



COPPE/UFRJ

UTILIZAÇÃO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES NO PROBLEMA DE
FLUXO DE POTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE DE
TENSÃO

Ricardo Mota Henriques

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE,
da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

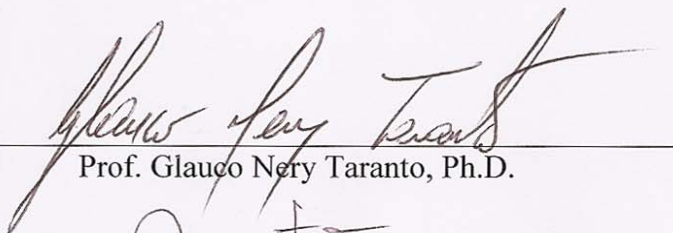
Rio de Janeiro
Setembro de 2009

UTILIZAÇÃO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES NO PROBLEMA DE
FLUXO DE POTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE DE
TENSÃO

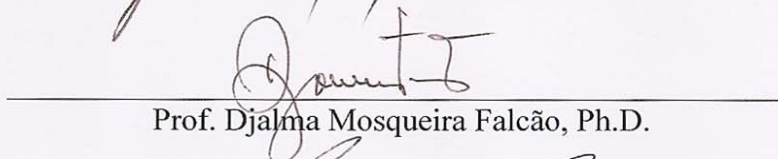
Ricardo Mota Henriques

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

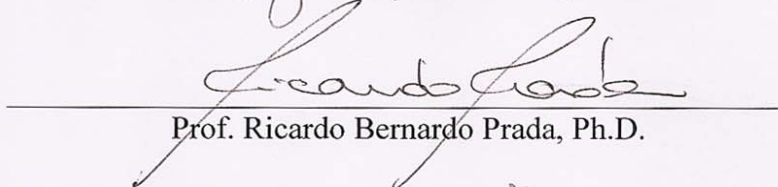
Aprovada por:



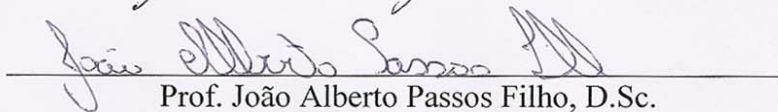
Prof. Glaucio Nery Taranto, Ph.D.



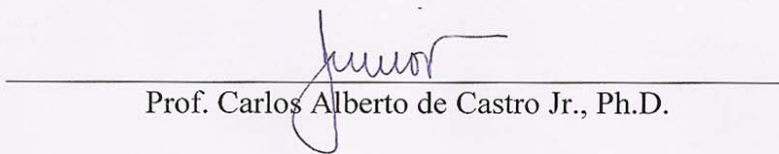
Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Prof. Ricardo Bernardo Prada, Ph.D.



Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.



Prof. Carlos Alberto de Castro Jr., Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Henriques, Ricardo Mota

Utilização de Autovalores e Autovetores no Problema de Fluxo de Potência para Determinação de Áreas de Controle de Tensão / Ricardo Mota Henriques. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVI, 172 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 166-172.

1. Áreas de controle de tensão. 2. Autovalores e autovetores. 3. Fluxo de potência. I. Taranto, Glauco Nery. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha esposa Karen e aos
meus filhos Bernardo e Henrique.
Vocês são a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, toda a minha gratidão e louvor a DEUS que, por Sua Graça, me fez vitorioso em mais esta etapa e mais do que vencedor na minha vida.

Ao Prof. Glauco Nery Taranto pela orientação e empenho fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Prof. João Alberto Passos Filho pelo incomensurável apoio técnico, motivação constante e solidariedade que foram indispensáveis para o desenvolvimento desta tese.

Ao CEPEL e, em especial, ao Departamento de Redes Elétricas (DRE) por viabilizar a execução deste trabalho.

Ao pesquisador do CEPEL Flávio Rodrigo de Miranda Alves pelo apoio e confiança que sempre depositou em mim.

Aos companheiros e pesquisadores do CEPEL Sérgio Gomes Junior, Sergio Luis Varricchio, Alex de Castro, Edmundo Pinto Neto e Leonardo Pinto Almeida por contribuir com suas experiências e seus comentários.

Aos amigos de vários anos Zulmar Soares Machado Jr., Júlio C. R. Ferraz, José de Alencar Silva, Luis Oscar de Araújo Porto Henriques, Paulo Eduardo Martins Quintão, Carlos Frederico Paresque Araújo e tantos outros que, de alguma forma, estiveram presentes com sua colaboração e amizade.

Em especial à minha esposa Karen e aos meus filhos Bernardo e Henrique pela paciência, incentivo, tolerância e pelo grande amor com que me cercaram durante este longo período de trabalho.

A todos os meus familiares pelo apoio direto e indireto, em especial aos meus pais Paulo (*in memoriam*) e Gilda, que são meus exemplos de vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UTILIZAÇÃO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE DE TENSÃO

Ricardo Mota Henriques

Setembro/2009

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

O controle de potência reativa em sistemas de potência ganhou maior atenção em virtude do crescimento das ocorrências relacionadas a fenômenos de instabilidade de tensão. Esquemas que permitam controlar o perfil de tensão em uma área podem contribuir para evitar este tipo de problema.

Identificar corretamente estas áreas de controle é fundamental para este tipo de esquema. Este trabalho propõe uma metodologia para identificar áreas de controle de tensão em sistemas de potência através dos autovalores de uma matriz de sensibilidade QV obtida a partir da matriz Jacobiana do fluxo de potência.

Os resultados obtidos através da metodologia proposta são comparados com os gerados pelo uso de uma análise de sensibilidade de tensão, realizada através da comparação das linhas da mesma matriz de sensibilidade QV utilizada na determinação das áreas a partir dos autovalores.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

VOLTAGE CONTROL AREAS DETERMINATION USING EINGENVALUES AND EINGENVECTORS IN THE POWER FLOW PROBLEM

Ricardo Mota Henriques

September/2009

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

Bulk power systems failures caused by voltage instability phenomena have become more frequent during the last years. Voltage control schemes capable of keeping voltage magnitude within specified limits for a specific area of the power system can prevent this problem.

The identification of potential voltage control areas of the power system is an essential part of voltage control scheme design. This thesis proposes a methodology to identify potential voltage control areas that uses eigenvalues evaluated from the QV matrix originated from the power flow Jacobian matrix.

Results obtained by the proposed methodology are compared with those generated by the use of conventional voltage sensitivity analysis, comparing rows of the same QV matrix originated from the power flow Jacobian matrix that was handled for eigenvalue calculation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 - Considerações Iniciais	1
I.2 - Motivação e Objetivos	2
I.3 - Estrutura do trabalho.....	5
I.4 - Publicações Decorrentes.....	6
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
II.1 - Considerações Iniciais.....	7
II.2 - Determinação de áreas para o CST	10
<i>II.2.1 - Conceito de Distância Elétrica</i>	<i>11</i>
<i>II.2.2 - Aplicação do Conceito de Distância Elétrica.....</i>	<i>17</i>
<i>II.2.3 - Determinação de Áreas pelo Conceito de Distância Elétrica</i>	<i>18</i>
II.2.3.1 - Algoritmo 1: Ascending Hierarchical Classification (AHC).....	18
II.2.3.2 - Algoritmo 2: Dynamic Scatter (DS).....	19
<i>II.2.4 - Determinação de Áreas pelo Conceito de Regiões de Coerência.....</i>	<i>20</i>
II.2.4.1 - Algoritmo 1: Collinear Vector Identification Method (CVI).....	21
II.2.4.2 - Algoritmo 2: Weak Branch Elimination (WBE).....	22
II.2.4.3 - Comparação entre os métodos CVI e WBE	23
II.3 - Autovalores, Autovetores e Fatores de Sensibilidade	24
<i>II.3.1 - Autopropriedades: Autovalores e Autovetores</i>	<i>25</i>
II.3.1.1 - Autovalores.....	26
II.3.1.2 - Autovetores.....	27
II.3.1.3 - Propriedades de Autovetores e Autovetores	28
II.3.1.4 - Propriedades do Mode-Shape.....	30
II.3.1.5 - Propriedades do Fator de Participação	31
<i>II.3.2 - Fatores de Sensibilidade e Autovalores</i>	<i>32</i>
II.3.2.1 - Nós Sensores: Análise da Matriz de Admitâncias	32
II.3.2.2 - Nós Sensores: Análise da Matriz Jacobiana.....	34

CAPÍTULO III - METODOLOGIA PROPOSTA.....	38
III.1 - Considerações Iniciais	38
III.2 - Formulação do Problema de Fluxo de Potência	39
<i>III.2.1 - Representação de Barras PV na Matriz Jacobiana.....</i>	<i>43</i>
III.3 - Áreas de Controle por Autovalores e Autovetores	44
<i>III.3.1 - Autovalores e Autovetores da Matriz J_{SQV}.....</i>	<i>47</i>
<i>III.3.2 - Avaliação das Áreas pelo Mode-Shape</i>	<i>51</i>
<i>III.3.3 - Estudo das Características da matriz J_{SQV}</i>	<i>55</i>
<i>III.3.4 - Seleção de Barras Piloto</i>	<i>58</i>
III.4 - Áreas de Controle pela Avaliação da Matriz J_{SQV}.....	59
<i>III.4.1 - Seleção de Barras Piloto</i>	<i>60</i>
III.5 - Análise de Sensibilidade de Tensão.....	61
CAPÍTULO IV - RESULTADOS	66
IV.1 - Considerações Iniciais	66
IV.2 - Sistema 10 barras.....	67
<i>IV.2.1 - Baixa impedância de interligação</i>	<i>68</i>
IV.2.1.1 - Áreas por sensibilidade	68
IV.2.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	71
IV.2.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	75
IV.2.1.4 - Barras piloto.....	75
<i>IV.2.2 - Alta impedância de interligação</i>	<i>76</i>
IV.2.2.1 - Áreas por sensibilidade	76
IV.2.2.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	78
IV.2.2.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	80
IV.2.2.4 - Barras piloto.....	80
IV.3 - Sistema 18 barras.....	81
<i>IV.3.1 - Baixa impedância de interligação</i>	<i>82</i>
IV.3.1.1 - Áreas por sensibilidade	82
IV.3.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	85
IV.3.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	88
IV.3.1.4 - Barras piloto.....	88
<i>IV.3.2 - Alta impedância de interligação</i>	<i>89</i>
IV.3.2.1 - Áreas por sensibilidade	89
IV.3.2.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	91
IV.3.2.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	94
IV.3.2.4 - Barras piloto.....	95

IV.4 - Sistema IEEE 14 barras	96
IV.4.1.1 - Áreas por sensibilidade	96
IV.4.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	99
IV.4.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	102
IV.4.1.4 - Barras piloto	103
IV.5 - Sistema <i>New England</i> 39 barras	103
IV.5.1.1 - Áreas por sensibilidade	104
IV.5.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	109
IV.5.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	113
IV.5.1.4 - Barras piloto	114
IV.6 - Sistema IEEE 118 barras	115
IV.6.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	116
IV.6.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	117
IV.6.1.3 - Comparação de resultados	119
IV.6.1.4 - Barras piloto	119
IV.6.1.5 - Estudo de desacoplamento entre as áreas	121
IV.7 - Sistema S/SE Brasileiro 730 barras.....	123
IV.7.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	124
IV.7.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	128
IV.7.1.3 - Barras piloto	132
IV.7.1.4 - Estudo de desacoplamento entre as áreas	134
IV.8 - Sistema S/SE/CO Brasileiro 2149 barras.....	138
IV.8.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}	138
IV.8.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}	144
IV.9 - Esforço computacional	151
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	152
V.1 - Considerações Finais	152
V.2 - Sugestões de Trabalhos Futuros.....	155
APÊNDICE A - REVISÃO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	156
A.1 - Considerações Iniciais	156
A.2 - Método de Newton-Rapshon	157
<i>A.2.1 - Aplicações das Equações do Fluxo de Potência</i>	<i>158</i>
APÊNDICE B - DADOS DOS SISTEMAS DE PEQUENO PORTE.....	162
B.1 - Sistema 10 barras.....	162
B.2 - Sistema 18 barras.....	162
B.3 - Sistema IEEE 14 barras	163
B.4 - Sistema <i>New England</i> 39 barras	164

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
---	------------

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Níveis hierárquicos do Controle Coordenado de Tensão</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 – Exemplo de circuito resistivo para o cálculo da distância elétrica</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3 – Áreas de controle de tensão obtidas com os algoritmos CVI e WBE.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4 – Mode-Shape da matriz J_{SQV} para o menor autovalor.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5 – Fluxograma simplificado da busca de áreas pelos menores autovalores.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6 – Sistema radial de 3 barras interligado somente por reatâncias</i>	<i>55</i>
<i>Figura 7 – Fluxograma simplificado da busca de áreas pelas linhas da inversa de J_{SQV}</i>	<i>60</i>
<i>Figura 8 – Sistema 10 barras.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 9 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 10 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 11 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 12 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 13 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 14 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} sistema 10 barras ($jX=0,01\%$)</i>	<i>75</i>
<i>Figura 15 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 16 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	<i>79</i>
<i>Figura 17 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	<i>80</i>
<i>Figura 18 – Sistema 18 barras.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 19 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	<i>84</i>
<i>Figura 20 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 21 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 22 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 23 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 24 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	<i>91</i>
<i>Figura 25 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$).....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 26 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 27 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 28 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 29 – Sistema IEEE 14 barras.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 30 – Áreas por sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras</i>	<i>98</i>
<i>Figura 31 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema IEEE 14 barras.....</i>	<i>100</i>

<i>Figura 32 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema IEEE 14 barras.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 33 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema IEEE 14 barras.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 34 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 14 barras.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 35 – Sistema New England.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 36 – Áreas por sensibilidade do Sistema New England.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 37 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema New England</i>	<i>110</i>
<i>Figura 38 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema New England</i>	<i>111</i>
<i>Figura 39 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema New England</i>	<i>111</i>
<i>Figura 40 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema New England.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 41 – Áreas pelas linhas da matriz J_{SQV} do Sistema New England.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 42 – Sistema IEEE 118 barras</i>	<i>115</i>
<i>Figura 43 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 118.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 44 – Áreas pelas linhas da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 118.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 45 – Comparação dos resultados de busca por áreas no Sistema IEEE 118</i>	<i>119</i>
<i>Figura 46 – Posição de barras piloto no Sistema IEEE 118</i>	<i>120</i>
<i>Figura 47 – Curva de Carga Aplicada ao Sistema IEEE 118</i>	<i>121</i>
<i>Figura 48 – Barras monitoradas na execução da curva de carga no Sistema IEEE 118.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 49 – Perfil de tensão das barras monitoradas na aplicação da curva de carga</i>	<i>123</i>
<i>Figura 50 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema S/SE 730 barras</i>	<i>127</i>
<i>Figura 51 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema 730 barras</i>	<i>132</i>
<i>Figura 52 – Região próxima a barra VITORIA-SIN no sistema 730 barras</i>	<i>133</i>
<i>Figura 53 – Região próxima a barra GRAJAU---2MQ no sistema 730 barras</i>	<i>134</i>
<i>Figura 54 – Localização de barras pilotos no sistema 730 barras</i>	<i>134</i>
<i>Figura 55 – Posição das barras monitoradas na execução da curva de carga no 730 barras</i>	<i>135</i>
<i>Figura 56 – FRJ para três dias de Fevereiro de 2005.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 57 – Cálculo do FRJ</i>	<i>136</i>
<i>Figura 58 – FRJ normalizado pelo máximo da curva</i>	<i>137</i>
<i>Figura 59 – Perfil de tensão das barras monitoradas na aplicação da curva de carga</i>	<i>137</i>
<i>Figura 60 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras ...</i>	<i>143</i>
<i>Figura 61 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras</i>	<i>150</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	69
<i>Tabela 2 – Faixas e cores para os valores de α</i>	69
<i>Tabela 3 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	70
<i>Tabela 4 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	71
<i>Tabela 5 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	72
<i>Tabela 6 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	76
<i>Tabela 7 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	77
<i>Tabela 8 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	77
<i>Tabela 9 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	78
<i>Tabela 10 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	79
<i>Tabela 11 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	81
<i>Tabela 12 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	83
<i>Tabela 13 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	84
<i>Tabela 14 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	84
<i>Tabela 15 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	85
<i>Tabela 16 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	88
<i>Tabela 17 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)</i>	89
<i>Tabela 18 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	89
<i>Tabela 19 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	90
<i>Tabela 20 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	91
<i>Tabela 21 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	92
<i>Tabela 22 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)</i>	95
<i>Tabela 23 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)</i>	95
<i>Tabela 24 – Características principais do sistema IEEE 14 barras</i>	96
<i>Tabela 25 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras</i>	97
<i>Tabela 26 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras</i>	97
<i>Tabela 27 – Áreas por sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras</i>	99
<i>Tabela 28 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 14 barras</i>	99
<i>Tabela 29 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 14 barras</i>	102
<i>Tabela 30 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 14 barras</i>	103
<i>Tabela 31 – Barras piloto do sistema IEEE 14 barras</i>	103
<i>Tabela 32 – Características principais do Sistema New England</i>	104

<i>Tabela 33 – Análise de Sensibilidade do Sistema New England.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 34 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema New England</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 35 – Áreas por sensibilidade do Sistema New England.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 36 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema New England.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 37 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema New England.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 38 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema New England.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 39 – Barras piloto do sistema New England.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 40 – Características principais do sistema IEEE 118 barras.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 41 – Áreas identificadas pelos menores autovalores no Sistema IEEE 118.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 42 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 118.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 43 – Barras e áreas identificadas pelos menores autovalores no Sistema IEEE 118... </i>	<i>116</i>
<i>Tabela 44 – Áreas identificadas pela matriz J_{SQV} no Sistema IEEE 118</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 45 – Barras e áreas identificadas pela matriz J_{SQV} no Sistema IEEE 118.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 46 – Barras piloto do sistema IEEE 118.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 47 – Características principais do sistema S/SE brasileiro 730 barras</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 48 – Autovalores da matriz J_{SQV} do S/SE brasileiro 730 barras</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema 730 barras</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 51 – Barras piloto do sistema 730 barras.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabela 52 – Características principais do sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras</i>	<i>138</i>
<i>Tabela 53 – Autovalores da matriz J_{SQV} do S/SE/CO brasileiro 2149 barras</i>	<i>139</i>
<i>Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras ...</i>	<i>139</i>
<i>Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras</i>	<i>144</i>
<i>Tabela 56 – Esforço computacional.....</i>	<i>151</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

AHC:	<i>Ascending Hierarchical Classification</i>
CCT:	Controle Coordenado de Tensão
CPT:	Controle Primário de Tensão
CRT:	Controle Remoto de Tensão
CST:	Controle Secundário de Tensão.
CTT:	Controle Terciário de Tensão
CVI:	<i>Collinear Vector Identification</i>
DS:	<i>Dynamic Scatter</i>
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
JVC:	<i>Joint Voltage Control</i>
LTC:	<i>Load Tap Changer</i>
RAT:	Regulador Automático de Tensão
SEP:	Sistema Elétrico de Potência.
WBE:	<i>Weak Branch Elimination</i>

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 - Considerações Iniciais

Nas últimas décadas, a importância do controle de potência reativa cresceu de forma expressiva em função do aumento das ocorrências relacionadas aos problemas de instabilidade de tensão nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) de grande porte ao redor de todo mundo. Estes problemas são frutos de um uso mais intensivo do sistema de transmissão, tendo em vista questões como a redução de custos e o crescimento expressivo da demanda por energia. Outros pontos como o aumento da confiabilidade dos sistemas, melhor aproveitamento energético, qualidade do serviço de fornecimento de energia e abertura de mercados também contribuíram para levar o sistema de transmissão para uma operação bem mais próxima de seus limites [1].

Esquemas capazes de controlar o perfil de tensão em uma determinada área do sistema, de forma automática, podem contribuir de forma significativa tanto para a segurança quanto para a qualidade da operação [2].

Vários incidentes relacionados à instabilidade de tensão ocorreram em todo mundo, sendo que alguns resultaram em colapso [3]. Assim, uma melhor coordenação da ação de fontes de potência reativa pode oferecer alternativas para se prevenir este fenômeno.

Neste contexto de segurança de tensão, se há uma barra cuja tensão represente e influencie o comportamento de uma determinada área do sistema sensível ao problema da instabilidade no sistema, e esta barra possa ter a sua tensão controlada, mesmo que ocorra uma contingência, as tensões desta área sensível tenderão a retornar para seu valor aceitável. Para isto a geração de potência reativa é utilizada de forma a conservar o perfil de tensão da área, o que resulta

em um maior valor de margem de carregamento em relação ao ponto de colapso de tensão [4], aumentando-se assim a segurança operativa desta porção do sistema sob o enfoque da segurança de tensão.

Na década de 80 uma arquitetura de controle de tensão coordenado em três níveis baseado nos conceitos de divisão de áreas e barras piloto foi implementado na França. Foi então criado o chamado Controle Secundário de Tensão (CST) [5,6,7,8,9,10] que regula o perfil de tensão de uma área do sistema através do controle da tensão de uma barra chave, denominada barra piloto. Para a aplicação do CST, pressupõe-se a possibilidade de se fazer à divisão do sistema em áreas de controle, de tal forma que estas áreas estejam satisfatoriamente desacopladas em termos da influência do controle de tensão das vizinhas. Os controles em uma determinada área devem ter pouca influência nos controles das áreas vizinhas e vice-versa. A premissa teórica do CST é que o controle de tensão é predominantemente um problema local. Após a divisão das áreas determinadas em um estudo de simulação da rede, é desenvolvido o controle para o CST e a divisão de áreas obtida é então mantida.

Assim, para que se possa aplicar o CST, é necessária uma metodologia que seja capaz de identificar, de maneira consistente e automática, quais são as áreas de controle de tensão existentes no SEP e quais são as fontes de potência reativa que tem influência sobre esta porção do sistema. Somente depois de identificadas as áreas de controle de tensão, é possível selecionar as barras piloto.

I.2 - Motivação e Objetivos

A implantação e operação de esquemas de CST parte da premissa que o sistema pode ser dividido em áreas de controle, de tal forma que estas áreas estejam satisfatoriamente desacopladas de suas áreas vizinhas, ou seja, controle existente em uma área tem pouca ou nenhuma influência nos controles existentes nas áreas vizinhas sobre uma determinada área. A divisão do SEP

em áreas de controle distintas, se bem sucedida, permite uma otimização do perfil de tensão em todo sistema.

Diferentes métodos foram propostos para o problema de determinação de áreas de controle, sendo que alguns foram implementados e efetivamente utilizados em sistemas reais [5,6,11,12]. Boa parte destes métodos é baseada no uso da sensibilidade QV obtida a partir da montagem da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência [13,14]. Estas sensibilidades permitem determinar as áreas ou regiões coerentes de um determinado SEP, conforme realizado em [15].

