- 3 VS. S-A3		S- 4 VS. S-A4	
	0,001		1,000		1,000		0,002	

Observando a Tabela 3.26, percebe-se que ao aplicar a equação (3.12) às colunas X_{λ_3} e Y_{λ_3} obtém-se um índice de colinearidade de 1,000, verificando assim, que efetivamente o autovalor λ_3 oferece informação alta sobre os acoplamentos que têm os dispositivos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} da mesma forma que o autovalor λ_2 . Neste contexto, podemos afirmar que os autovalores λ_2 e λ_3 oferecem informação alta sobre os acoplamentos dos mesmos dispositivos de controle.

Portanto, a partir destes resultados, pode-se comprovar que o método foi capaz de reconhecer os autovalores que oferecem a informação necessária sobre os conflitos dos dispositivos de controle. Neste caso, foram os autovalores λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_4 . Também, agrupou-se os autovalores λ_1 e λ_4 por conterem informações similares sobre os dispositivos de controle em conflito, neste caso de G_1 , G_2 e LTC_{7-5} , e também os autovalores λ_2 e λ_3 por conterem a mesma informação do conflito dos equipamentos de controle G_8 , G_9 e LTC_{14-12} .