Dada uma injeção de potência reativa em uma determinada barra, é possível observar o alcance de seu efeito a partir dos fatores de sensibilidade QV da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência. Se esta injeção de potência reativa for realizada em todas as barras e guardados os fatores de sensibilidade QV , é possível determinar regiões do sistema onde as barras possuem comportamento similar a partir da semelhança entre os fatores de sensibilidade.

Algoritmos baseados nos fatores de sensibilidade foram criados e utilizados na determinação de áreas, sendo que na determinação do número ótimo de áreas e seus respectivos limites fez-se necessário a combinação de diferentes algoritmos e o uso da experiência dos engenheiros para a obtenção de um resultado satisfatório, tanto maior e mais malhado era o sistema [16].

Para a avaliação de fenômenos relacionados ao problema de instabilidade de tensão de longo termo, o uso da álgebra linear no estudo da relação entre o menor autovalor da matriz reduzida QV , obtida a partir da matriz Jacobiana, e as tensões nodais, traz importantes informações acerca dos pontos críticos e a proximidade do ponto de colapso. A observação dos autovetores correspondentes ao menor autovalor da matriz reduzida QV destaca quais são as barras mais sensíveis ao colapso e, conseqüentemente, possíveis pontos para instalação de equipamentos de suporte de potência reativa [5,6].

Pode-se notar que há um ponto em comum entre os métodos de determinação de áreas e os métodos de avaliação dos fenômenos de instabilidade de tensão através da análise de autovalores da matriz de sensibilidades QV obtida a partir da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência. Se a análise de

sensibilidade e a análise das autopropriedades são feitas a partir de uma mesma matriz, é possível que a mesma análise de sensibilidade possa ser obtida através dos autovalores e autovetores. Se os autovalores e autovetores possuem as informações sobre a sensibilidade, as áreas de controle poderiam ser obtidas a partir deles.

Baseado nestas considerações, o objetivo principal deste trabalho é investigar o uso de autovalores e autovetores da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência na identificação de áreas de controle de tensão em SEP. As áreas de controle de tensão são formadas a partir da determinação do conjunto de barras que são influenciadas pelo mesmo grupo de equipamentos de controle de tensão (geradores, compensadores síncronos, etc).

Outro aspecto importante relacionado à identificação de áreas é que a entrada em operação de novos equipamentos para reforço no sistema ao longo do tempo pode gerar alterações nas áreas obtidas em uma configuração já ultrapassada. Logo é desejável que a metodologia para a identificação de áreas seja computacionalmente eficiente e seja capaz de detectar com eficácia os reflexos das mudanças no sistema em cada área de controle.

Os resultados obtidos com a metodologia proposta a partir da análise dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência precisam ser confirmados a partir de uma segunda análise, baseado na avaliação dos fatores de sensibilidade de tensão em todo o sistema. Neste sentido foi aplicada paralelamente a análise dos autovalores e autovetores a avaliação de áreas de controle de tensão a partir dos fatores de sensibilidade da matriz QV obtida a partir da matriz Jacobiana. As áreas de controle de tensão formadas levam em consideração as barras cujos fatores de sensibilidade são semelhantes. Desta forma é possível estabelecer uma validação dos resultados obtidos através da análise de autovalores e autovetores.

Paralelamente à questão principal relacionada à obtenção das áreas de controle, será investigada dentro de cada um dos métodos de determinação de áreas de controle as possíveis sugestões para o posicionamento de barras piloto a partir das informações existentes para a determinação de áreas de controle.

A implementação dos métodos de obtenção de áreas de controle de tensão tanto por autovalores quanto por fatores de sensibilidade foi feita no ambiente MatLab, a partir da matriz Jacobiana exportado do pacote computacional ANAREDE (Programa de Análise de Redes), desenvolvido pelo CEPEL (Grupo ELETROBRAS).

I.3 - Estrutura do trabalho

Este documento está dividido em cinco capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro, e mais dois Apêndices.

No Capítulo II é feita uma revisão bibliográfica de métodos de determinação de áreas de controle de tensão baseados nas relações de sensibilidade de matriz Jacobiana. Em seguida, é realizada uma revisão dos conceitos de sensibilidade e análise de autopropriedades na matriz Jacobiana de fluxo de potência, identificando a ligação existente entre as metodologias, através da relação das variáveis de estado com os autovalores e seus autovetores.

No Capítulo III é proposta uma metodologia para o uso da análise dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana QV reduzida, buscando a identificação de áreas de controle de tensão existentes no sistema. É proposta também a metodologia alternativa para obtenção das áreas de controle a partir dos fatores de sensibilidade da matriz Jacobiana QV reduzida. Também neste capítulo há uma breve revisão da análise de sensibilidade de tensão, que também será usada como metodologia auxiliar para a determinação das áreas de controle de tensão dos sistemas de pequeno porte utilizados.

No Capítulo IV são apresentados os resultados da aplicação das metodologias propostas no Capítulo III em sistemas de pequeno porte (10 barras, 18 barras, IEEE 14 e *New England*), médio porte (IEEE 118 barras) e grande porte (Brasileiro S/SE 730 barras, Brasileiro S/SE/CO 2149 barras).

Por último o Capítulo V traz as conclusões finais do trabalho e algumas perspectivas de uso das metodologias propostas.

O Apêndice A apresenta uma breve revisão do método de Newton-Raphson aplicado ao problema de fluxo de potência. Este Apêndice serve de fonte de consulta aos aspectos relacionados à solução do problema de fluxo de potência.

No Apêndice B estão os dados dos sistemas de pequeno porte utilizados. Todos os dados estão no formato do Programa de Análise de Redes – ANAREDE, de propriedade do CEPEL.

I.4 - Publicações Decorrentes

- UTILIZAÇÃO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE DE TENSÃO, submetido à revista da SBA.
- USING EIGENVALUES AND EIGENVECTORS IN POWER FLOW STUDIES FOR IDENTIFICATION OF VOLTAGE CONTROL AREAS, publicado nos anais do XI SEPOPE em 2009.
- UTILIZAÇÃO DE AUTOVALORES E AUTOVETORES NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE CONTROLE, publicados nos anais do XVII CBA em 2008.

CAPÍTULO II -

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Considerações Iniciais

Em países europeus, diversas empresas de energia adotaram esquemas para manutenção do perfil de tensão em áreas vitais de seus sistemas, levando-se em consideração diversos cenários de carregamento [16,17,18]. Inicialmente estes esquemas se valiam apenas da habilidade e experiência dos operadores, porém, com o aumento do grau de automação dos sistemas de controle de potência reativa, o controle do perfil de tensão atingiu um maior grau de efetividade, contribuindo de forma significativa para a melhoria da segurança e qualidade nos SEP. Estes esquemas estão hoje em operação em países como França e Itália, conforme descrito em [5,6].

Recentemente na China foram desenvolvidos e aplicados em campo controles automáticos de tensão de malha fechada. Sua arquitetura baseia-se em uma divisão do sistema em áreas adaptáveis as modificações no sistema, dado o rápido crescimento e desenvolvimento das redes chinesas, e os novos requisitos de segurança e desempenho requeridos. Este controles estão aplicados em mais de doze centros de controle na China [11].

Para a melhoria da qualidade dos perfis de tensão em áreas vitais de um SEP, pode-se então recorrer ao chamado Controle Secundário de Tensão (CST). Para a correta compreensão da finalidade do CST, é necessário destacar as definições a seguir:

- O termo “instabilidade de tensão” é usado para descrever um evento onde um distúrbio ou aumento de demanda em um SEP causa a queda incontrolável e progressiva dos níveis de tensão nas suas barras;

- Um SEP sofre um “colapso de tensão” se uma sequência de eventos acompanhados por uma instabilidade de tensão leva os níveis de tensão das barras a valores abaixo de limites aceitáveis.

O CST faz parte de um conjunto de medidas que visam evitar o problema de colapso de tensão, que pode estar relacionado aos controles de tensão com atuação lenta, como transformadores LTC (*Load Tap Changer*) [3,19,20]. Conceitualmente, o CST é um dos níveis hierárquicos do chamado Controle Coordenado de Tensão (CCT), que define os papéis de cada tipo de controle de tensão segundo o seu tempo de atuação.

Basicamente, o CCT possui três níveis hierárquicos, a saber: Controle Primário de Tensão (CPT), Controle Secundário de Tensão (CST) e Controle Terciário de Tensão (CTT). O CPT é mais rápido que o CST e o CST, por sua vez, é mais rápido que o CTT, conforme ilustra a Figura 1.

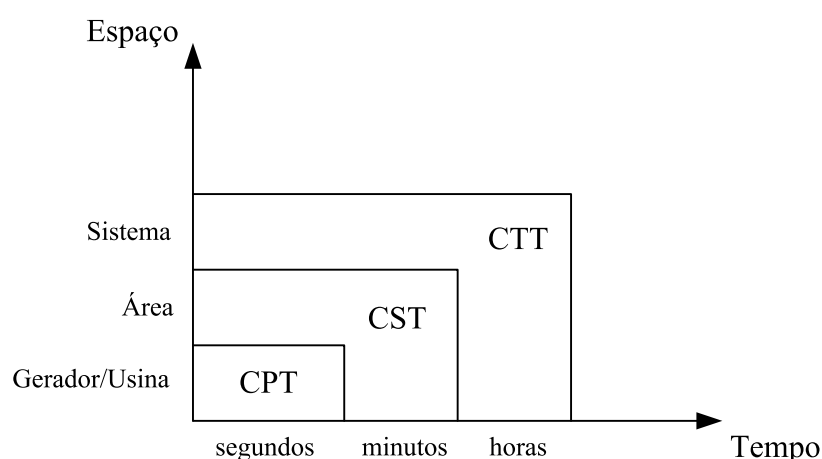


Figura 1 – Níveis hierárquicos do Controle Coordenado de Tensão

A seguir estão descritos de forma sucinta o papel exercido por cada nível do CCT:

- O CPT é subdividido em controle do gerador e controle da usina. O controle do gerador consiste, basicamente, da atuação do regulador automático de tensão (RAT). Este tipo de regulador tenta manter a tensão terminal do gerador igual ao valor de referência definido pelos operadores do sistema, ou por controladores de nível mais elevado. O controle da usina, geralmente conhecido como Controle Conjunto de

Tensão (JVC – *Joint Voltage Control*) [21], tem como objetivo manter o lado de alta tensão do transformador elevador em valores desejados, evitando assim circulação de potência reativa entre os geradores da usina.

- O CST consiste de uma malha mais externa de controle que regula a tensão do lado da transmissão, através das barras piloto, o qual é feito através do ajuste das tensões de referência do RAT, compensadores síncronos ou estáticos, transformadores de tap variável, etc.
- O CTT tem o objetivo, dentre outros, de otimizar e coordenar os valores das tensões de referência das barras piloto. O CTT pode assegurar, de forma preventiva, a integridade e segurança do sistema. Em [22] é sugerido o uso do fluxo de potência ótimo para esse propósito.

Focando novamente no CST, sabe-se que a escolha da barra piloto deve ser feita de forma criteriosa. Ela deve ser uma barra que represente de forma consistente o comportamento do perfil de tensão em seu entorno. Entretanto, a determinação de qual barra será a barra piloto não é trivial. A área na qual será implantada o CST deve ser analisada cuidadosamente, utilizando tanto a experiência de técnicos que conheçam bem o comportamento do perfil de tensão da área, bem como a utilização de ferramentas computacionais. Um programa de fluxo de potência ótimo pode ser utilizado. As funções objetivo podem ser minimização das perdas, melhor utilização das reservas de potência reativa disponíveis, minimização do número de chaveamento de bancos de capacitores e reatores, dentre outras.

Como o CST irá coordenar a ação de diferentes grupos de geradores em nível regional, a operação do seu esquema de controle pressupõe que o SEP pode ser dividido em áreas de controle de tensão suficientemente desacopladas das demais áreas. Em cada uma destas áreas há uma barra piloto que representa apropriadamente o comportamento das tensões das barras que compõe a área coordenada pelo CST.

Concentrando-se especificamente neste contexto de como dividir um SEP em áreas de controle de tensão para a implantação do CST, a primeira parte desta revisão bibliográfica se destina a abordar quais são as metodologias existentes

na literatura para a determinação de áreas de controle de tensão e que conceitos estas metodologias utilizam.

Em seguida, na segunda parte da revisão bibliográfica, são revistos os conceitos de autovalores e autovetores, sua utilização nas matrizes Admitância e Jacobiana do problema de fluxo de potência, tendo em vista a questão da divisão em áreas de controle de tensão do SEP. Nesta parte da revisão, será estabelecida a relação entre os fatores de sensibilidade e os autovalores e autovetores da matriz Jacobiana, relação que é fundamental para a compreensão da metodologia proposta neste trabalho. Esta relação está descrita em [23] para a detecção de barras ou nós sensores visando à melhoria do processo de estimação de estados.

II.2 - Determinação de áreas para o CST

A divisão do sistema em áreas de controle de tensão tem validade se forem observadas as seguintes premissas básicas:

- Mudanças efetuadas na tensão da barra piloto devem se refletir em mudanças coerentes nas demais barras da área.
- É preciso existir fontes de potência reativa na área com capacidade suficiente para promover as mudanças na tensão.
- Haver o desacoplamento adequado do controle de tensão de uma área em relação às suas áreas vizinhas.

Seguindo essas premissas, são apresentadas a seguir metodologias que permitem obter estas áreas. A primeira metodologia parte do conceito de distância elétrica entre os nós do sistema e, uma vez determinadas todas estas distâncias, os nós são agrupados segundo características comuns entre eles. A segunda e a terceira metodologias apresentadas utilizam o conceito de coerência entre nós baseado nos elementos da matriz Jacobiana, sendo que um método faz o produto escalar entre as linhas da matriz Jacobiana e outro faz o agrupamento de nós a partir da retirada dos chamados ramos fracos.

II.2.1 - Conceito de Distância Elétrica

Como descrito em [16], o ponto de partida para obtenção das áreas elétricas consiste em quantificar a proximidade elétrica entre dois nós quaisquer do sistema. Para isto, utiliza-se a análise de sensibilidade dada a partir dos elementos da matriz Jacobiana tradicional [14] do problema de fluxo de potência ou da matriz admitância, lembrando que para este tipo de análise considera-se que são realizadas apenas pequenas perturbações em torno de um ponto de equilíbrio.

A matriz Jacobiana J_{ac} de um sistema é representada através da expressão (2.1)

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = J_{ac} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & H_{ii} & H_{ij} & H_{ik} & \cdots & \cdots & N_{ii} & N_{ij} & N_{ik} & \cdots \\ \cdots & H_{ji} & H_{jj} & H_{jk} & \cdots & \cdots & N_{ji} & N_{jj} & N_{jk} & \cdots \\ \cdots & H_{ki} & H_{kj} & H_{kk} & \cdots & \cdots & N_{ki} & N_{kj} & N_{kk} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & J_{ii} & J_{ij} & J_{ik} & \cdots & \cdots & L_{ii} & L_{ij} & L_{ik} & \cdots \\ \cdots & J_{ji} & J_{jj} & J_{jk} & \cdots & \cdots & L_{ji} & L_{jj} & L_{jk} & \cdots \\ \cdots & J_{ki} & J_{kj} & J_{kk} & \cdots & \cdots & L_{ki} & L_{kj} & L_{kk} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

A expressão em (2.1) pode ser simplificada e escrita da forma descrita em (2.2).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J_{ac} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

As submatrizes H , N , J e L de J_{ac} representam as seguintes derivadas:

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (2.3)$$

$$N = \frac{\partial P}{\partial V} \quad (2.4)$$

$$J = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad (2.5)$$

$$L = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2.6)$$

A matriz J_{ac}^{-1} , proveniente da inversão de J_{ac} , é representada através da expressão em (2.7).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta\theta_i \\ \Delta\theta_j \\ \Delta\theta_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta V_k \\ \vdots \end{bmatrix} = J_{ac}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ \vdots \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & h_{ii} & h_{ij} & h_{ik} & \cdots & \cdots & n_{ii} & n_{ij} & n_{ik} & \cdots \\ \cdots & h_{ji} & h_{jj} & h_{jk} & \cdots & \cdots & n_{ji} & n_{jj} & n_{jk} & \cdots \\ \cdots & h_{ki} & h_{kj} & h_{kk} & \cdots & \cdots & n_{ki} & n_{kj} & n_{kk} & \cdots \\ \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A expressão em (2.7) pode ser simplificada e escrita da forma descrita em (2.8).

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J_{ac}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} h & n \\ \hline j & l \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A matriz de admitâncias Y_{bus} de um sistema pode ser construída a partir das equações (2.9) e (2.10) em sua forma geral, segundo está em [24].

$$Y_{km} = -a_{km} e^{-j\phi_{km}} y_{km} \quad (2.9)$$

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km}) \quad (2.10)$$

Uma vez que as matrizes J_{ac} e Y_{bus} representam uma relação linear entre as variáveis nodais da rede, estas variáveis referentes a uma rede elétrica malhada podem ser relacionadas através das equações matriciais (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14).

$$\Delta \dot{I} = \dot{Y}_{bus} \cdot \Delta \dot{V} \quad (2.11)$$

$$\Delta \dot{V} = \dot{Z}_{bus} \cdot \Delta \dot{I} \quad (2.12)$$

$$\Delta Q = L \cdot \Delta V \quad (2.13)$$

$$\Delta V = l \cdot \Delta Q \quad (2.14)$$

A matriz Y_{bus} é a matriz de admitâncias e a matriz Z_{bus} é a matriz de impedâncias. Uma matriz é o inverso da outra, ambas complexas e simétricas. A matriz L é parte da matriz Jacobiana J_{ac} , conforme está em (2.2). A matriz l é parte da matriz J_{ac}^{-1} , proveniente da inversão da matriz Jacobiana J_{ac} do método de Newton-Raphson [14], e é chamada matriz de sensibilidade VQ . As matrizes L e l são reais e não simétricas. As matrizes Y_{bus} e L são matrizes esparsas cujos elementos não nulos correspondem aos circuitos que conectam as subestações, representadas no problema através de nós ou barras. As matrizes Z_{bus} e l são matrizes cheias e seus elementos refletem a propagação das variações de tensão em função de uma injeção de corrente ou potência reativa em um dado nó do sistema. Para utilização de (2.13) e (2.14), considera-se o desacoplamento $P\theta-QV$.

As matrizes Z_{bus} e l poderiam ser utilizadas para quantificar a proximidade entre nós sob o ponto de vista da tensão [16]. A magnitude do acoplamento entre dois nós de um SEP pode ser refletida e quantificada através atenuação máxima da variação de tensão entre estes nós. Esta atenuação pode ser facilmente obtida a partir da matriz l , bastando apenas dividir o elemento de cada uma de suas colunas pelo termo da diagonal.

De (2.7), pode-se destacar a submatriz l , de acordo com o que está em (2.15).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta V_k \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & l_{ii} & l_{ij} & l_{ik} & \cdots \\ \cdots & l_{ji} & l_{jj} & l_{jk} & \cdots \\ \cdots & l_{ki} & l_{kj} & l_{kk} & \cdots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ \vdots \end{bmatrix} = l \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta Q_k \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

O elemento l_{ii} representa a sensibilidade de tensão da barra i em relação a uma injeção de potência reativa feita na própria barra i . O elemento l_{ji}

representa a sensibilidade de tensão da barra j em relação a uma injeção de potência reativa feita na barra i . Se os elementos l_{ji} e l_{ii} forem divididos um pelo outro respectivamente, é possível estimar o quanto a variação de tensão na barra i se atenuou ao chegar à barra j , dada uma injeção de potência reativa na barra i . Se todos os elementos da coluna referente à barra i em l forem divididos pelo elemento l_{ii} , será determinada a atenuação da tensão em todas as barras em relação a uma injeção de potência reativa na barra i .

A matriz de atenuação entre todos os nós do sistema, cujos termos são α_{ji} pode ser obtida pelas equações (2.16) e (2.17).

$$\Delta V_j = \alpha_{ji} \Delta V_i \quad (2.16)$$

$$\alpha_{ji} = \frac{l_{ji}}{l_{ii}} \quad (2.17)$$

Assim, a matriz de atenuação é dada pela expressão em (2.18).

$$\alpha = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & 1 & \alpha_{ij} & \alpha_{ik} & \cdots \\ \cdots & \alpha_{ji} & 1 & \alpha_{jk} & \cdots \\ \cdots & \alpha_{ki} & \alpha_{kj} & 1 & \cdots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Para a aplicação eficiente e simples do conceito de atenuação em um algoritmo de determinação de áreas, é necessário definir uma estrutura matemática de distância entre todos os nós com base neste conceito. A partir do exemplo na Figura 2, composto de um circuito puramente resistivo, de resistências R e $2R$, pode-se calcular a atenuação de tensão entre os pontos i , j , k e m . Dado uma variação de tensão ΔV em i , será mostrado que, para o cálculo da atenuação de tensão nos pontos j e k , é necessário efetuar o produto das atenuações α_{ji} e α_{kj} para se obter a atenuação α_{ki} .

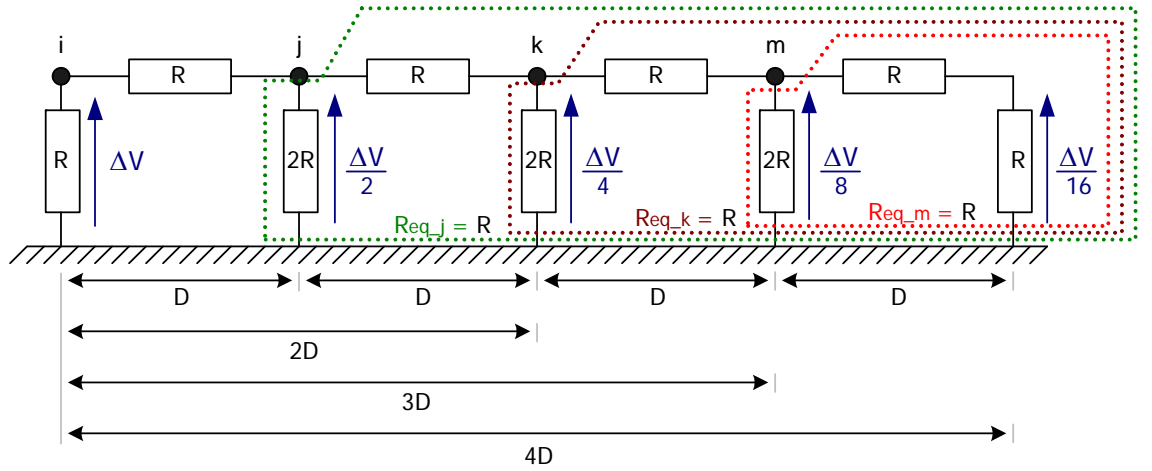


Figura 2 – Exemplo de circuito resistivo para o cálculo da distância elétrica

O circuito da Figura 2 traz uma variação de tensão entre o ponto i e a terra. Para obtermos a variação de tensão entre o ponto j e a terra referente à variação de tensão no ponto i , é necessário calcular a resistência equivalente entre o ponto j e a terra. Esta resistência equivalente pode ser calculada a partir do laço mais à direita do circuito, que está marcado pela linha pontilhada vermelha, que representa a resistência equivalente Req_m entre o ponto m e a terra, cujo valor será o paralelo entre $(R+R)$ e $2R$, que é igual a R . Em seguida, calcula-se a resistência equivalente Req_k entre o ponto k e a terra, cujo valor é paralelo entre $(R+Req_m)$ e $2R$, que é igual a R , segundo está marcado na linha pontilhada marrom. Por último, calcula-se a resistência equivalente Req_j entre o ponto j e a terra, cujo valor é paralelo entre $(R+Req_k)$ e $2R$, que também é igual a R . Logo, as resistências equivalentes Req_m, Req_k e Req_j são todas iguais a R . Pode-se notar que a variação de tensão entre o ponto j e a terra será dada por um divisor de tensão entre R e Req_j , sendo Req_j igual a R . Assim, a variação de tensão entre o ponto j e a terra será a metade da variação de tensão entre o ponto i e a terra. Este raciocínio aplicado para a obtenção da variação de tensão entre o ponto j e a terra pode ser aplicado aos demais pontos, uma vez os circuitos equivalentes são sempre iguais a R , gerando um divisor de tensão com duas resistências iguais. Assim, a variação de tensão no ponto k será sempre a metade da variação em j e a tensão no ponto m será a metade da variação em k .

Desta forma, a atenuação entre os pontos $i-j$ e $j-k$ na Figura 2 é calculada respectivamente em (2.19) e (2.20):

$$\alpha_{ji} = \frac{l_{ji}}{l_{ii}} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} = \frac{\frac{\Delta V}{2}}{\Delta V} = \frac{1}{2} \quad (2.19)$$

$$\alpha_{ki} = \frac{l_{kj}}{l_{jj}} = \frac{\Delta V_k}{\Delta V_j} = \frac{\frac{\Delta V}{4}}{\frac{\Delta V}{2}} = \frac{1}{2} \quad (2.20)$$

A partir de (2.19) e (2.20), pode-se obter a atenuação entre os nós $i-k$ através da equação em (2.21) ou (2.22).

$$\alpha_{ki} = \frac{l_{ki}}{l_{ii}} = \frac{\Delta V_k}{\Delta V_i} = \frac{\alpha_{kj} \Delta V_j}{\Delta V_i} = \frac{\alpha_{kj} \alpha_{ji} \Delta V_i}{\Delta V_i} = \alpha_{kj} \alpha_{ji} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \quad (2.21)$$

$$\alpha_{kj} \alpha_{ji} = \frac{\Delta V_k}{\Delta V_j} \cdot \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} = \frac{\Delta V_k}{\Delta V_i} = \frac{\frac{\Delta V}{4}}{\frac{\Delta V}{2}} = \frac{1}{2} = \alpha_{ki} \quad (2.22)$$

Para substituir o produto das atenuações em (2.21) por uma soma, é possível tomar o logaritmo da atenuação como sendo a definição de distância entre dois nós do sistema, de acordo com a equação (2.23).

$$D_{ki} = -\log(\alpha_{ki}) = -\log(\alpha_{kj} \cdot \alpha_{ji}) = -\log(\alpha_{kj}) - \log(\alpha_{ji}) = D_{kj} + D_{ji} \quad (2.23)$$

As distâncias D da Figura 2 representam o conceito de distância elétrica aplicada aos pontos i , j , k e m . Como as atenuações entre estes pontos são iguais, as distâncias entre os pontos também serão iguais.

Na formação da matriz L , os elementos diagonais já são diferentes entre si, em função da conectividade de cada nó (vide Apêndice A). Logo, na montagem da matriz de atenuações em (2.18), os elementos α_{ij} e α_{ji} não serão idênticos. Para que se tenham distâncias simétricas entre dois nós, é proposta a formulação em (2.24), que é então tomada como sendo o conceito final de distância elétrica entre dois nós quaisquer i e j do sistema elétrico.

$$D_{ij} = D_{ji} = -\log(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (2.24)$$

O uso correto deste conceito de distância elétrica parte de algumas premissas importantes. A primeira diz que o sistema não pode possuir circuitos 100% compensados e a segunda é considerar o desacoplamento dos problemas ativo-reativo do problema de fluxo de potência da rede em estudo, conforme descrito em [16]. No caso do desacoplamento ativo-reativo não ser válido, é sugerido o uso de outra matriz de sensibilidades VQ , de acordo com [25].

II.2.2 - Aplicação do Conceito de Distância Elétrica

Se há uma variação de tensão em um nó do sistema, é possível estimar as variações de tensão em todos os outros nós do sistema que estejam próximos o bastante do nó em questão, a partir do conceito de distância elétrica visto anteriormente. Logo, é possível construir um conceito de observabilidade estrutural por proximidade [26], isto é, a distância elétrica fornece uma medida da influência da variação de tensão em um determinado nó, que não possua controle de tensão, sobre os seus nós vizinhos.

O controle de tensão em nós que representam barras PV no sistema tem ação restrita em função dos seus limites e do alcance de sua influência. A tensão de nós que estão eletricamente distantes de um determinado nó de tensão controlada não recebem sua influência. Logo, estes nós, que representam barras PV , têm influência somente nas proximidades de sua vizinhança. A partir desta avaliação, cria-se o conceito de controlabilidade estrutural por proximidade [26], que fornece uma medida do alcance da influência do controle de tensão de uma barra PV em relação aos demais nós do sistema, a partir do cálculo da distância elétrica do nó da barra PV para os demais nós.

Definindo-se uma distância elétrica D_0 acima da qual as variáveis são consideradas acopladas, os dados qualitativos sobre observabilidade e controlabilidade estrutural podem ser obtidos a partir do cálculo da medida das distâncias elétricas. De posse destes dados, é então possível determinar áreas

de controle de tensão que formarão o conjunto de áreas e suas barras piloto para a aplicação do CST.

II.2.3 - Determinação de Áreas pelo Conceito de Distância Elétrica

O objetivo é agrupar geradores em áreas homogêneas, levando-se em conta a distância elétrica entre eles. Dois algoritmos baseados em métodos de análise tipológica [16] ajudam a formar as áreas a partir de geradores com características similares, onde a similaridade dos mesmos é dada pelo conceito da distância elétrica. Os algoritmos são apresentados a seguir, descrevendo de forma simplificada os seus passos.

II.2.3.1 - Algoritmo 1: Ascending Hierarchical Classification (AHC)

Passos básicos do algoritmo AHC:

1. Inicialmente há N objetos (geradores), que formam N classes (áreas);
2. As duas classes mais próximas, sendo a proximidade calculada através da distância elétrica, são fundidas e passam a formar uma única classe;
3. As distâncias da nova classe em relação às remanescentes são calculadas. O resultado até este passo é uma classe a menos do que havia no passo 2;
4. Se há apenas uma única classe com todos os N objetos, encerra-se o algoritmo. Senão, retorna-se ao passo 2.

Para o uso deste algoritmo, é necessário se fazer o cálculo da distância entre grupo de objetos (geradores). Este procedimento encontra-se em [16].

II.2.3.2 - Algoritmo 2: *Dynamic Scatter (DS)*

Passos básicos do algoritmo DS:

1. Uma distribuição de objetos em N classes é realizada. Uma distribuição inicial é assumida para este propósito;
2. Uma vez determinadas as N classes, são identificadas os N centros [16] de cada uma delas;
3. Uma vez determinados os N centros, cada objeto pode ser atribuído ao centro que está mais próximo, de tal forma a criar mudanças de objetos de uma classe para outra;
4. Se há mudanças nas classes, retorna-se ao passo 2. Senão, o algoritmo é encerrado.

Estes algoritmos estão detalhados em [16] e na determinação das áreas estes são complementares em vários pontos. No algoritmo AHC, pode-se fazer uma rápida exploração do número de áreas para o sistema, embora a distribuição obtida não seja a mais otimizada. O algoritmo DS trabalha com um número fixo de áreas, sugerido a partir de AHC, e faz a exploração da distribuição ótima das barras nas áreas obtidas em AHC. Assim, AHC e DS exercem funções complementares no objetivo de descobrir o número de áreas e a distribuição de barras nestas áreas.

Uma vez determinadas as áreas e sua distribuição, o nó piloto é aquele que possua a distância elétrica que seja a mais central possível em relação às demais barras da área [16].

Embora esta metodologia tenha sido usada na implementação do CST na França [10] e em outras concessionárias europeias, há limitações para sua aplicação. O uso do conceito de distância elétrica, juntamente com os algoritmos baseados em métodos de análise tipológica, deve ser encarado como uma ferramenta de apoio à decisão e não como um método sistemático para a determinação de áreas de controle. Recomenda-se em [16] que os resultados

desta metodologia sejam combinados com a experiência dos operadores do sistema.

II.2.4 - Determinação de Áreas pelo Conceito de Regiões de Coerência

As definições de coerência de tensão foram propostas em [27,28,29,30,31] e dão origem a dois métodos para identificação de áreas de coerência, métodos estes que serão revistos nesta seção.

Em [27,28,29], define-se um grupo coerente de barras de cargas, tendo em vista o comportamento da tensão, como sendo aquelas barras que tem o mesmo incremento na magnitude e ângulo da tensão, quando há perturbações causadas por mudanças nas cargas em barras PQ , na geração ou mesmo na topologia. Estas barras formam um grupo que irá constituir uma região coerente.

Em [30,31], o conceito de coerência de tensão está relacionado ao agrupamento de porções da rede elétrica, a partir do que foi chamado de fraqueza estrutural, que está relacionado à questão da controlabilidade de tensão. Nesta definição, é mostrado que um sistema pode ser decomposto em várias áreas de controle de tensão que se relacionam com outras áreas através de fronteiras fracas. Estas fronteiras são ramos de circuito com reatâncias relativamente altas (por exemplo, linhas de transmissão longas) que limitam a capacidade de transferência de potência reativa. Assim, o controle de tensão de qualquer área para áreas adjacentes será limitado.

Baseado nestes conceitos de coerência de tensão propostos anteriormente, foi construído uma definição geral de coerência:

- “Um grupo de barras PQ são ditas coerentes com relação à dinâmica de tensão se exibem as mesmas tendências nos incrementos da magnitude e ângulos da tensão causados por mudanças nas injeções de potência ativa e reativa nas cargas, ou nos geradores, ou por mudanças na topologia fora da região de coerência. As barras PQ e PV que atendem estas condições constituem uma região ou área de coerência.”

Deve-se notar que, nesta definição, mudanças topológicas dentro da região de coerência não são consideradas perturbações relevantes, pois estas mudanças podem dividir esta região em partes coerentes menores.

Dois algoritmos são propostos para identificação destas regiões de coerência e são apresentados a seguir.

II.2.4.1 - Algoritmo 1: Collinear Vector Identification Method (CVI)

Método baseado no conceito de coerência de tensão definido em [27,28,29], onde barras coerentes são aquelas barras que possuem o mesmo incremento na magnitude e ângulo da tensão quando há perturbações causadas por mudanças em cargas PQ , na geração ou mesmo na topologia.

No método CVI, é usada a inversa da matriz Jacobiana J_{ac}^{-1} , a qual relaciona as mudanças nas magnitudes da tensão em função da alteração das potências ativa e reativas nas barras de carga, segundo dado pelas submatrizes j e l em (2.7). Através da comparação dos vetores-linha formados pela união das submatrizes j e l para diferentes barras, são consideradas barras coerentes aquelas que têm vetores colineares e têm magnitudes muito próximas. O teste para colinearidade é dado através da expressão em (2.25) e pela referência em [32].

$$\frac{\langle r_i, r_j \rangle}{\|r_i\| \|r_j\|} \leq \varepsilon_1 \quad (2.25)$$

Na equação (2.25), $\langle r_i, r_j \rangle$ representa o produto escalar entre os vetores e $\|r\|$ é a norma euclidiana dos vetores-linha r . Este teste identifica aquelas barras que compartilham o mesmo sinal na mudança das magnitudes da tensão para qualquer perturbação na potência ativa e reativa. Um segundo teste de caráter complementar faz a verificação da diferença incremental na magnitude da tensão testando as normas de todas as combinações de pares de vetores-linha da matriz Jacobiana, conforme está em (2.26).

$$\|r_i - r_j\| \leq \varepsilon_2 \quad (2.26)$$

Para o método CVI, caso os dois testes estejam dentro das tolerâncias ε_1 e ε_2 dadas, então as duas barras são consideradas coerentes e fazem parte da mesma área.

Segundo está em [32], o segundo teste pode ser relaxado, pois o mesmo vai além da definição de coerência, definição esta que pode ser plenamente satisfeita utilizando somente o primeiro teste, que verifica a colinearidade dos vetores-linha dados em (2.25).

II.2.4.2 - Algoritmo 2: Weak Branch Elimination (WBE)

Método baseado no conceito de coerência de tensão definido em [30,31], onde o agrupamento de porções da rede elétrica se dá a partir da eliminação dos ramos ditos fracos no sistema.

O método WBE identifica as regiões coerentes através da eliminação dos ramos fracos do sistema. Estes ramos são retirados através da observação dos elementos de menor valor da matriz L , que é parte da matriz Jacobiana J_{ac} , conforme está em (2.2). Neste processo consideram-se todas as barras PV e PQ.

O algoritmo do método WBE realiza os seguintes passos:

1. A matriz L , originária da matriz Jacobiana, é normalizada através da divisão de cada um de seus elementos pelo maior elemento da diagonal.
2. Após a normalização, os menores elementos são sequencialmente aproximados para zero até que a soma dos elementos eliminados em cada linha seja menor que uma dada tolerância.
3. A matriz reduzida é então dividida em submatrizes bloco-diagonal onde cada uma delas identifica um grupo de barras que delimitam então uma área de controle de tensão.

Este método considera o desacoplamento $P\theta-QV$. Esta simplificação é aceitável em pontos de operação afastados do ponto de máximo carregamento, porém em condições próximas ao ponto de colapso esta consideração pode levar a resultados imprecisos [32].

II.2.4.3 - Comparação entre os métodos CVI e WBE

Os algoritmos CVI e WBE foram testados e comparados usando o sistema *New England* de 39 barras [32]. Assumindo-se que os dois algoritmos utilizam os mesmos parâmetros, ambos produziram áreas de coerência de tensão idênticas. Este sistema é utilizado em diversos estudos de estabilidade, sendo composto de 39 barras, 46 circuitos e 10 geradores. Os seus dados completos são apresentados em [33].

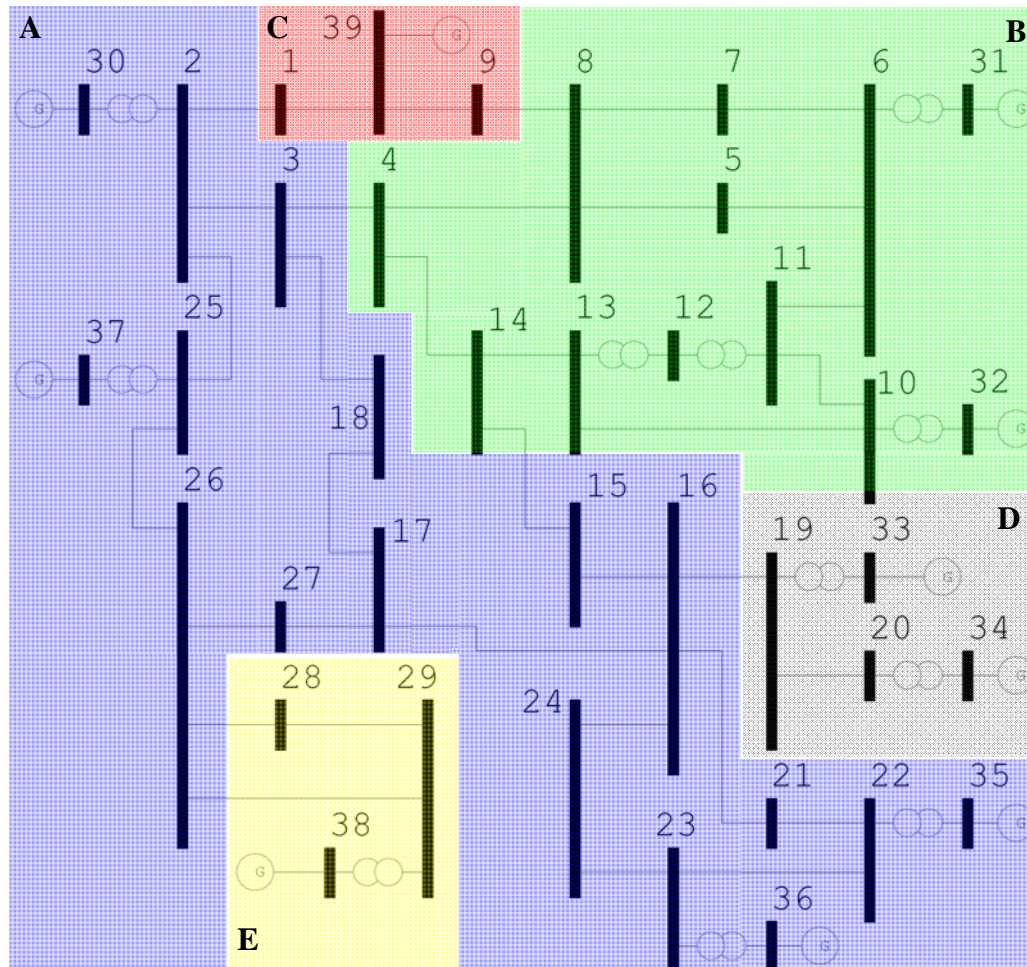


Figura 3 – Áreas de controle de tensão obtidas com os algoritmos CVI e WBE

São obtidas cinco áreas, que estão em destaque na Figura 3 através de letras e cores distintas: área A – referente às barras inseridas dentro da região azul, B – referente às barras inseridas dentro da região verde, C – referente às barras inseridas dentro da região vermelha, D – referente às barras inseridas dentro da região cinza e E – referente às barras inseridas dentro da região amarela.

II.3 - Autovalores, Autovetores e Fatores de Sensibilidade

Os métodos apresentados anteriormente para a identificação de áreas de controle de tensão usam informações provenientes da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência. A matriz Jacobiana é fruto da linearização das equações de injeções de potência ativa e reativa na solução do método de Newton-Raphson para a solução do problema de fluxo de potência, conforme descrito em linhas gerais no Apêndice A.

Vários métodos foram propostos para escolha do posicionamento mais efetivo de controles de tensão em SEP baseados em autovalores da matriz Jacobiana, análise modal e em fatores de sensibilidade, conforme descrito em [19,20,34].

Os fatores de sensibilidade da matriz Jacobiana de fluxo de potência, acrescidos das equações de linearizadas que representam controles e limites, podem ser utilizados também para a avaliação do efeito das ações de controle de tensão. Para isto é gerada uma matriz de sensibilidade de controle de tensão através da qual se pode estabelecer a relação existente entre tensões controladas e as grandezas controladoras. Este tipo de análise permite avaliar se uma ação de controle é adequada ou não e calcular ações de controle de tensão com o objetivo de mover um ponto de operação inadequado para um ponto de operação seguro [35].

A análise de autovalores da matriz Jacobiana próximo ao ponto de colapso de tensão, pode ser usada para identificar barras vulneráveis e pontos onde injeções de potência reativa trazem benefício o sistema [36,37].

A relação linear entre o módulo das tensões nodais e a potência reativa injetada é obtida através de uma redução da matriz Jacobiana. A partir do cálculo de

autovalores nesta matriz reduzida, é possível detectar o ponto de colapso a partir da aproximação do módulo de seus autovalores a zero [38].

Deve-se notar que há algo em comum entre os métodos para a determinação de áreas de controle de tensão apresentados anteriormente e os métodos de detecção do ponto de colapso de tensão utilizados nos estudos de segurança de tensão: ambos partem de matrizes reduzidas de sensibilidade entre as tensões e as potências reativas nas barras oriundas da matriz Jacobiana de fluxo de potência. Logo é possível perceber que há uma relação entre os fatores de sensibilidade desta matriz QV reduzida com seus respectivos autovalores e autovetores.

Baseado nesta relação existente entre os fatores de sensibilidade desta matriz QV reduzida com seus respectivos autovalores e autovetores, será feita a seguir uma revisão breve dos conceitos da análise autovalores e autovetores, e suas aplicações. Em seguida será feita a junção da análise de autovalores e autovetores com a análise de sensibilidade de tensão baseado nos fatores da matriz Jacobiana.

II.3.1 - Autopropriedades: Autovalores e Autovetores

As autopropriedades são extensivamente utilizadas em sistemas de potência, sendo importantes ferramentas nos estudos de:

1. Amortecimento e controle de oscilações eletromecânicas frente a pequenas perturbações [39,40];
2. Ressonância sub-síncrona [41];
3. Comportamento harmônico [42];
4. Análise da segurança de tensão a partir da matriz de sensibilidade QV [3,19,37,38,43];
5. Conflito de controles [44].

De uma forma geral, a decomposição de matrizes em autovalores e seus autovetores à direita e à esquerda permite um estudo mais localizado do comportamento do sistema, permitindo melhor identificar o problema e suas causas através do desacoplamento e da análise isolada de seus componentes principais, os chamados modos.

O principal objetivo dos tópicos que serão expostos a seguir é apresentar uma breve revisão dos principais conceitos relativos à análise de autovalores e autovetores, através de uma revisão da literatura. Estes tópicos têm também o objetivo auxiliar de adotar convenções e nomenclaturas para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, baseado nas referências [19,44,45].

II.3.1.1 - Autovalores

Os autovalores de uma matriz são definidos como sendo os valores de λ que satisfazem a solução não trivial ($\phi \neq 0$) da equação (2.27):

$$A \cdot \phi = \lambda \cdot \phi \quad (2.27)$$

onde A é uma matriz de dimensão $(n \times n)$, ϕ é um vetor de dimensão $(n \times 1)$ e λ é um escalar.

Os n autovalores $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ da matriz A podem ser calculados através da solução das raízes do seu polinômio ou equação característica, que é definida por (2.28):

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.28)$$

onde I é uma matriz identidade de dimensão $(n \times n)$.

Os autovalores obtidos a partir do polinômio característico em (2.28) podem ser reais ou complexos. Caso a matriz A seja real, os autovalores complexos aparecem sempre em pares conjugados. Por outro lado, caso a matriz A seja real e simétrica, todos os autovalores e autovetores serão reais [19].

II.3.1.2 - Autovetores

Para qualquer autovalor λ_i , o vetor coluna ϕ_i que satisfaz a equação (2.27) é definido como sendo o autovetor à direita da matriz A associado com o autovalor λ_i . Dessa forma, tem-se em (2.29) que:

$$A \cdot \phi_i = \lambda_i \cdot \phi_i \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.29)$$

onde ϕ_i é um vetor de dimensão $(n \times 1)$, conforme está em (2.30):

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Genericamente, define-se a matriz ϕ como o conjunto formado pelos autovetores à direita da matriz A , de acordo com (2.31):

$$\phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_i \quad \dots \quad \phi_n] \quad (2.31)$$

De maneira análoga à definição do vetor coluna ϕ_i , para qualquer autovalor λ_i , o vetor coluna ψ_i que satisfaz a equação (2.32) é definido como sendo o autovetor à esquerda da matriz A associado com o autovalor λ_i .

$$\psi_i \cdot A = \psi_i \cdot \lambda_i \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.32)$$

onde ψ_i é um vetor de dimensão $(1 \times n)$, conforme está em (2.33):

$$\psi_i = [\psi_{i1} \quad \psi_{i2} \quad \dots \quad \psi_{in}] \quad (2.33)$$

De forma similar à matriz ϕ , define-se a matriz ψ a partir do conjunto de autovetores à esquerda associados à matriz A , conforme está em (2.34):

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_i \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Os autovetores à direita e à esquerda associados a diferentes autovalores são ortogonais, conforme está em (2.35):

$$\psi_j \cdot \phi_i = 0 \quad (2.35)$$

Para autovetores associados a um mesmo autovalor λ_i , tem-se em (2.36) que:

$$\psi_i \cdot \phi_i = C_i \quad (2.36)$$

onde C_i é uma constante diferente de zero, real ou complexa.

É sempre possível normalizar convenientemente os autovetores à esquerda e à direita de forma a se obter a seguinte equação em (2.37):

$$\psi_i \cdot \phi_i = 1 \quad (2.37)$$

II.3.1.3 - Propriedades de Autovetores e Autovetores

Define-se agora a matriz Λ de dimensão $(n \times n)$ como sendo uma matriz diagonal cujos elementos são os n autovalores de A , conforme está em (2.38).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Através da generalização da equação (2.27), pode-se verificar as seguintes relações entre as matrizes A e Λ e os vetores ϕ e ψ nas equações (2.39), (2.40) e (2.41):

$$A \cdot \phi = \phi \cdot \Lambda \quad (2.39)$$

$$\psi \cdot \phi = I \quad (2.40)$$

$$\psi = \phi^{-1} \quad (2.41)$$

Da manipulação das equações (2.39) e (2.41), obtém-se a relação entre a matriz A e a matriz diagonal Λ exibida em (2.42):

$$\phi^{-1} \cdot A \cdot \phi = \Lambda \quad (2.42)$$

Como exemplo de utilização dos conceitos de autovalores e autovetores até aqui revisados, considera-se a matriz A como sendo a matriz de coeficientes de um sistema de equações lineares representado em (2.43). Considera-se também um novo vetor de incógnitas \hat{x} , com o objetivo de eliminar o acoplamento entre as variáveis originais do problema x . Este vetor é relacionado com o vetor original de variáveis através da equação (2.44).

$$A \cdot x = b \quad (2.43)$$

$$\phi \cdot \hat{x} = x \quad (2.44)$$

Para o vetor b de termos independentes, é definido em (2.45) que:

$$\phi \cdot \hat{b} = b \quad (2.45)$$

Em (2.46) e (2.47) estão os resultados da manipulação conjunta das equações (2.43), (2.44) e (2.45):

$$A \cdot \phi \cdot \hat{x} = \phi \cdot \hat{b} \quad (2.46)$$

$$\phi^{-1} \cdot A \cdot \phi \cdot \hat{x} = \hat{b} \quad (2.47)$$

Logo, o sistema de equações lineares modificado partindo das equações (2.46) e (2.47) é dado em (2.48) por:

$$\Lambda \cdot \hat{x} = \hat{b} \quad (2.48)$$

A análise do comportamento do sistema de equações lineares a partir da matriz A é que as variações de cada posição do vetor b em (2.43) é composto pela combinação linear das variáveis do vetor x . Desta forma, torna-se mais difícil isolar quais parâmetros influenciam de maneira significativa seu comportamento. A diagonalização da matriz A tem como objetivo principal eliminar este acoplamento, facilitando a interpretação e análise do problema.

II.3.1.4 - Propriedades do Mode-Shape

Da equação (2.44) referente ao sistema de equações lineares transformado, observa-se que o autovetor à direita fornece uma relação direta entre o vetor de variáveis original x e o transformado \hat{x} , estando os elementos do vetor \hat{x} diretamente relacionados com cada modo ou autovalor da matriz Λ . Portanto, a partir da análise dos autovetores à direita, pode-se verificar o comportamento de todas as grandezas do sistema original (chamadas variáveis de estado) quando um determinado modo é perturbado. O grau de atividade associado à variável de estado x_k , para um dado modo i , é dado pelo elemento ϕ_{ki} da matriz de autovetores à direita.

De forma análoga, verifica-se que o elemento ψ_{ik} da matriz de autovetores à esquerda, fornece o grau de atividade associado à variável de estado transformada \hat{x}_i quando uma variável de estado x_k é perturbada.

Entende-se por *mode-shape* ou fator de observabilidade, a visualização gráfica do diagrama formado pela amplitude e fase do elemento ϕ_{ki} da matriz de autovetores à direita, relacionado a um dado modo i , quando está se analisando um mesmo tipo de variável de saída (por exemplo, velocidade angular, tensão, *tap* de transformadores, etc.). Assim, quando são estudados os desvios de velocidade do rotor de todos os geradores, e especificamente concentramos a atenção no comportamento de um determinado modo de oscilação, tem-se o que se denomina de *mode-shape* de velocidade. De forma similar, é possível a obtenção de *mode-shape* de tensão em barras, potência elétrica dos geradores, fluxo nas linhas, etc.

II.3.1.5 - Propriedades do Fator de Participação

Um dos inconvenientes ao se utilizar individualmente os autovetores à esquerda e/ou à direita para identificação da relação entre variáveis de estado e autovalores, é que os elementos dos autovetores tanto à esquerda quanto à direita são dependentes das unidades e das escalas associadas às variáveis de estado do problema. Uma das soluções para este problema é o cálculo de uma matriz definida como matriz de fatores de participação (P), conforme está em (2.49), que combina as informações contidas nos autovetores à esquerda e à direita como uma maneira de se obter a relação entre autovalores e variáveis de estado do problema. O objetivo é mensurar a participação de um determinado estado k em um dado modo i .

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n] \quad (2.49)$$

Cada elemento p_i em (2.50) é definido em por:

$$p_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \cdot \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \cdot \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \cdot \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

O efeito da multiplicação dos elementos dos autovetores à direita e à esquerda é que o fator de participação torna-se adimensional, conforme descrito nas referências [19,46].

O fator de participação p_{ik} é uma medida de sensibilidade que relaciona o autovalor λ_i à diagonal k da matriz A , conforme descrito em [46] e mostrado em (2.51):

$$p_{ik} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (2.51)$$

onde a_{kk} representa o k -ésimo elemento da diagonal da matriz A em (2.27).

II.3.2 - Fatores de Sensibilidade e Autovalores

Na avaliação da segurança de tensão de um sistema, o estudo da relação entre o menor autovalor da matriz Jacobiana e as tensões nodais traz importantes informações [47,48]. Os maiores componentes do autovetor correspondente ao autovalor mínimo indicam quais nós são mais sensíveis ao modo crítico, isto é, ao autovalor mínimo. Este estudo pode identificar os nós cujas tensões são mais sensíveis aos distúrbios ocorridos no sistema, sendo estes nós chamados de nós sensores em [49,50].

A seguir serão revisados os métodos utilizados para detecção dos chamados nós sensores, dado que esta metodologia servirá de base para consolidar a utilização dos autovalores da matriz Jacobiana de fluxo de potência para a determinação de áreas de controle de tensão, uma vez que será estabelecida a relação entre os autovalores e as variáveis da matriz Jacobiana.

II.3.2.1 - Nós Sensores: Análise da Matriz de Admitâncias

A dependência entre as variações nas correntes nodais ΔI e as variações nas tensões nodais ΔV , para cada um dos n nós existentes em um SEP, envolve a matriz de admitâncias Y_{bus} , conforme foi definido anteriormente em (2.11). A matriz Y_{bus} será simétrica desde que não haja números complexos para representar os fatores de transformação dos transformadores defasadores. Para um SEP de grande porte, é recomendável a representação da matriz de admitâncias como uma matriz simétrica com elementos reais, utilizando a forma descrita em [23] e exibida em (2.52), (2.53) e (2.54).

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -B & G \\ G & B \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\Delta I = Y_{bus} \cdot \Delta V \quad (2.53)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{im} \\ \Delta V_{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B & G \\ G & B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_{re} \\ \Delta I_{im} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

A partir da equação em (2.42), considerando-se a matriz Y_{bus} em (2.53) real e simétrica (não há transformadores defasadores), a matriz Y_{bus} pode ser decomposta conforme está exibido em (2.55). Esta decomposição da matriz Y_{bus} se deve ao fato de que, para matrizes simétricas, a relação entre suas matrizes de autovetores à esquerda e à direita é que as duas matrizes (à direita e à esquerda) são uma a transposta da outra [51].

$$Y_{bus} = V\Lambda V^T \quad (2.55)$$

A matriz Λ é a matriz diagonal com os autovalores de Y_{bus} . A matriz V é composta com os correspondentes autovetores. Como as colunas de V são formadas pelos vetores ortogonais v_1, v_2, \dots, v_n , a matriz Y_{bus} pode ser obtida para os n nós independentes do sistema como uma combinação dos autovetores v_i com os seus autovalores λ_i , segundo está em (2.56).

$$Y_{bus} = \sum_{i=1}^n v_i v_i^T \lambda_i \quad (2.56)$$

A partir das equações (2.53) e (2.56), as variações das tensões nodais podem ser escritas segundo está em (2.57).

$$\Delta V = Y_{bus}^{-1} \Delta I = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i v_i^T}{\lambda_i} \right) \Delta I \quad (2.57)$$

Considerando que os autovalores da matriz Λ estão ordenados em valores crescentes de seus módulos e assumindo que há uma diferença considerável entre o módulo do menor autovalor e o módulo dos demais autovalores, o primeiro elemento de (2.57), $i = 1$, será o elemento determinante do somatório no que tange a análise de sensibilidade destes nós.

Assim, a expressão em (2.57) pode ser reescrita conforme está em (2.58).

$$\Delta V \approx \frac{v_1 v_1^T}{\lambda_1} \Delta I \quad (2.58)$$

A partir da observação de (2.58) percebe-se que os elementos da matriz Y_{bus} relacionados com o menor autovalor darão maior contribuição nas variações de tensão. O nível de intensidade desta contribuição é proporcional aos elementos correspondentes ao autovetor v_1 . Neste método, o maior componente de v_1 é quem determina o nó sensor [52].

Quanto maior a diferença do menor autovalor em relação aos demais autovalores, menor é o erro proveniente da rejeição dos $n-1$ termos da mudança entre as equações (2.56) e (2.57). A partir destas considerações, torna-se possível estudar a sensibilidade de um SEP tomando-se apenas um ou pelo menos alguns poucos elementos de (2.57). Esta simplificação torna o estudo mais simples, principalmente no caso de sistemas de grande porte [23].

II.3.2.2 - Nós Sensores: Análise da Matriz Jacobiana

Segundo [23], experiências confirmam que para situações onde alguns nós alteram consideravelmente sua sensibilidade em função das mudanças ocorridas nos estados do sistema, os nós sensores não devem ser determinados através da matriz de admitâncias Y_{bus} e sim através da matriz Jacobiana da formulação do problema de fluxo de potência.

As equações linearizadas de balanço de potência nos nós do sistema em (2.8) mostram a dependência das variações das tensões nodais em magnitude e em fase nas variações das potências ativa e reativa.

Para um pequeno intervalo de variação de potência, supõe-se que a matriz inversa da matriz Jacobiana em (2.8) é constante. Para a obtenção dos nós sensores baseados na análise de matriz Jacobiana em (2.2), é feita a decomposição em (2.59).

$$J_{ac} = \psi \Lambda \phi = \sum_{i=1}^n \psi_i \Lambda_i \phi_i \quad (2.59)$$

As matrizes ψ e ϕ , definidas respectivamente em (2.34) e (2.31), são matrizes ortogonais de dimensão $n \times n$, onde para a matriz ψ a i -ésima linha é o i -ésimo vetor à esquerda e para a matriz ϕ a i -ésima coluna é o i -ésimo vetor à direita. Para estes vetores, as seguintes condições são válidas:

$$\psi_i \psi_i^T = 1 \quad (2.60)$$

$$\phi_i^T \phi_i = 1 \quad (2.61)$$

$$\psi_j \psi_i^T = 0 \quad (2.62)$$

$$\phi_i^T \phi_j = 0 \quad (2.63)$$

Conforme definido em (2.38), a matriz Λ é a matriz diagonal de autovalores da matriz J_{ac} , que são ordenados segundo o valor crescente de seus módulos ($\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$).

Baseado em (2.59), a decomposição em autovalores e autovetores da inversa da matriz Jacobiana J_{ac} é dada pela expressão em (2.64):

$$J_{ac}^{-1} = \psi \Lambda^{-1} \phi = \sum_{i=1}^n \frac{\psi_i \phi_i}{\lambda_i} \quad (2.64)$$

A partir da expressão (2.64), a equação (2.8) pode ser reescrita da seguinte forma em (2.65):

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\psi_i \phi_i}{\lambda_i} \right] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Da mesma forma que foi arbitrada para detecção de nós sensores utilizando a matriz admitância Y_{bus} , se dentro do intervalo dos módulos dos autovalores o primeiro autovalor tem módulo sensivelmente inferior aos módulos dos demais autovalores, o termo ligado a este menor autovalor tem a maior contribuição nas variações de tensão e ângulo da matriz, conforme demonstra a expressão (2.66).

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \approx \frac{\psi_1 \phi_1}{\lambda_1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Esta consideração do autovalor de menor módulo que resultou na expressão em (2.66) permite que a expressão (2.65) seja reescrita da seguinte forma em (2.67):

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \left[\frac{\psi_1 \phi_1}{\lambda_1} \right] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\Delta\theta} \\ \varepsilon_{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

O último termo da soma na expressão em (2.67) corresponde ao erro na determinação do desvio da tensão nodal em função da rejeição dos $n-1$ termos na passagem da expressão (2.65) para a expressão em (2.67).

Quanto maior a diferença entre o menor autovalor e os demais autovalores, menor é o erro resultante da rejeição dos $n-1$ termos de (2.65). Neste caso, torna-se bastante interessante analisar o comportamento de todas as variáveis de estado do problema de fluxo de potência a partir de apenas um termo de (2.65) associado ao autovalor λ_1 , que é o autovalor de menor módulo.

Pode-se então afirmar que as maiores mudanças nas magnitudes de tensão e ângulo causadas por variações aleatórias de potência se darão em nós que estejam relacionados aos maiores componentes do autovetor à direita e à esquerda dos menores autovalores. O autovetor à direita irá estabelecer uma relação direta entre variáveis de estado e variáveis transformadas. Se, para o menor autovalor λ_1 , for tomado o autovetor à direita, conforme está definido em (2.44), será possível descobrir o grau de atividade relativo das variáveis de tensão e ângulo.

Com a perspectiva de avaliar a sensibilidade do sistema a partir do menor ou dos menores autovalores da matriz Jacobiana, tendo em vista que os algoritmos de determinação de áreas expostos anteriormente se baseiam nos fatores de sensibilidade entre tensões e injeções de potência reativa provenientes da matriz Jacobiana, abre-se caminho para investigar a possibilidade de se combinar estas metodologias.

Baseado nesta construção dos fatores de sensibilidade a partir dos autovalores de menor módulo utilizando matrizes provenientes da matriz Jacobiana é que será proposta uma metodologia para o uso de autovalores e autovetores de uma matriz reduzida a partir da matriz Jacobiana, na tentativa de se estabelecer áreas de controle de tensão em um SEP.

CAPÍTULO III -

METODOLOGIA PROPOSTA

III.1 - Considerações Iniciais

No capítulo anterior, fez-se uma revisão bibliográfica acerca dos algoritmos para a determinação de áreas de controle de tensão. Tais algoritmos, que são utilizados para a divisão do sistema, têm como ponto comum a utilização da sensibilidade VQ [16,32]. Esta matriz é obtida a partir da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência com o objetivo de identificar grupos de barras que tenham características similares frente a variações de potência reativa no sistema.

Também no capítulo anterior foram revisados os principais conceitos de análise linear para o cálculo de autovalores e autovetores aplicados às matrizes admitância e Jacobiana para determinação dos chamados nós sensores. Nesta abordagem, se há uma discrepância significativa entre os módulos dos menores autovalores e os módulos dos demais autovalores, as relações de sensibilidade entre tensões e injeções de potência reativa podem ser construídas a partir destes autovalores de menor módulo e seus respectivos autovetores.

Será proposta neste capítulo uma metodologia para identificação de áreas de controle de tensão em SEP baseada no estudo de autovalores e seus autovetores de uma matriz reduzida, obtida a partir da matriz Jacobiana do problema de fluxo de potência. Esta proposta está fundamentada tanto na revisão sobre o uso da sensibilidade para definição de áreas de controle de tensão, quanto no uso dos autovalores e autovetores para identificação dos chamados nós sensores. Estas duas metodologias estão ligadas através do uso da mesma matriz Jacobiana e também pelo fato de que a sensibilidade pode ser construída a partir da combinação de autovalores e autovetores.

Adicionalmente à questão de definição de áreas de controle, propõe-se também neste capítulo uma alteração no modelo de representação das barras PV na formulação do problema de fluxo de potência, com o intuito permitir a formação das áreas incluindo tanto as barras PQ como as barras PV . Esta alteração no modelo de representação das barras PV permite que os fatores de sensibilidade referentes às barras PV estejam presentes na matriz Jacobiana, o que na formulação tradicional do problema de fluxo de potência não ocorre [53]. O cálculo de autovalores e autovetores é feito a partir de uma matriz reduzida obtida da matriz Jacobiana completa, sendo que a análise destes autovalores e autovetores têm 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.

III.2 - Formulação do Problema de Fluxo de Potência

Conforme está no Apêndice A e em [24], a formulação tradicional do problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson pode ser representado através de (3.1):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

No caso de barras PV , são especificadas a potência ativa e a tensão na barra. Em termos da matriz Jacobiana tradicional do problema de fluxo de potência, uma barra k do tipo PV e uma m do tipo PQ teriam genericamente na matriz Jacobiana a composição dada em (3.2).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \dots \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \dots \\ \ddots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Nesta representação tradicional de barra PV em (3.2), sendo a tensão da barra k especificada, a equação correspondente ao resíduo ΔQ_k pode ser retirada, uma vez que a variável V_k é especificada.

A formulação expandida da matriz Jacobiana para o problema de fluxo de potência [53] está representada através de (3.3):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde:

$$\Delta P = P^{esp} - P^{cal} \quad (3.4)$$

$$P^{esp} = P_G - P_L \quad (3.5)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q^{cal} \quad (3.6)$$

$$Q^{esp} = Q_G - Q_L \quad (3.7)$$

$$\Delta y = y^{esp} - y^{cal} \quad (3.8)$$

$$y^{cal} = f(\theta, V, x) \quad (3.9)$$

Nas equações (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9) temos que:

- ΔP representa o vetor de erros das equações de potência ativa, P^{esp} a potência ativa líquida especificada na barra, P^{cal} a potência ativa calculada pelo método de Newton-Raphson na barra, P_G a potência ativa injetada na barra e P_L a potência ativa absorvida na barra;
- ΔQ representa o vetor de erros das equações de potência reativa, Q^{esp} a potência reativa líquida especificada na barra, Q^{cal} a potência reativa calculada pelo método de Newton-Raphson na barra, Q_G a potência reativa injetada na barra e Q_L a potência reativa absorvida na barra;

- Δy representa o vetor de erros das equações adicionais que modelam os equipamentos de controle [53]. O vetor Δx é formado pelo incremento das variáveis de estado x incorporadas ao problema, que são necessárias para tornar o sistema de equações possível e determinado.

Ao final de cada iteração do processo de solução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson, as variáveis de estado θ e V , e as novas variáveis de estado x são atualizadas em (3.10) da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\theta^{(h+1)} &= \theta^{(h)} + \Delta\theta^{(h)} \\ V^{(h+1)} &= V^{(h)} + \Delta V^{(h)} \\ x^{(h+1)} &= x^{(h)} + \Delta x^{(h)}\end{aligned}\tag{3.10}$$

No método de Newton-Raphson para solução de equações algébricas não-lineares (Apêndice A), utiliza-se como critério de convergência a norma infinita do vetor de resíduos, que é relativo aos erros de potência ativa e reativa nas barras do sistema. Com a inclusão de novas equações ao problema original, utiliza-se como critério de convergência adicional o valor da norma $\|\Delta y\|_{\infty}$.

A equação (3.3) pode ser reescrita na forma mostrada em (3.11).

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \\ \frac{\Delta y}{\Delta x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{Px} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{Qx} \\ J_{y\theta} & J_{yV} & J_{yx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta\theta}{\Delta V} \\ \frac{\Delta x}{\Delta x} \end{bmatrix}\tag{3.11}$$

A modelagem expandida da matriz Jacobiana permite grande flexibilidade na incorporação e retirada das equações que modelam os equipamentos de controle, tendo-se em vista que a matriz Jacobiana da formulação tradicional é preservada. Esta característica é altamente relevante, uma vez que viabiliza sua aplicação em programas computacionais já estabelecidos no mercado, preservando as particularidades de cada programa. Maiores detalhes sobre esta estrutura expandida da matriz Jacobiana encontram-se em [44,53,54].

No caso de barras do tipo PV com controle remoto de tensão (CRT), a equação ΔQ_k referente à barra k do tipo PV é novamente inserida na matriz Jacobiana expandida em (3.11), além de uma equação adicional Δy que determina a

variável $x = Q_{Gk}$ como um novo estado e garante que o valor da tensão V_m da barra remota m do tipo PQ fique igual ao valor especificado [53]. Esta composição da matriz Jacobiana expandida para o CRT é apresentada em (3.12).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta y \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \cdots & 0 & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \cdots & 1 & \cdots \\ \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \cdots & 0 & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \cdots & 0 & \cdots \\ \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta x \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Os resíduos das equações de erro de potência reativa e de controle, mais o resíduo da nova variável de estado definida para o CRT são apresentadas em (3.13), (3.14) e (3.15):

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{cal} = (Q_G + Q_{Gk} - Q_L) - Q_k^{cal} \quad (3.13)$$

$$\Delta y = V_m^{esp} - V_m^{cal} \quad (3.14)$$

$$\Delta x = \Delta Q_{Gk} \quad (3.15)$$

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

$$Q_{Gk}^{(h+1)} = Q_{Gk}^{(h)} + \Delta Q_{Gk}^{(h)} \quad (3.16)$$

Em (3.12), dos elementos da coluna adicionada pela inserção da equação de controle Δy , apenas o elemento na linha da equação de potência reativa da barra k do tipo PV é não nulo. Na linha da equação adicional Δy , somente o elemento referente à coluna de V_m é não nulo.

III.2.1 - Representação de Barras PV na Matriz Jacobiana

Conforme visto anteriormente em (3.2), no caso de barras PV sem CRT, a equação correspondente ao resíduo ΔQ_k é retirada e a variável V_k é especificada, garantindo assim o valor da tensão nestas barras.

Embora o modelo apresentado em (3.12) tenha sido utilizado para os casos onde há o CRT, esta modelagem também pode ser utilizada para representar as barras PV quando não há o CRT. Para isto, basta alterar a equação adicional de controle Δy que foi definida para o CRT em (3.14). Para o controle da própria tensão da barra PV, passamos a especificar o controle da tensão da barra k do tipo PV e não mais da barra m do tipo PQ. O novo resíduo para a equação de controle Δy passa a ser dado por (3.17) em substituição ao dado em (3.14).

$$\Delta y = V_k^{esp} - V_k^{cal} \quad (3.17)$$

Assim, a composição da matriz Jacobiana expandida dada em (3.12) também é alterada. A composição da matriz Jacobiana expandida sem o CRT, considerando o controle da tensão na própria barra k do tipo PV é dada em (3.18):

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta y \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \dots & 1 & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta x \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Comparando-se as matrizes em (3.12) e (3.18), nota-se que a diferença fica restrita apenas à linha da equação adicional de controle Δy . No caso do CRT, somente o elemento da coluna referente à tensão V_m era não nulo. No caso de

barra PV com o controle local da tensão, o elemento não nulo na linha da equação adicional de controle Δy passa a ser o referente à coluna V_k .

O benefício da adoção deste modelo utilizando a equação adicional de controle Δy para todas as barras PV se justifica pelo fato de que, sob o ponto de vista computacional, o tradicional e o expandido têm desempenhos similares. Além disso, com a permanência das equações de erro de potência reativa das barras PV , os fatores de sensibilidade referentes a estas barras estarão presentes da matriz Jacobiana. A presença dos fatores de sensibilidade destas barras é de fundamental importância para a formação das áreas, visto que se desejam áreas compostas não somente por barras do tipo PQ .

Cabe ressaltar também que este modelo utilizando a equação adicional de controle Δy para o controle de tensão de barras PV também pode ser utilizado para barras do tipo $V\theta$. Assim, neste trabalho, também as barras $V\theta$ terão a equação adicional de controle Δy para manutenção da tensão no valor especificado e terão reinseridas suas equações em ΔQ , que representa o vetor de erros das equações de potência reativa. Como todos os tipos de barras (PQ , PV e $V\theta$) terão suas equações no vetor de erros das equações de potência reativa ΔQ , o número de equações deste subproblema será igual ao número de barras.

III.3 - Áreas de Controle por Autovalores e Autovetores

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se na utilização de autovalores e autovetores para a determinação de áreas de controle de tensão. Esta metodologia consiste na decomposição em autovalores e autovetores de uma matriz de sensibilidade QV , obtida a partir de uma redução da matriz Jacobiana definida em (3.3).

No sistema dado em (3.11), o resíduo ΔQ das equações de potência reativa contém tanto barras do tipo PQ quanto barras do tipo PV (leia-se aqui PV agrupando PV e $V\theta$), uma vez que para este trabalho o modelo adotado de

barra PV não retira a equação de potência reativa, como foi visto no item anterior. A permanência das equações de potência reativa referentes às barras PV irá permitir capturar as sensibilidades das barras PQ em relação às barras PV , que são de fundamental importância na determinação das áreas de controle.

Se no sistema de equações apresentado em (3.11) as equações adicionais de controle Δy forem abandonadas, o sistema linear passa a ter a forma que está em (3.19).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Deve-se ressaltar novamente que na submatriz J_{QV} a ausência das equações de barras PV resultaria em uma matriz que traria apenas as relações QV entre as barras PQ , o que não é desejável para determinação de áreas, visto que a informação do alcance da influência dos geradores é importante para este tipo de análise.

Em (3.19), a matriz $J_{P\theta}$ representa a derivada das equações de potência ativa em relação à variável de estado θ para todas as barras PV e PQ . A matriz J_{PV} representa a derivada das equações de potência ativa em relação à variável de estado V para todas as barras PV , $V\theta$ e PQ . A matriz $J_{Q\theta}$ representa a derivada das equações de potência reativa em relação à variável de estado θ para todas as barras PV e PQ . A matriz J_{QV} representa a derivada das equações de potência reativa em relação à variável de estado V para todas as barras PV , $V\theta$ e PQ . A matriz J_{QV} tem dimensão $nb \times nb$, onde nb é o número total de barras do sistema.

A partir então de (3.19), uma nova matriz Jacobiana J'_{ac} pode ser definida como:

$$J'_{ac} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Da redução da matriz definida em (3.20), será definida uma matriz de sensibilidade QV , denominada de J_{SQV} . Os autovalores da nova matriz J_{SQV} permitirão observar os modos de interação entre as tensões de todas as barras do sistema e seus respectivos autovetores destacarão como as barras participam em cada um dos modos (autovalores) obtidos.

A matriz de sensibilidade J_{SQV} nasce da retirada da matriz (3.20) do sistema dado em (3.11). De (3.20), são feitas as manipulações para o cálculo da matriz J_{SQV} com o objetivo de explicitar a sensibilidade entre o vetor de erros das equações de potência reativa ΔQ e o vetor de variáveis de tensão originais ΔV .

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 (3.19) para a obtenção da matriz J_{SQV} . Com $\Delta P = 0$, é obtida uma nova equação mostrada em (3.24) que representa $\Delta \theta$, conforme está demonstrado nas expressões a seguir:

$$\Delta P = [0] \quad (3.21)$$

$$[0] = J_{P\theta} \cdot \Delta \theta + J_{PV} \cdot \Delta V \quad (3.22)$$

$$J_{P\theta} \cdot \Delta \theta = -J_{PV} \cdot \Delta V \quad (3.23)$$

$$\Delta \theta = \left[-J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \right] \Delta V \quad (3.24)$$

Substituindo $\Delta \theta$ dado em (3.24) no subsistema das equações de potência reativa em (3.19), obtém-se que:

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot \Delta \theta + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (3.25)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot \left[-J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \right] \Delta V + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (3.26)$$

$$\Delta Q = \left(J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \right) \Delta V \quad (3.27)$$

Logo, a matriz de sensibilidade QV denominada de J_{SQV} é dada por (3.28):

$$J_{SQV} = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \quad (3.28)$$

De (3.27) e (3.28) são definidas as equações (3.29) e (3.30) a seguir:

$$\Delta Q = J_{SQV} \Delta V \quad (3.29)$$

$$\Delta V = J_{SQV}^{-1} \Delta Q \quad (3.30)$$

É importante ressaltar que para obtenção da matriz J_{SQV} , a matriz $J_{P\theta}$ 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. O sistema de equações definido por esta matriz possui ordem nb , onde nb é o número de barras do SEP.

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

III.3.1 - Autovalores e Autovetores da Matriz J_{SQV}

A análise dos autovalores da matriz de sensibilidade J_{SQV} permitirá extrair dados sobre as áreas de controle de tensão a partir dos autovalores de menor módulo, de forma similar ao realizado para a obtenção dos chamados nós sensores que foram mencionados no capítulo anterior. Nestes autovalores de menor módulo, serão levantadas as barras mais influentes a partir da atividade relativa obtida entre essas barras segundo a observação do autovetor à direita.

Admitindo que a matriz J_{SQV} tenha todos os seus autovalores distintos e representados por $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{nb}$, sendo nb é o número total de barras, esta matriz pode ser devidamente diagonalizada pela transformação de similaridade descrita no item anterior e detalhada em [45].

Expressando a matriz de sensibilidade J_{SQV} , de dimensões $(nb \times nb)$, através das matrizes de autovetores à direita (ϕ), autovetores à esquerda (ψ) e diagonal (Λ), obtém-se que:

$$J_{SQV} = \phi \cdot \Lambda \cdot \psi \quad (3.31)$$

ou que:

$$J_{SQV}^{-1} = \phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \psi \quad (3.32)$$

onde a inversa da matriz diagonal Λ é dada por (3.33):

$$\Lambda^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\lambda_n} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Substituindo a equação (3.32) em (3.30), chegam-se as equações em (3.34) e (3.35):

$$\Delta V = \phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \psi \cdot \Delta Q \quad (3.34)$$

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{nb} \frac{\phi_i \cdot \psi_i}{\lambda_i} \cdot \Delta Q \quad (3.35)$$

Observa-se nesta última equação que cada autovalor λ_i , em conjunto com os respectivos autovetores à direita e à esquerda, define o i -ésimo modo da matriz de sensibilidade J_{SQV} .

Considerando-se $\Delta Q = e_k$, onde e_k é um vetor coluna com todas as posições iguais a zero, com exceção do seu k -ésimo termo, que é definido com o valor 1, obtém-se:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{nb} \frac{\psi_{ik} \cdot \phi_i}{\lambda_i} \quad (3.36)$$

Pode-se perceber que para a k – ésima barra do sistema, têm-se as seguintes relações de sensibilidade entre a variável de estado associada à tensão da barra e o respectivo erro da equação de potência reativa:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_{i=1}^{nb} \frac{\phi_{ki} \cdot \psi_{ik}}{\lambda_i} \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \sum_{i=1}^{nb} \phi_{ki} \cdot \lambda_i \cdot \psi_{ik} \quad (3.38)$$

Verifica-se na equação (3.37) que 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 de sensibilidade J_{SQV} .

É possível constatar também na equação (3.37) que o numerador do somatório, dado pela expressão $\phi_{ki} \cdot \psi_{ik}$, é igual ao fator de participação p_{ki} . Em outras palavras, ele determina a participação da k – ésima barra no modo λ_i e vice-versa.

Na equação (3.37), a sensibilidade da variável de estado tensão V_k em relação ao erro da equação de potência reativa Q_k é obtida via combinação de todos os autovalores e autovetores da matriz de sensibilidade J_{SQV} . Se porventura os autovalores da matriz em (3.33) forem colocados em ordem crescente do valor de seus módulos e o módulo do primeiro autovalor λ_1 for sensivelmente menor do que os demais autovalores, a equação (3.37) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} \approx \frac{\phi_{k1} \cdot \psi_{1k}}{\lambda_1} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \approx \phi_{k1} \cdot \lambda_1 \cdot \psi_{1k} \quad (3.40)$$

Verifica-se na equação (3.39) que a sensibilidade da variável de estado tensão V_k em relação ao erro da equação de potência reativa Q_k pode ser estimada apenas com o autovalor de menor módulo da matriz de sensibilidade J_{SQV} ,

juntamente com seus autovetores. Não foi utilizada toda a combinação dos autovalores. Esta aproximação se torna mais precisa quanto maior for a diferença entre os menores autovalores e os demais. A partir desta análise, é possível afirmar que toda sensibilidade QV do sistema pode ser obtida a partir da avaliação dos menores autovalores e seus respectivos autovetores.

Em linhas gerais, a metodologia proposta para identificação de áreas de controle consiste em, a partir dos menores autovalores, construir toda a sensibilidade QV do sistema, identificando através do *mode-shape* destes autovalores, de que forma as barras se relacionam. Das relações entre as barras dadas pelo *mode-shape* virá a informação das áreas de controle do SEP. A utilização do *mode-shape* como critério de formação das áreas será justificada em seguida.

Em uma análise de sensibilidade tradicional para determinação de áreas de controle de tensão, o aglutinamento das barras em áreas seria realizado de forma manual, uma vez que a execução é feita barra por barra, armazenando os resultados para posteriormente se concatenar as barras com comportamento semelhante. Se o número de barras do SEP for elevado, haverá uma grande quantidade de barras para ser analisadas, o que demanda um esforço elevado. Neste aspecto, a metodologia proposta utilizando-se autovalores e autovetores se mostrará interessante, pois a informação das áreas será obtida diretamente do *mode-shape* dos menores autovalores da matriz J_{SQV} .

No quesito desempenho computacional, a sensibilidade por si só tem baixo custo, porém sua execução para um estudo de determinação de áreas exige que esta análise seja feita para um número elevado de barras do SEP, o que acarreta em um tempo expressivo. No caso das áreas obtidas através da análise de autovalores, será verificado em sistemas de grande porte que o desempenho computacional é bastante atraente.

III.3.2 - Avaliação das Áreas pelo Mode-Shape

Baseado na equação (3.37), pode-se escrever a seguinte equação:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_m} = \sum_{i=1}^{nb} \frac{\phi_{ki} \cdot \psi_{im}}{\lambda_i} \quad (3.41)$$

Em (3.41) a sensibilidade da variável de estado tensão V_k em relação ao erro da equação de potência reativa Q_m é obtida via combinação de autovalores e autovetores da matriz de sensibilidade J_{SQV} . Podemos afirmar a partir de (3.41) que duas ou mais barras pertencem a uma mesma área se todos seus fatores de sensibilidade $\partial V / \partial Q$ são semelhantes.

Se porventura os autovalores da matriz em (3.33) forem colocados em ordem crescente do valor de seus módulos e o módulo do primeiro autovalor λ_1 for sensivelmente menor do que os demais autovalores, a equação (3.41) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_m} \approx \frac{\phi_{k1} \cdot \psi_{1m}}{\lambda_1} \quad (3.42)$$

Baseado em (3.42) pode-se afirmar que é possível estimar a sensibilidade de tensão de uma barra k qualquer em relação a uma injeção de potência reativa em uma barra m qualquer utilizando o autovalor de menor módulo e seus respectivos autovetores. Se for utilizado apenas o autovalor de menor módulo, a equação em (3.35) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta V \approx \frac{\phi_1 \cdot \psi_1}{\lambda_1} \cdot \Delta Q \quad (3.43)$$

Utilizando para ϕ_1 a forma apresentada em (2.30) e para ψ_1 a forma apresentada em (2.33), a equação (3.43) pode ser escrita na forma matricial apresentada em (3.44).

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} \approx \begin{bmatrix} \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \\ \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Nas linhas da matriz em (3.44) temos a sensibilidade de tensão de uma barra k qualquer em relação às injeções de potência de reativa em todas as barras. Nas colunas temos a sensibilidade das tensões de todas as barras em relação à injeção de potência reativa em uma barra m qualquer.

Observando cuidadosamente a matriz da equação (3.44), percebe-se que todas as linhas são formadas por elementos idênticos, sendo cada linha multiplicada respectivamente por cada um dos elementos do autovetor à direita, conforme deixa evidente a equação em (3.45), que representa o passo intermediário entre as equações (3.43) e (3.44).

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} \approx \psi_1 \cdot \frac{1}{\lambda_1} \cdot \phi_1 \approx \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \vdots \\ \phi_{n1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

A matriz Jacobiana J'_{ac} em (3.20) considerada neste trabalho pode ser tomada como uma matriz simétrica em função de sua estrutura e valores. Considerando portanto a matriz J'_{ac} simétrica e real, todos os seus autovalores e autovetores serão reais [45]. Uma vez que a matriz J_{SQV} é gerada a partir da matriz J'_{ac} , também seus autovalores e autovetores serão reais. Logo se todos os autovalores e autovetores da matriz J_{SQV} são valores reais, os vetores formados pelas linhas da matriz dada em (3.44) são colineares. Aquelas linhas da matriz em (3.44) que sejam multiplicados por elementos positivos do autovetor à direita formam o primeiro grupo de barras agrupadas através do autovalor λ_1 . Aquelas linhas da matriz em (3.44) que sejam multiplicados por elementos negativos do autovetor à esquerda formam o segundo grupo de barras agrupadas através do autovalor λ_1 .

Para um melhor entendimento desta condição, vamos arbitrar para a equação (3.45) que $|\lambda_1|=1$, $n=5$, $\phi_1^T = \{-1 \ 0,8 \ -0,6 \ 0,4 \ -0,2\}$ e $\psi_1 = \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}$. Para os valores arbitrados, a Figura 4 representa os vetores formados pelas linhas 1 a 5 da matriz em (3.44).

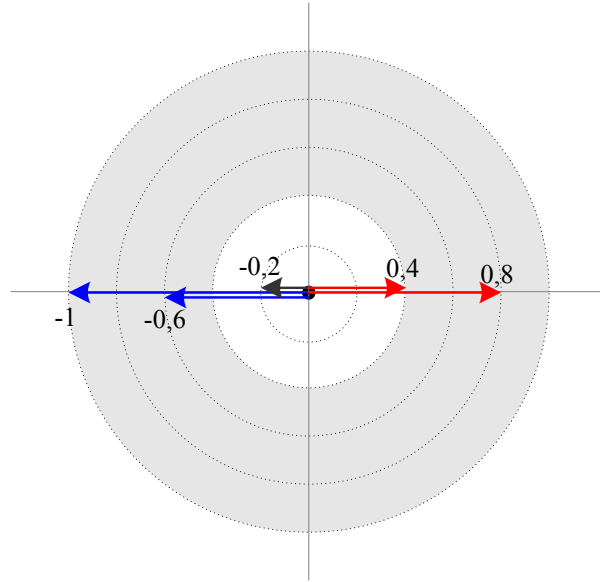


Figura 4 – Mode-Shape da matriz J_{SQV} para o menor autovalor

De um autovalor com módulo pequeno são sempre definidos dois grupos distintos de barras, cujo critério para agrupar as barras é determinado pelos elementos do autovetor à direita, de acordo com o sinal positivo ou negativo. No exemplo da Figura 4, as barras referentes aos elementos -1, -0,6 e -0,2 do *mode-shape* estão em grupo enquanto as barras referentes aos elementos 0,8 e 0,4 do *mode-shape* estão em outro grupo.

Um módulo mínimo deve ser considerado para os elementos do *mode-shape* ao se formar os dois grupos referentes ao autovalor analisado. Se no exemplo anterior o módulo mínimo aceito para os elementos do *mode-shape* fosse igual ou superior a 0,4, a barra referente ao elemento -0,2 não faria parte de nenhum dos dois grupos. As áreas cinza e branca na Figura 4 destacam a escolha do módulo mínimo dos elementos do *mode-shape* para formação das áreas.

No caso de se utilizar dois ou mais autovalores para a determinação das áreas, é necessário se adotar alguns critérios adicionais. Se um grupo de barras que foi definido a partir de um autovalor aparecer em outro autovalor subsequente e

todas as barras apontadas pelo novo autovalor estiverem no mesmo grupo anteriormente definido, pode-se adicionar mais algumas barras cujo módulo dos elementos no *mode-shape* seja superior ao mínimo e que ainda não tenham sido incluídas em nenhum outro grupo anteriormente.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma simplificado do processo de busca das áreas a partir da consideração dos menores autovalores da matriz J_{SQV} . A variável i representa o número de autovalores utilizados pelo algoritmo de busca de áreas, σ o módulo mínimo considerado no *mode-shape*, nb_{em_grupos} o percentual total de barras já inseridas em alguma área, ε_1 o percentual máximo de barras que se quer agrupar e ε_2 o número máximo de autovalores que deve ser utilizado na busca.

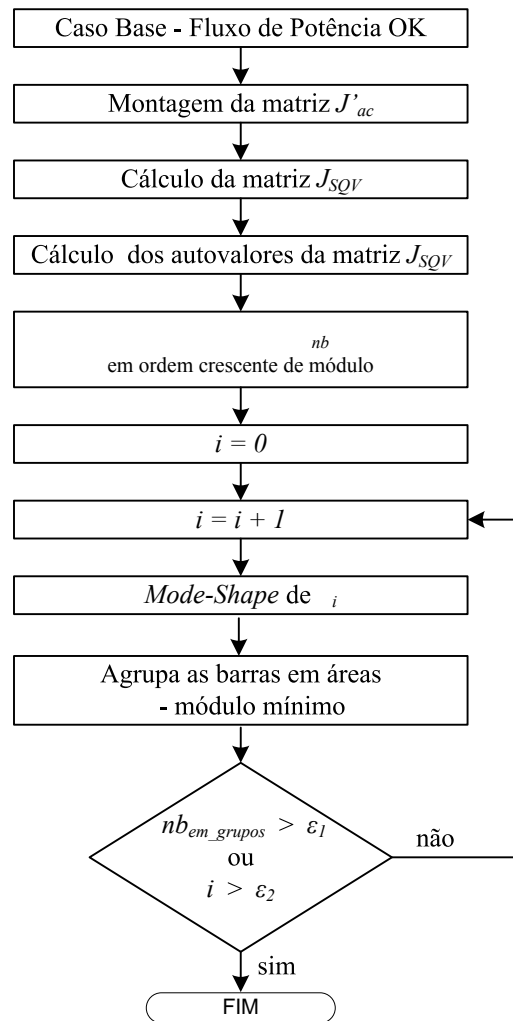


Figura 5 – Fluxograma simplificado da busca de áreas pelos menores autovalores

III.3.3 - Estudo das Características da matriz J_{SQV}

Conforme visto anteriormente, no sistema dado em (3.11), o resíduo ΔQ das equações de potência reativa contém tanto barras do tipo PQ quanto barras do tipo PV (leia-se PV agrupando PV e $V\theta$). A presença das equações de balanço de potência reativa de todas as barras na matriz J_{QV} em (3.11), particularmente a das barras do tipo $V\theta$, pode levar a matriz J_{QV} a uma condição de dependência linear, isto é, uma linha ou coluna pode se tornar combinação linear das demais linhas ou colunas.

Como a matriz J_{QV} é parte da matriz Jacobiana J'_{ac} , de onde é extraída a matriz J_{SQV} , é importante avaliar em que condições esta dependência linear pode ocorrer e influenciar na matriz J_{SQV} .

Para avaliar tal condição, vamos utilizar um sistema exemplo de 3 barras que está na Figura 6 a seguir.

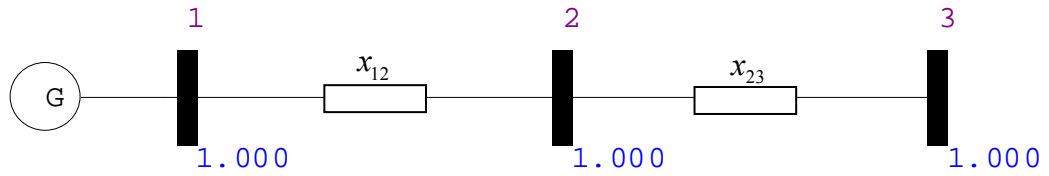


Figura 6 – Sistema radial de 3 barras interligado somente por reatâncias

Para o sistema acima, as equações (a.24) e (a.25) do Apêndice A recebem as seguintes simplificações:

$$V_k = V_m = 1.000 \quad (3.46)$$

$$G_{km} = G_{mk} = 0 \quad (3.47)$$

$$B_{km} = B_{mk} \quad (3.48)$$

$$\cos \theta_{km} = \cos \theta_{mk} \quad (3.49)$$

$$B_{kk} = 0 \quad (3.50)$$

A partir destas simplificações, (a.24) e (a.25) podem ser escritas da seguinte maneira:

$$L_{km} = L_{mk} = -B_{km} \cdot \cos \theta_{km} \quad (3.51)$$

$$G_{km} = G_{mk} = 0 \quad (3.52)$$

Das expressões acima se pode concluir que o termo diagonal representa a soma dos elementos de sua linha ou de sua coluna.

Para o sistema exemplo de 3 barras proposto, a matriz J_{QV} em (3.11) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & 0 \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ 0 & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Como $L_{12} = L_{21}$, $L_{23} = L_{32}$, $L_{11} = L_{12}$, $L_{33} = L_{23}$ e $L_{22} = L_{21} + L_{23}$, a matriz J_{QV} em (3.53) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{11} & 0 \\ L_{11} & L_{11} + L_{33} & L_{33} \\ 0 & L_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Da expressão acima se pode afirmar que a matriz J_{QV} é singular, pois suas linhas e colunas são linearmente dependentes. Em situações normais durante a solução do fluxo de potência, ao adotar-se uma barra de referência para o sistema, retira-se uma linha ou coluna desta matriz, eliminando a singularidade da matriz J_{QV} .

Utilizando a fórmula de Schur dada em (3.55) e (3.56) na matriz J'_{ac} em (3.28) é possível observar que a matriz J'_{ac} torna-se singular se $J_{P\theta}$ ou J_{SQV} forem singulares em (3.55) ou ainda se J_{QV} ou $[J_{P\theta} - J_{PV} \cdot J_{QV}^{-1} \cdot J_{Q\theta}]$ forem singulares em (3.56).

$$J'_{ac} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \Rightarrow \det[J'_{ac}] = \det[J_{P\theta}] \cdot \det[J_{SQV}] \quad (3.55)$$

$$J'_{ac} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \Rightarrow \det[J'_{ac}] = \det[J_{QV}] \cdot \det[J_{P\theta} - J_{PV} \cdot J_{QV}^{-1} \cdot J_{Q\theta}] \quad (3.56)$$

Igualando (3.55) e (3.56), temos a seguinte relação:

$$\det[J_{P\theta}] \cdot \det[J_{SQV}] = \det[J_{QV}] \cdot \det[J_{P\theta} - J_{PV} \cdot J_{QV}^{-1} \cdot J_{Q\theta}] \quad (3.57)$$

Se $\det[J_{QV}]$ é igual a zero, então o $\det[J'_{ac}]$ é zero. Se $\det[J'_{ac}]$ é zero e o $\det[J_{P\theta}]$ é diferente de zero, para que o $\det[J'_{ac}]$ seja zero é necessário que o $\det[J_{SQV}]$ seja nulo. A partir desta dedução, se a matriz J_{QV} possui uma singularidade, tal condição poderá surgir na matriz J_{SQV} refletida no módulo de um de seus autovalores.

Para a metodologia proposta neste trabalho, a matriz J_{QV} não sofrerá ao mesmo tempo todas as simplificações propostas em (3.46) a (3.50). Mesmo não sofrendo as simplificações, a matriz J_{QV} pode vir a ter uma característica de proximidade da singularidade dependendo das características do sistema avaliado. Algum autovalor da matriz J_{QV} pode ter um módulo pequeno que represente esta condição.

Como a matriz J_{SQV} nasce da redução da matriz J'_{ac} em (3.28), algum autovalor pode representar esta condição de dependência linear da matriz J_{QV} , caso as simplificações adotadas de (3.46) a (3.50) apareçam nas equações (a.24) e (a.25).

É importante ressaltar a partir do estudo das equações do Apêndice A que a singularidade da matriz J'_{ac} causada pela matriz J_{QV} está intimamente relacionada à existência dos elementos *shunt* para compensação reativa, seja em barra ou em circuito. Esta compensação está ligada a simplificação feita através de (3.50). Quanto menos elementos *shunt* no sistema, mais linearmente dependentes se tornam as equações de J_{QV} , que contêm as barras do tipo $V\theta$.

Isto equivale a dizer que sem a compensação *shunt* no sistema, o fechamento do balanço reativo será feito todo pela equação da barra tipo $V\theta$, considerando que as linhas de transmissão utilizem o modelo típico de linhas curtas [24].

Outro aspecto importante para a questão da singularidade da matriz J_{QV} é a presença dos transformadores defasadores, que alteram estruturalmente a matriz Jacobiana.

III.3.4 - Seleção de Barras Piloto

Para a obtenção dos nós sensores em [23], foi constatado a partir da expressão (2.58) que os elementos da matriz formada a partir do menor autovalor determinam as maiores contribuições para as variações de tensão em uma barra qualquer. Esta contribuição irá depender essencialmente dos componentes do autovetor v_1 . O componente de v_1 com maior módulo é que elege qual é o nó sensor [52].

Foi utilizado para a determinação das áreas de controle de tensão a partir dos menores autovalores da matriz J_{SQV} o *mode-shape*, que é o mesmo autovetor à direita utilizado para definir quem deve ser o nó sensor em [52]. Como visto anteriormente, o *mode-shape* de um autovalor da matriz J_{SQV} informa sempre duas áreas, de acordo com o sinal do elemento correspondente do *mode-shape*. Baseado no mesmo princípio para a escolha dos nós sensores de que os maiores componentes do autovetor à direita são os nós mais sensíveis à variação da tensão, serão escolhidas como barras piloto as barras PQ com maior módulo no *mode-shape* em cada uma das duas áreas indicadas pelos autovalores avaliados para a definição destas áreas.

Esta definição de barras piloto a partir das barras PQ com os maiores módulos no *mode-shape* dos menores autovalores será posteriormente comparada com um segundo método de definição que será exposto no próximo tópico.

III.4 - Áreas de Controle pela Avaliação da Matriz J_{SQV}

No capítulo anterior foi apresentado o método CVI onde é utilizada a inversa da matriz Jacobiana J_{ac}^{-1} , a qual relaciona as mudanças nas magnitudes da tensão em função da alteração das potências ativa e reativas nas barras de carga, segundo dado pelas submatrizes j e l em (2.7). Através da comparação dos vetores-linha formados pela união das submatrizes j e l para diferentes barras, são consideradas barras coerentes aquelas que têm vetores colineares e têm magnitudes muito próximas.

A comparação dos vetores-linha é feita através da aplicação das expressões (2.25) e (2.26), onde são verificadas respectivamente a colinearidade e a proximidade de valores destes vetores-linha das submatrizes j e l em (2.7).

Com o intuito de comparar e checar os resultados obtidos a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , é proposta neste item a obtenção das áreas de controle de tensão a partir da comparação dos vetores-linha da inversa matriz J_{SQV} , baseado no método CVI. Será utilizado como critério de semelhança entre as barras apenas o teste de colinearidade feito em (2.25). As barras entre si cujo teste dado em (2.25) é menor do que a tolerância ε_1 formarão uma área de controle de tensão.

Como as avaliações por autovalores e autovetores e pelos ângulos das linhas da inversa da matriz J_{SQV} partem da mesma matriz de sensibilidade, espera-se que os resultados obtidos com autovalores e autovetores sejam coerentes, pois esta matriz pode ser obtida com a combinação de seus autovalores e autovetores.

A Figura 7 traz o fluxograma simplificado de busca de áreas de controle de tensão a partir da avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} .

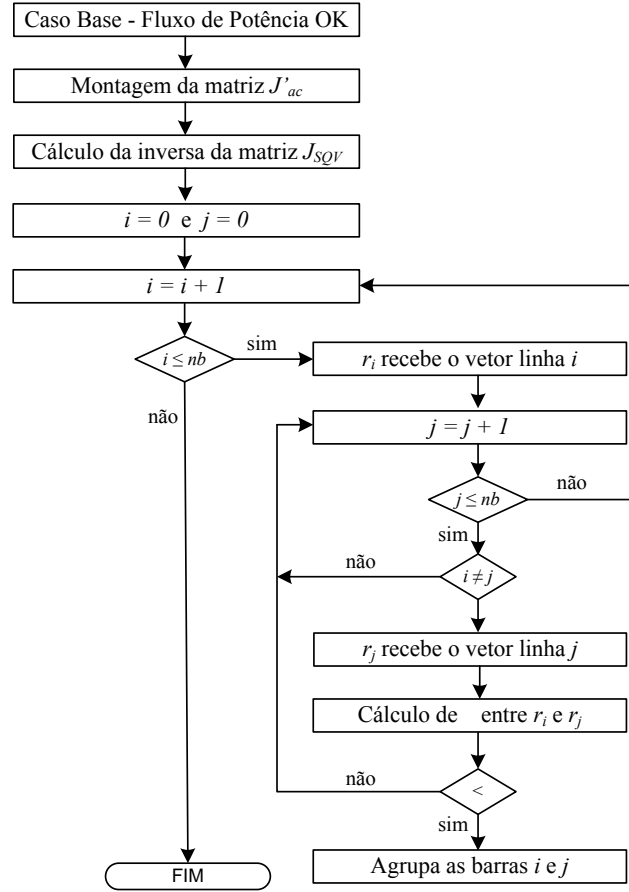


Figura 7 – Fluxograma simplificado da busca de áreas pelas linhas da inversa de J_{SQV}

III.4.1 - Seleção de Barras Piloto

Conforme pode ser observado na Figura 7 do fluxograma simplificado, para a busca de áreas através das linhas da matriz J_{SQV} , calcula-se o cosseno do ângulo formado entre a linha i (ou barra i) e todas das demais linhas j (ou demais barras j) do sistema.

É possível então para cada barra i do sistema calcular uma variável que acumule o módulo dos ângulos entre a barra i e as demais barras que fazem parte da mesma área que a barra i , conforme está em (3.58).

$$\beta_i = \sum_{j \in K} |\delta_{ij}| \quad (3.58)$$

onde K é o conjunto de todas as barras que pertencem à mesma área da barra i e δ_{ij} é o ângulo entre as linhas correspondentes destas barras na matriz J_{SQV} .

De acordo com [32], dentre os critérios já apresentados para escolha de barras piloto dentro das áreas de coerência estão:

- Menor sensibilidade dentro de cada área de coerência de tensão;
- Centro da área de coerência de tensão;
- Maior barra de carga dentro de cada área de coerência de tensão.

Dentre os três discutidos em [32], o segundo (centro da área de coerência de tensão) está ligado ao conceito de distância elétrica apresentado anteriormente e tem como principal argumento o fato de que o centro elétrico de uma área fornece uma boa sensibilidade das mudanças de tensão que ocorrem dentro área. A barra que é considerada como centro elétrico da área é aquela que possui a menor distância elétrica das demais barras da área.

Neste sentido, a expressão desenvolvida em (3.58) traz embutido o mesmo conceito de centro elétrico da área, pois a barra que possui o menor somatório dos ângulos é aquela que está mais próxima das demais barras da área e, portanto, é uma barra que irá capturar melhor a sensibilidade das variações de tensão ocorridas dentro da área. Se a expressão em (3.58) traz a informação da barra que pode ser o centro elétrico da área, a expressão (3.58) será utilizada como critério adicional de escolha de barras piloto na área e será comparada com os resultados obtidos com o critério proposto a partir da avaliação dos elementos do *mode-shape* com maior módulo.

III.5 - Análise de Sensibilidade de Tensão

Esta breve revisão da metodologia de análise de sensibilidade de tensão no problema de fluxo de potência tem como justificativa o fato que esta pode ser usada também como metodologia alternativa de busca de áreas de controle de tensão. Os resultados obtidos na busca de áreas de controle de tensão através da

análise de sensibilidade de tensão servirão também de referência para a validação dos resultados obtidos a partir do cálculo de autovalores e seus autovetores na matriz J_{SQV} .

A análise de sensibilidade [55] em SEP é usada em vários problemas de análise de redes, como por exemplo, na determinação de ações de controle corretivo a serem adotadas em um dado centro de controle do sistema.

A análise de sensibilidade pode ser definida como sendo a relação entre uma pequena variação de uma variável de estado Δx causada por uma pequena variação em uma variável independente ou de controle Δu .

A formulação é baseada nas equações de fluxo de potência, onde a linearização das equações de potência ativa e reativa fornece estimativas de ajustes em Δu para se alcançar uma determinada modificação em Δx . As sensibilidades trazem tendências em um determinado ponto de operação e não possuem a capacidade de prever se um determinado controle irá atingir seu limite.

Seja g a função que representa as equações de fluxo de potência do sistema dado em (3.1). Esta função pode ser posta na seguinte forma:

$$g(x, u) = 0 \quad (3.59)$$

O vetor x representa as variáveis dependentes (V e θ) e u representa as variáveis de controle (ex.: tensão em barra de geração). A perturbação em x causada por alterações em u pode ser obtida através de:

$$\frac{\partial g}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial g}{\partial u} \cdot \Delta u = 0 \quad (3.60)$$

$$\Delta x = - \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial u} \cdot \Delta u \quad (3.61)$$

$$S = - \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial u} \quad (3.62)$$

A matriz S representa a relação de sensibilidade entre a variável dependente e a variável controlada. A matriz $\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]^{-1}$ representa a inversa da matriz Jacobiana. A matriz $\frac{\partial g}{\partial u}$ representa a derivada das equações básicas da formulação do fluxo de potência em relação à variável de controle.

No caso da determinação de áreas de controle, a análise de sensibilidade pode mostrar, por exemplo, quais barras PV mais influenciam as barras PQ , ou quais barras PQ são mais influenciadas por uma injeção de potência reativa em outra barra PQ qualquer.

Para o caso de quais barras PV mais influenciam as barras PQ , deseja-se calcular a relação $\frac{\Delta Q_g^{PV}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$. Neste caso, $\Delta u = \Delta Q_{inj}^{PQ}$ e a equação de sensibilidade é dada por:

$$\Delta Q_g^{PV} = \frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial Q_{inj}^{PQ}} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ} \quad (3.63)$$

Em (3.63), tem-se que:

$$\frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial Q_{inj}^{PQ}} = 0 \quad (3.64)$$

Aplicando (3.64) em (3.63), obtém-se:

$$\Delta Q_g^{PV} = \frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (3.65)$$

Da expressão em (3.65), Δx será função da variação $\Delta u = \Delta Q_{inj}^{PQ}$. A relação entre Δx e ΔQ_{inj}^{PQ} é dada por:

$$\frac{\partial g}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial g}{\partial Q_{inj}^{PQ}} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ} = 0 \Rightarrow \Delta x = -\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial Q_{inj}^{PQ}} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ} \quad (3.66)$$

Substituindo-se a expressão (3.66) em (3.65), obtém-se:

$$\Delta Q_g^{PV} = -\frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial x} \cdot \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial g}{\partial Q_{inj}^{PQ}} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ} \quad (3.67)$$

A derivada das equações de potência ativa e reativa em relação a uma potência reativa injetada na barra k pode ser escrita como:

$$\frac{\partial g}{\partial Q_{inj}^{PQ}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Todos os elementos em (3.68) são nulos exceto no elemento da diagonal na linha k referente ao resíduo da equação de potência reativa ΔQ_k da barra k . O efeito da matriz apresentada em (3.68) na equação (3.67) é que a multiplicação de $\frac{\partial g}{\partial Q_{inj}^{PQ}} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ}$ gera um vetor coluna conforme está em (3.69).

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta Q_{inj}^{PQ} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_{inj}^{PQ} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Logo, a sensibilidade em (3.67) pode ser escrita como:

$$\Delta Q_g^{PV} = -\frac{\partial Q_g^{PV}}{\partial x} \cdot \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_{inj}^{PQ} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Para o caso da determinação de quais barras PQ são mais influenciadas por uma injeção de potência reativa em outra barra PQ qualquer, deseja-se calcular

a seguinte relação $\frac{\Delta V_c^{PQ}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$. Neste caso, a equação de sensibilidade é dada diretamente pela expressão em (3.66).

CAPÍTULO IV -

RESULTADOS

IV.1 - Considerações Iniciais

Com o objetivo de avaliar as metodologias propostas para a definição de áreas de controle de tensão a partir dos menores autovalores da matriz J_{SQV} e também a partir do produto escalar das linhas da matriz J_{SQV} , serão usados os seguintes sistemas teste:

- Sistema 10 barras;
- Sistema 18 barras;
- Sistema IEEE 14 barras;
- Sistema *New England* 39 barras;
- Sistema IEEE 118 barras;
- Sistema S/SE brasileiro 730 barras;
- Sistema S/SE/CO brasileira 2149 barras.

Para avaliar a coerência dos resultados obtidos na determinação de áreas de controle com autovalores e autovetores e com o produto escalar da matriz J_{SQV} , foi executado o módulo de análise de sensibilidade de tensão do Programa de Análise de Redes – ANAREDE [56], de propriedade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Os seguintes sistemas teste foram utilizados:

- Sistema 10 barras;
- Sistema 18 barras;
- Sistema IEEE 14 barras;
- Sistema *New England* 39 barras;

Para os sistemas anteriormente citados, se faz a injeção de potência reativa em cada uma das barras do tipo *PQ* e obtém-se a variação da geração de potência reativa em cada uma das barras do tipo *PV*. Nos itens seguintes deste capítulo, o termo sensibilidade sempre se refere à aplicação da análise de sensibilidade de tensão.

Os resultados da definição das áreas de controle de tensão serão apresentados em seguida dentro de cada um dos sistemas teste. Os dados de alguns destes sistemas estão no Apêndice B.

O resultado referente à escolha de barras piloto também será apresentado a seguir, levando em consideração apenas os sistemas de maior porte

IV.2 - Sistema 10 barras

A rede elétrica apresentada na Figura 8 tem como origem o sistema apresentado em [9], onde o mesmo foi utilizado para avaliar a interação dinâmica adversa entre duas malhas de CST, sendo o sistema dividido em 2 partes: uma parte à direita da barra 130 e outra parte à esquerda da barra 30. Entre as duas, há uma reatância jX variável.

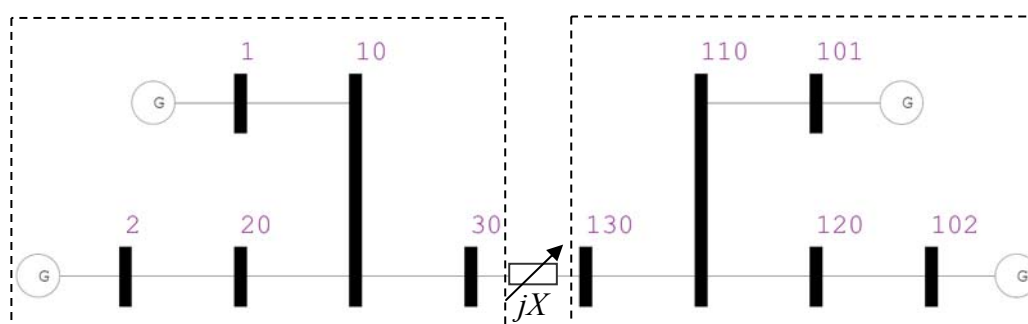


Figura 8 – Sistema 10 barras

Para o estudo de definição das áreas, o sistema da Figura 8 foi modificado em relação ao original em [9]. As potências geradas nas barras 1 e 2 (90 e 30 MW respectivamente) são diferentes das geradas nas barras 101 e 102 (85 e 25 MW). Esta diferença nas potências geradas é consequência da diferença entre as duas cargas existentes nas barras 30 e 130, que são respectivamente 120 e 110 MW. Os parâmetros dos circuitos e a topologia são idênticos nas duas áreas da Figura 8. Os dados deste sistema podem ser consultados no Apêndice B.

Destaca-se que os geradores da barra 1 e da barra 101 foram considerados 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%.

IV.2.1 - Baixa impedância de interligação

IV.2.1.1 - Áreas por sensibilidade

Com o objetivo de se obter áreas de controle de tensão, foi executada uma análise de sensibilidade de tensão para o sistema da Figura 8 com $jX = 0,01\%$.

Obteve-se a relação $\frac{\Delta Q_g^{PV}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$, que representa a variação da potência reativa

gerada em todas as barras PV em relação a uma injeção de potência reativa realizada em cada uma das barras PQ do sistema. O resultado está na Tabela 1.

A Tabela 1 traz nas colunas as barras PQ analisada e nas linhas os resultados da variação de potência reativa nas barras PV. Para cada barra PQ, há 3 colunas internas: (i) número das barras PV em ordem decrescente do valor de sensibilidade; (ii) valor de sensibilidade $\frac{\Delta Q_g^{PV}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$ em ordem decrescente; (iii)

normalização, em porcentagem, dos valores de sensibilidade da coluna (ii) pelo maior valor de (ii).




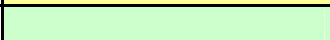

Tabela 1 – Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Tabela 1 – Valores de Normalização do Sistema 1 – Barras PQ (0,04%)									
Barras PQ									
10			20			30			
Barras PV	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
	2	-0,458741	100,0	2	-0,730267	100,0	2	-0,308834	100,0
	1	-0,318283	69,4	1	-0,161091	22,1	102	-0,308074	99,8
	102	-0,151258	33,0	102	-0,076555	10,5	1	-0,214693	69,5
	101	-0,105981	23,1	101	-0,05364	7,3	101	-0,214456	69,4
110			120			130			
Barras PV	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
	102	-0,457953	100,0	102	-0,729591	100,0	2	-0,308665	100,0
	101	-0,318071	69,5	101	-0,160877	22,1	102	-0,308244	99,9
	2	-0,151456	33,1	2	-0,076605	10,5	1	-0,214576	69,5
	1	-0,105937	23,1	1	-0,053582	7,3	101	-0,214572	69,5

O objetivo da coluna (iii), denominada α , é destacar de forma mais rápida os geradores que tem maior ou menor influência sobre a barra PQ em questão.

Uma vez que os valores da coluna α variam de 0 a 100, pode-se dividir este intervalo em faixas e atribuir uma determinada cor a cada faixa do intervalo, conforme foi definido na Tabela 2.

Tabela 2 – Faixas e cores para os valores de α

Classificação de α		
Faixa	Cores	
$0 \leq \alpha \leq 20$	Vermelho	
$20 < \alpha \leq 40$	Laranja	
$40 < \alpha \leq 60$	Amarelo	
$60 < \alpha \leq 80$	Verde Claro	
$80 < \alpha \leq 100$	Verde Escuro	

Tal definição de faixas permite criar outra tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV. Para cada coluna α da Tabela 1, cria-se uma nova coluna onde, ao invés do valor de α , tem-se a posição que a barra PV ocupa na ordem decrescente do valor de sensibilidade. Além disso, o fundo de cada célula desta nova coluna possui a cor corresponde à faixa que α ocupa na Tabela 2. O resultado obtido é mostrado na Tabela 3.

Analisando-se a Tabela 3, pode-se verificar, por exemplo, que para a barra 20, o gerador mais influente é o gerador 2, em função do valor 1 na célula (o gerador 2 é o primeiro que aparece na coluna α da barra 20) e a cor verde escuro indica que α está entre 80 e 100, como pode ser conferido na Tabela 1.

Para barra 20, percebe-se ainda que os geradores com menor influência são os geradores em 102 e 103, pois estes são o penúltimo e o último que aparecem na ordem da coluna α da Tabela 1 para barra 20. A cor vermelha indica que o valor de α para os geradores em 102 e 103 está abaixo de 20%, o que demonstra que o gerador 2 tem influência muito mais significativa. Portanto, este formato da Tabela 3, que é dependente dos valores obtidos da Tabela 1, permitirá que seja feita a divisão das áreas do sistema, de acordo com as semelhanças existentes entre as barras *PQ* com relação à sensibilidade às barras *PV*. Este formato da Tabela 3 será adotado na descrição de todos os resultados estudados através da sensibilidade neste trabalho.

Tabela 3 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

		Barras PQ					
		10	20	30	130	120	110
Barras PV	1	2 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a
	2	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a
	102	3 ^a	3 ^a	2 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a
	101	4 ^a	4 ^a	4 ^a	3 ^a	2 ^a	2 ^a

Examinando-se então a Tabela 3 para a determinação das áreas de controle de tensão, pode-se observar pelo exame das cores que:

- Para as barras 10 e 20, os geradores nas barras 101 e 102 têm pouca influência e os geradores nas barras 1 e 2 têm grande influência;
- Para as barras 110 e 120, os geradores nas barras 1 e 2 têm pouca influência e os geradores nas barras 101 e 102 têm grande influência;
- As barras 30 e 130 estão fortemente acopladas dado que $jX = 0,01\%$ e todos os geradores (barras 1, 2, 101 e 102) exercem influência significativa sobre ambas. A barra 30 é mais influenciada pelo gerador na barra 2 e a barra 130 é mais influenciada pelo gerador na barra 102.

Examinando-se então a Tabela 3 para a determinação das áreas de controle de tensão, pode-se observar pelo exame das cores que:

A partir destas considerações baseadas na análise de sensibilidade, pode-se dividir o sistema de acordo com demonstrado pela Figura 9.

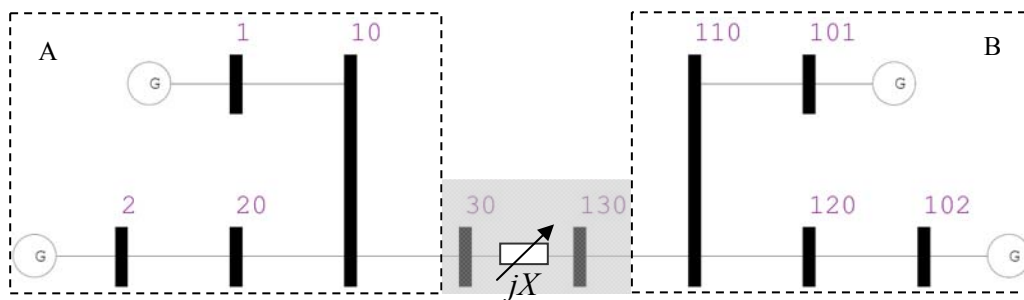


Figura 9 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

A divisão das barras nas áreas levantadas a partir da análise de sensibilidade é dada pela Tabela 4. As barras 30 e 130, destacadas na Figura 9 pelo fundo cinza, representam a faixa de transição entre as áreas A e B, visto que ambas as barras recebem grande influência de geradores da área A e da área B. Logo, ambas as barras podem pertencer tanto a uma área quanto a outra, sob a ótica do controle exercido pelas barras *PV*.

Tabela 4 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20	1, 2
B	110, 120	101, 102
Transição	30, 130	

IV.2.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema 10 barras obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 50% e 5, e o valor de σ considerado é de 0,3.

Os autovalores da matriz J_{SQV} são dados, em ordem crescente, pela Tabela 5. O primeiro autovalor ($\lambda_1 = 0,104248$) possui módulo bem pequeno, em comparação com os demais. O *mode-shape* deste autovalor é dado pela Figura 10.

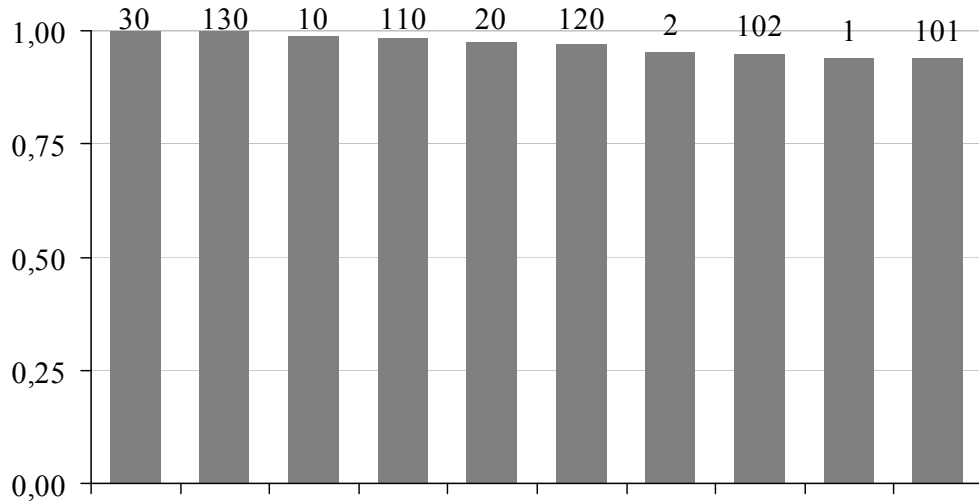


Figura 10 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Este *mode-shape*, onde todas as barras participam com módulo muito semelhante, se deve ao fato de que a adição das equações de potência reativa de todos os geradores, incluindo as barras de referência, na matriz J_{QV} resulta em um grupo de equações que se tornam próximos de ser linearmente dependentes. Esta condição foi demonstrada anteriormente no capítulo de metodologia.

Tabela 5 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Autovalores (λ_i)	
<i>i</i>	Módulo
1	0,104248
2	1,946303
3	5,190499
4	5,205562
5	8,126815
6	23,612701
7	26,899170
8	46,706490
9	48,010019
10	19584,449828

Uma vez que J_{SQV} deriva de J_{QV} , esta situação trazida pelo primeiro autovalor pode estar presente e pode ser útil para a identificação de áreas quando há partes do sistema muito desacopladas, que não é o caso do sistema em avaliação neste tópico.

Analisado o primeiro autovalor, pode-se partir para a avaliação do segundo autovalor. O *mode-shape* referente ao autovalor $\lambda_2 = 1,946303$ é apresentado na Figura 11.

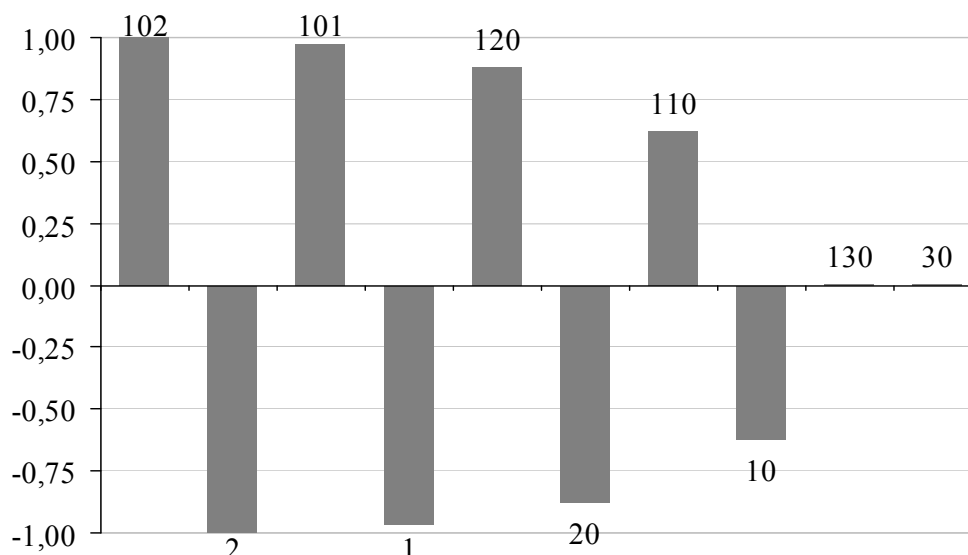


Figura 11 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Neste *mode-shape* percebe-se a divisão do sistema em 2 grupos, sendo um composto pelas barras 2, 1, 20 e 10, e outro pelas barras 102, 101, 120 e 110. Na medida em que as barras se aproximam das barras 30 e 130 há uma queda do valor do módulo. Já as barras 30 e 130 não participam de nenhum dos grupos em função do módulo próximo de zero e abaixo da tolerância σ , sendo este resultado coerente com a sensibilidade destas barras mostrada na Tabela 3. Percebe-se através da sensibilidade que 30 e 130 recebem influência significativa de todos os geradores, não podendo pertencer a nenhum dos grupos indicados. Portanto, o resultado obtido através do *mode-shape* mostra-se coerente com a sensibilidade para as barras 30 e 130.

Como após a avaliação do *mode-shape* de $\lambda_2 = 1,946303$ os critérios ε_1 e ε_2 do algoritmo são atendidos, é encerrada a busca de áreas através dos menores autovalores. A divisão das áreas dada pelo *mode-shape* de λ_2 é idêntica a realizada pela análise de sensibilidade, que está mostrada na Figura 9.

Mesmo havendo encerrado a divisão por áreas através do algoritmo de busca através dos autovalores, a seguir serão apresentados os *mode-shapes* dos

próximos autovalores de menor módulo com o intuito de observar que tipo de informação traz os autovalores não utilizados na busca pelas áreas.

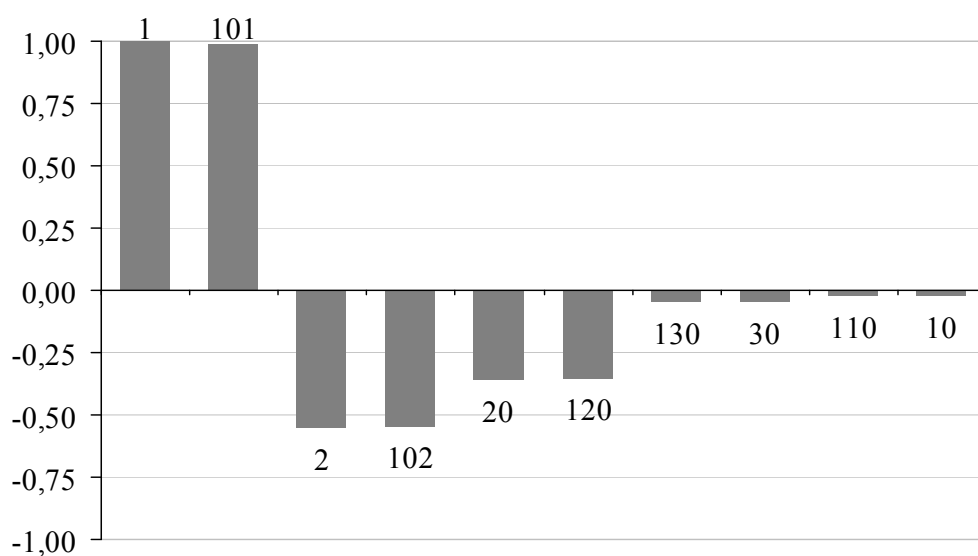


Figura 12 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

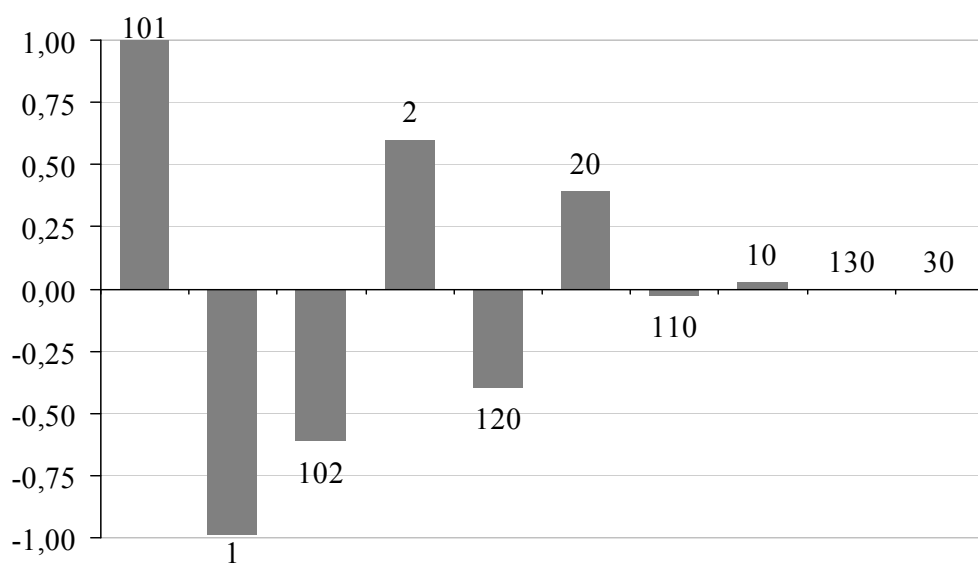


Figura 13 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

No *mode-shape* da Figura 12 e da Figura 13 não há nenhuma informação direta sobre as áreas de controle.

IV.2.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\arccos(0,9995)$, que representada um ângulo de 1,812 graus. O resultado obtido está na Figura 14.

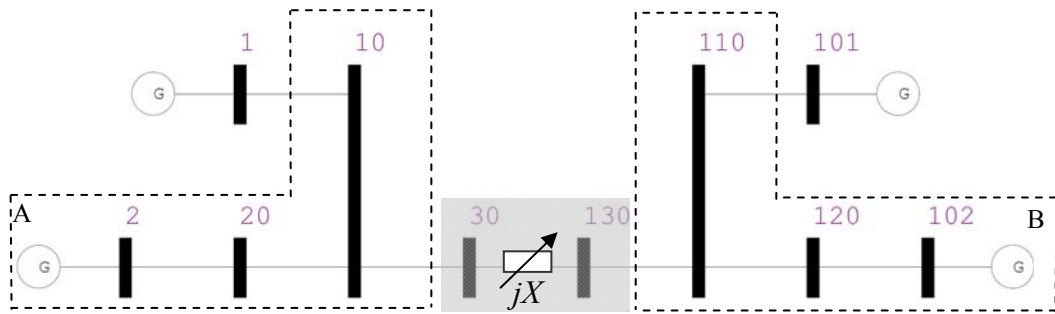


Figura 14 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} sistema 10 barras ($jX=0,01\%$)

As barras 1 e 101 não foram inseridas em virtude da tolerância ε_1 muito pequena que foi adotada para a divisão das áreas. Mas estas barras poderiam ser consideradas de suas respectivas áreas de conexão por uma simples inspeção da condição topológica.

IV.2.1.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , estão exibidas na Tabela 6 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Pela observação do *mode-shape* da Figura 11, observa-se que para a área A as barras 20 e 10 são as que possuem maior módulo e para a área B as barras 120

e 110. Pela equação (3.58), as barras indicadas foram as mesmas obtidas pela observação do *mode-shape*.

Tabela 6 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{sov}	
Área	Barras	Área	Barras
A	20 e 10	A	20 e 10
B	120 e 110	B	120 e 110

IV.2.2 - Alta impedância de interligação

A mesma análise feita para o sistema da Figura 8 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.

IV.2.2.1 - Áreas por sensibilidade

O resultado da sensibilidade para o sistema 10 barras com esta configuração de jX está na Tabela 7. Para esta configuração, espera-se que as áreas obtidas reflitam o desacoplamento causado pela reatância entre as barras 30 e 130, que separa eletricamente o sistema em duas partes.

Conforme as faixas e cores definidas pela Tabela 2 para as colunas α , pode-se criar uma nova tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV para $jX = 10000\%$ no sistema 10 barras. A Tabela 8 traz este resultado.

Tabela 7 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Barras PQ									
Barras PV	10			20			30		
	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
	2	-0,611087	100,0	2	-0,807273	100,0	2	-0,618442	100,0
	1	-0,42501	69,5	1	-0,215241	26,7	1	-0,430121	69,5
	102	-0,000579	0,1	102	-0,000293	0,0	102	-0,001157	0,2
	101	-0,000414	0,1	101	-0,00021	0,0	101	-0,00082	0,1
Barras PV	110			120			130		
	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
	102	-0,607264	100,0	102	-0,805209	100,0	102	-0,613197	100,0
	101	-0,422509	69,6	101	-0,213577	26,5	101	-0,426631	69,6
	2	-0,000581	0,1	2	-0,000294	0,0	2	-0,00117	0,2
	1	-0,000418	0,1	1	-0,000211	0,0	1	-0,000834	0,1

Tabela 8 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

		<i>Barras PQ</i>					
		<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>	<i>130</i>	<i>120</i>	<i>110</i>
<i>Barras PV</i>	<i>1</i>	2ª	2ª	2ª	4ª	4ª	4ª
	<i>2</i>	1ª	1ª	1ª	3ª	3ª	3ª
	<i>102</i>	3ª	3ª	3ª	1ª	1ª	1ª
	<i>101</i>	4ª	4ª	4ª	2ª	2ª	2ª

Examinando-se a Tabela 8 para a determinação das áreas pela observação das cores existentes, é possível perceber que:

- Para as barras 10, 20 e 30, os geradores nas barras 101 e 102 têm baixa influência e os geradores nas barras 1 e 2 têm grande influência;
- Para as barras 110, 120 e 130, os geradores nas barras 1 e 2 têm baixa influência e dos geradores nas barras 101 e 102 têm grande influência.

As barras 30 e 130 estão fracamente acopladas, dado que $jX = 10000\%$. O sistema 10 barras é então separado em duas áreas distintas através da reatância do circuito 30 - 130. Logo, observadas as considerações sobre o resultado da sensibilidade, pode-se dividir o sistema de acordo com demonstrado pela Figura 15.

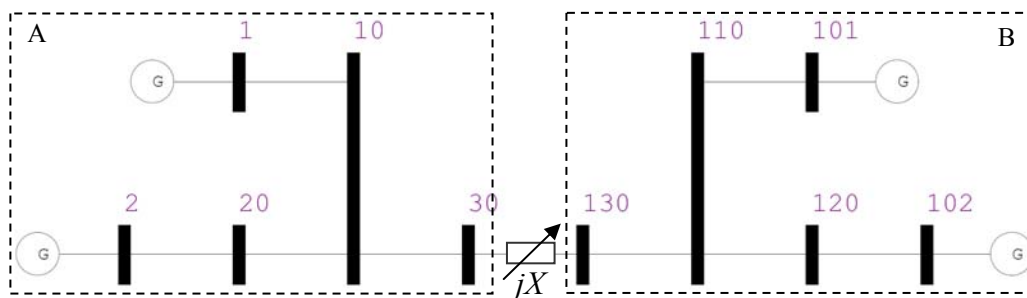


Figura 15 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Comparando-se este resultado com o obtido para $jX = 0,01\%$, nota-se que uma mudança na condição das barras 30 e 130. Para reatância baixa, estas barras formavam uma área de transição onde todos os geradores tinham influência. Para reatância alta, a barra 30 passa a ser influenciada somente pelos geradores da barra 1 e 2 e a barra 130 pelos geradores das barras 101 e 102.

A subdivisão do sistema dada através da análise de sensibilidade pode ser conferida também através da Tabela 9.

Tabela 9 – Áreas por sensibilidade do Sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20, 30	1, 2
B	110, 120, 130	101, 102

IV.2.2.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema 10 barras obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 50% e 5, e o valor de σ considerado é de 0,3. Os autovalores da matriz J_{SQV} para $jX = 10000\%$ são dados, em ordem crescente, pela Tabela 10.

O *mode-shape* para o autovalor $\lambda_1 = 0,092915$ é dado pela Figura 16. Neste *mode-shape*, a área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,3 que são as barras 130, 110, 120, 102 e 101.

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

Autovalores (λ_i)	
i	Módulo
1	0,092915
2	0,111448
3	5,186281
4	5,194957
5	8,114296
6	8,150437
7	26,871642
8	26,928520
9	47,954054
10	48,064370

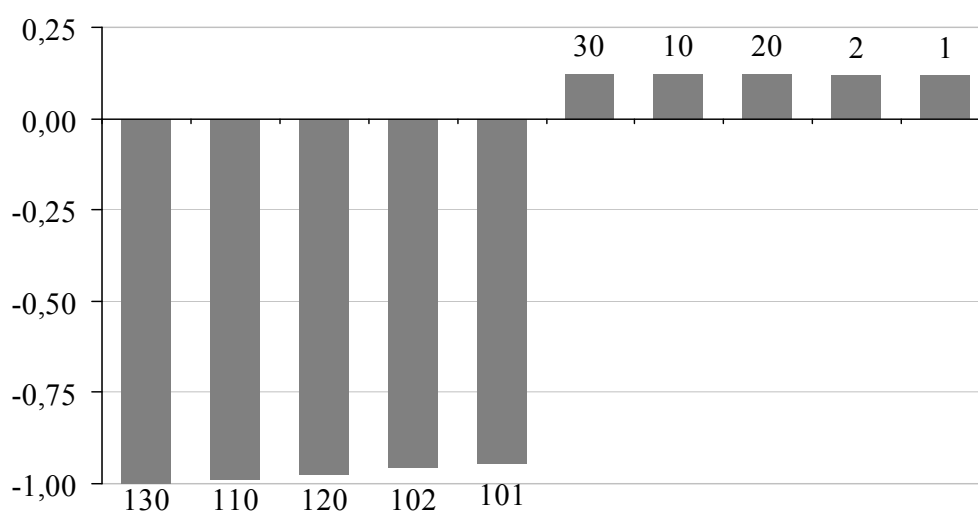


Figura 16 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

O *mode-shape* para o autovalor $\lambda_2 = 0,111448$ é dado pela Figura 17. Neste *mode-shape*, a área é definida pelas barras cujo módulo é superior a 0,3 que são as barras 30, 10, 20, 2 e 1.

Os autovalores λ_1 e λ_2 são referentes à característica de singularidade da matriz J_{SQV} e indicam que há no sistema 10 barras 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.

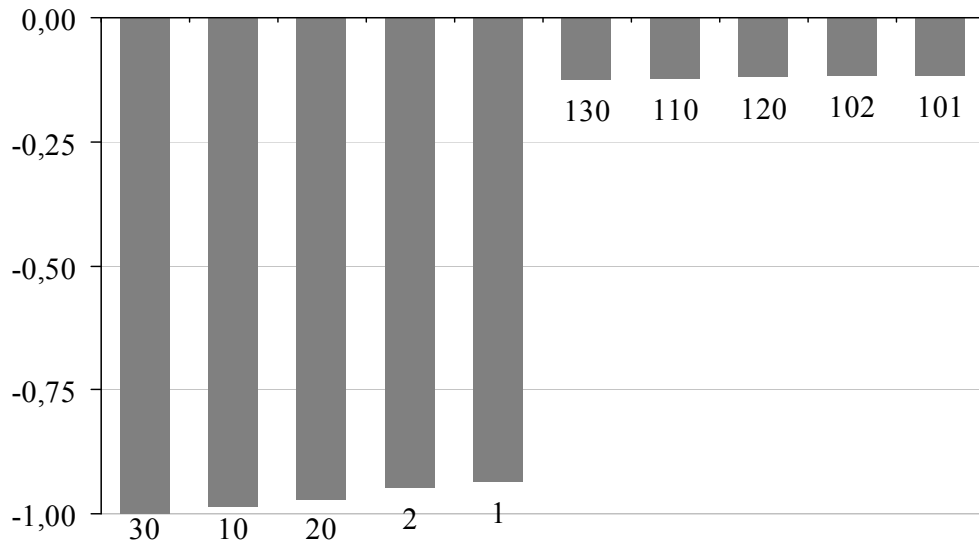


Figura 17 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Como após a avaliação do *mode-shape* de $\lambda_2 = 0,111448$ os critérios ε_1 e ε_2 do algoritmo são atendidos, é encerrada a busca de áreas através dos menores autovalores. Na Figura 15 está a divisão através dos menores autovalores.

IV.2.2.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\text{acos}(0,995)$, que representada um ângulo de 5,732 graus. O resultado obtido está na Figura 15, ou seja, é o mesmo obtido anteriormente com os menores autovalores.

IV.2.2.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da

inversa da matriz J_{SOV} , estão exibidas na Tabela 11 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Pela observação do *mode-shape* da Figura 16, observa-se que para a área B as barras 130 e 110 são as que possuem maior módulo e para a área A as barras 30 e 10. Pela equação (3.58), as barras indicadas foram 10 e 20 para área A e as barras 110 e 120 para a área B.

Tabela 11 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SOV}	
Área	Barras	Área	Barras
A	30 e 10	A	10 e 20
B	130 e 110	B	110 e 120

IV.3 - Sistema 18 barras

No sistema 10 barras com alta impedância os autovalores λ_1 e λ_2 informam que há duas áreas muito desacopladas. Cabe avaliar se no interior de cada área pode existir subáreas de controle. Como visto na sensibilidade do sistema 10 barras com alta impedância, dentro de cada área as barras *PQ* têm comportamento semelhante, não havendo necessidade de divisão interna. Não há também informação significativa sobre outras áreas de controle nos demais autovalores.

Para comprovar que os autovalores identificariam áreas dentro de uma área proveniente de um desacoplamento, duplicou-se o sistema 10 barras, conforme está na Figura 18, a fim de verificar a existência desta divisão nos autovalores do sistema, gerando o sistema 18 barras.

A partir do sistema original na Figura 8, o sistema 18 barras nada mais é do que uma duplicação do sistema da Figura 8, conforme está indicado na Figura 18, 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.

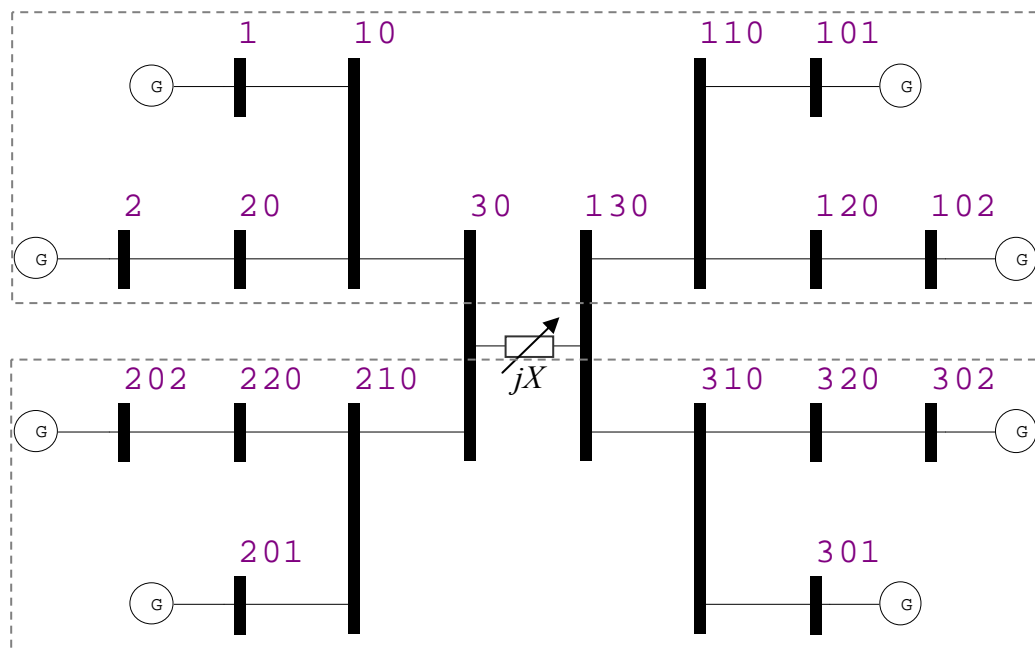


Figura 18 – Sistema 18 barras

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

IV.3.1 - Baixa impedância de interligação

IV.3.1.1 - Áreas por sensibilidade

O resultado da sensibilidade para o sistema 18 barras com esta configuração de jX está na Tabela 12. Conforme as faixas e cores definidas pela Tabela 2 para as colunas α , pode-se criar uma nova tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV para $jX=0,01\%$ no sistema 18 barras. A Tabela 13 traz este resultado. Examinando-se então a Tabela 13 para a determinação das áreas pela observação das cores existentes, é possível perceber que:

- Para as barras 10 e 20, os geradores nas barras 1 e 2 têm grande influência;
- Para as barras 210 e 220, os geradores nas barras 201 e 202 têm grande influência;

- Para as barras 310 e 320, os geradores nas barras 301 e 302 têm grande influência;
- Para as barras 110 e 120, os geradores nas barras 101 e 102 têm grande influência;
- As barras 30 e 130 são influenciadas por todos os geradores do sistema.

Tabela 12 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Barras PQ									
10				20			210		
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)		Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
Barras PV	2	-0,383388	100,0	2	-0,692091	100,0	202	-0,383388	100,0
	1	-0,265885	69,4	1	-0,13459	19,4	201	-0,265885	69,4
	202	-0,076356	19,9	202	-0,038651	5,6	2	-0,076356	19,9
	302	-0,075287	19,6	302	-0,03811	5,5	302	-0,075287	19,6
	102	-0,075287	19,6	102	-0,03811	5,5	102	-0,075287	19,6
	201	-0,053882	14,1	201	-0,027275	3,9	1	-0,053882	14,1
	301	-0,052382	13,7	101	-0,026516	3,8	301	-0,052382	13,7
	101	-0,052382	13,7	301	-0,026516	3,8	101	-0,052382	13,7
220				30			130		
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)		Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
Barras PV	202	-0,692091	100,0	2	-0,154616	100,0	2	-0,154444	100,0
	201	-0,13459	19,4	202	-0,154616	100,0	202	-0,154444	100,0
	2	-0,038651	5,6	302	-0,153864	99,5	302	-0,154034	99,7
	302	-0,03811	5,5	102	-0,153864	99,5	102	-0,154034	99,7
	102	-0,03811	5,5	1	-0,10754	69,6	1	-0,107421	69,6
	1	-0,027275	3,9	201	-0,10754	69,6	201	-0,107421	69,6
	301	-0,026516	3,8	301	-0,107053	69,2	101	-0,107172	69,4
	101	-0,026516	3,8	101	-0,107053	69,2	301	-0,107172	69,4
320				310			120		
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)		Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
Barras PV	302	-0,691758	100,0	302	-0,383089	100,0	102	-0,691758	100,0
	301	-0,134799	19,5	301	-0,266541	69,6	101	-0,134799	19,5
	2	-0,038144	5,5	2	-0,075423	19,7	2	-0,038144	5,5
	202	-0,038144	5,5	202	-0,075423	19,7	202	-0,038144	5,5
	102	-0,038043	5,5	102	-0,075223	19,6	302	-0,038043	5,5
	1	-0,02653	3,8	1	-0,052459	13,7	1	-0,02653	3,8
	201	-0,02653	3,8	201	-0,052459	13,7	201	-0,02653	3,8
	101	-0,026469	3,8	101	-0,052337	13,7	301	-0,026469	3,8
110									
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)							
Barras PV	102	-0,383089	100,0						
	101	-0,266541	69,6						
	2	-0,075423	19,7						
	202	-0,075423	19,7						
	302	-0,075223	19,6						
	1	-0,052459	13,7						
	201	-0,052459	13,7						
	301	-0,052337	13,7						

Tabela 13 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

		Barras PQ									
		10	20	210	220	30	130	320	310	120	110
Barras PV	1	2 ^a	2 ^a	6 ^a	6 ^a	5 ^a	5 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a
	2	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a
	202	3 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a	2 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a
	201	6 ^a	6 ^a	2 ^a	2 ^a	6 ^a	6 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a
	301	7 ^a	8 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	8 ^a	2 ^a	2 ^a	8 ^a	8 ^a
	302	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	3 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a	5 ^a	5 ^a
	102	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	4 ^a	4 ^a	5 ^a	5 ^a	1 ^a	1 ^a
	101	8 ^a	7 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a	7 ^a	8 ^a	8 ^a	2 ^a	2 ^a

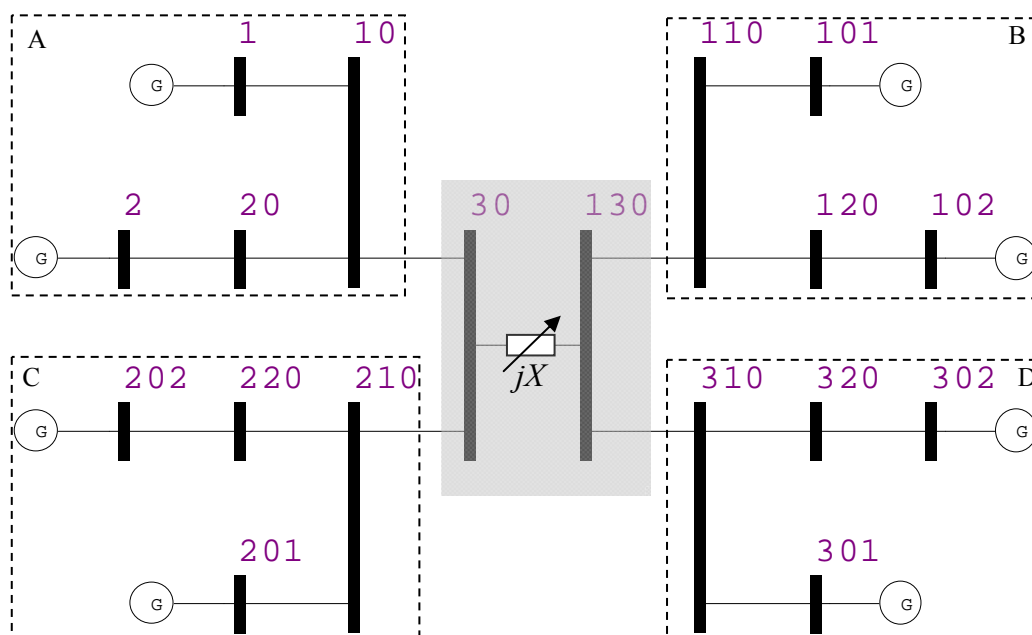


Figura 19 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Logo, observadas as considerações sobre o resultado da sensibilidade, pode-se dividir o sistema de acordo com demonstrado pela Figura 19. A subdivisão do sistema dada através da análise de sensibilidade pode ser conferida também através da Tabela 14.

Tabela 14 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20	1, 2
B	110, 120	101, 102
C	210, 220	201, 202
D	310, 320	301, 302
Transição	30 e 130	-

IV.3.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema 18 barras obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 70% e 10, e o valor de σ considerado é de 0,5. Os autovalores da matriz J_{SQV} para $jX = 0,01\%$ são dados, em ordem crescente, pela Tabela 15.

Tabela 15 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Autovalores (λ_i)	
i	Módulo
1	0,116746
2	1,918909
3	1,925171
4	1,946197
5	5,193416
6	5,199762
7	5,199796
8	5,206784
9	11,800340
10	23,571746
11	23,592285
12	23,605244
13	31,479071
14	46,670849
15	46,688706
16	46,698998
17	50,510951
18	19594,476516

O *mode-shape* para o autovalor $\lambda_1 = 0,116746$ é dado pela Figura 20. Este *mode-shape* é caracterizado pela questão da dependência linear da matriz J_{SQV} .

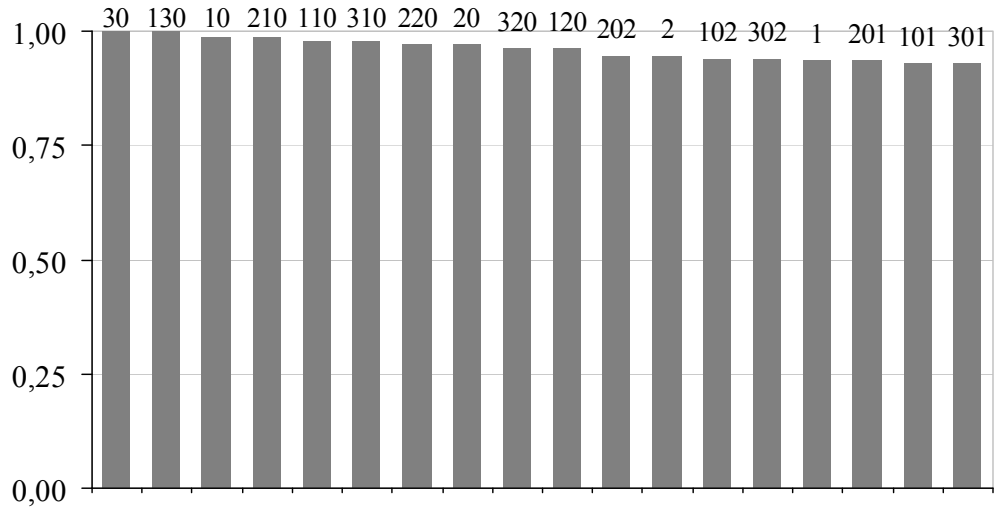


Figura 20 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

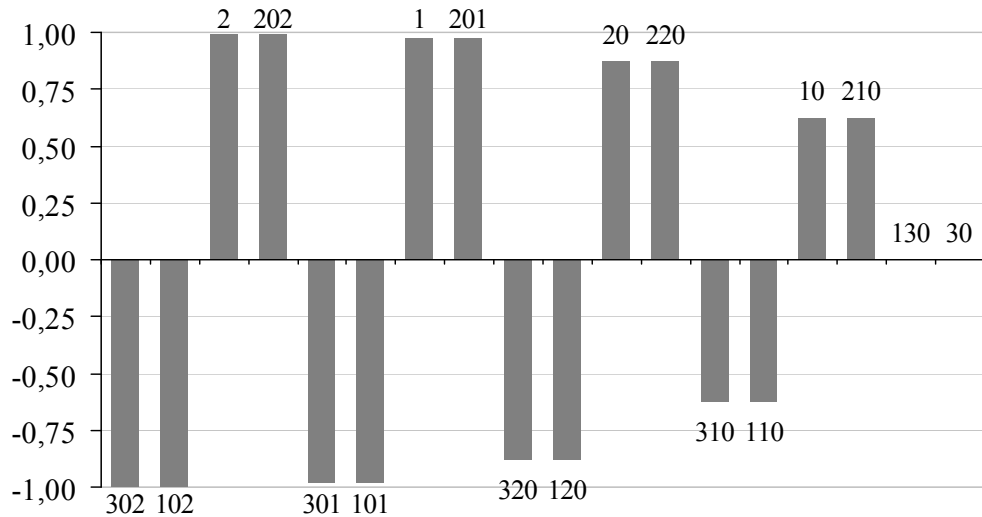


Figura 21 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

O *mode-shape* para o autovalor $\lambda_2 = 1,918909$ é dado pela Figura 21. Neste *mode-shape*, a área é definida pelas barras cujos módulos são superiores a 0,5. Como após a avaliação do *mode-shape* de $\lambda_2 = 1,918909$ os critérios ε_1 e ε_2 do algoritmo são atendidos, é encerrada a busca de áreas através dos menores autovalores dividindo o sistema 18 barras em duas áreas. Embora os critérios do algoritmo já estejam atendidos, prosseguiremos analisando os autovalores seguintes. O *mode-shape* para o autovalor $\lambda_3 = 1,925171$ é dado pela Figura 22 e o *mode-shape* para o autovalor $\lambda_4 = 1,946197$ é dado pela Figura 23.

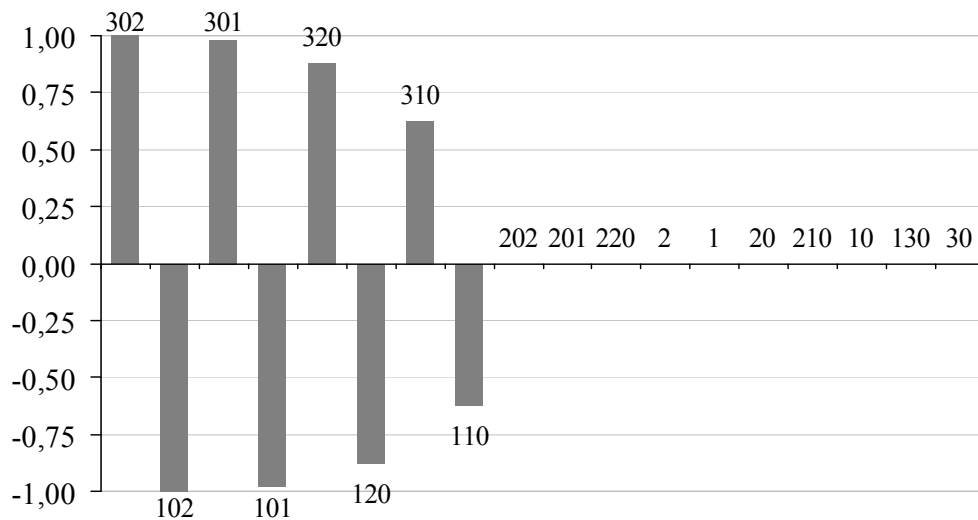


Figura 22 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

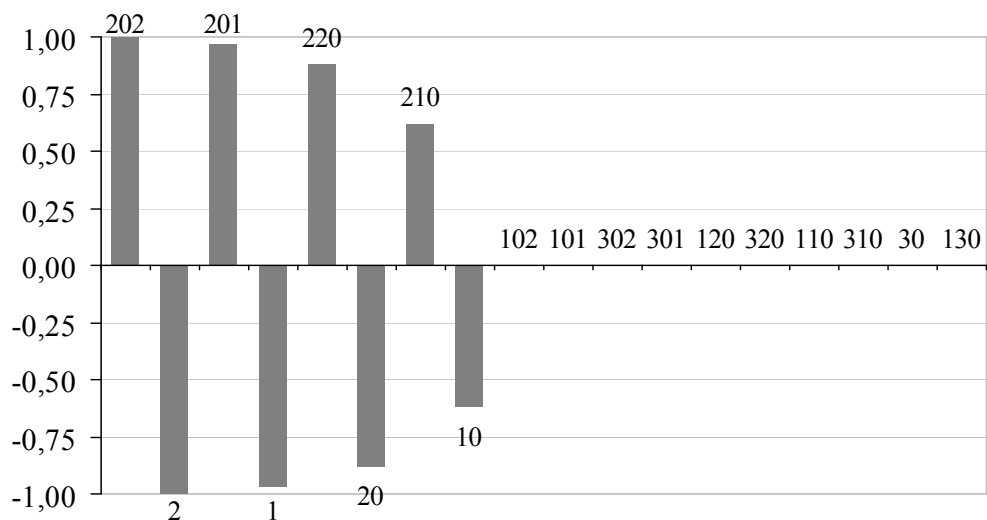


Figura 23 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Nota-se que os autovalores λ_3 e λ_4 subdividem as áreas que foram determinadas através do autovalor λ_1 , mostrando a subdivisão dentro de uma área que foi previamente estabelecida. Se considerarmos na montagem das áreas também os autovalores λ_3 e λ_4 , o resultado obtido será o mesmo encontrado com a sensibilidade, que determinou as áreas A, B, C e D da Figura 19 ou da Tabela 14.

IV.3.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\arccos(0,9985)$, que representada um ângulo de 3,14 graus. O resultado obtido está na Tabela 16. A diferença em relação à sensibilidade e aos autovalores está na ausência dos geradores 1, 101, 201 e 301 em virtude da tolerância ε_1 muito pequena que foi adotada para a divisão das áreas. Mas estas barras poderiam ser consideradas de suas respectivas áreas de conexão por uma simples inspeção da condição topológica.

Tabela 16 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=0,01\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20	2
B	110, 120	102
C	210, 220	202
D	310, 320	302
Transição	30 e 130	-

IV.3.1.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , estão exibidas na Tabela 17 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Pela observação dos *mode-shape* da Figura 22 e Figura 23, nota-se que para a área A as barras PQ 20 e 10 possuem maior módulo, para a área B 120 e 110, para a área C 220 e 210 e para a área D 320 e 310, sendo estas as barras candidatas. As mesmas barras são indicadas através da equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , conforme destaca a Tabela 17.

Tabela 17 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=0,01\%$)

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SQV}	
Área	Barras	Área	Barras
A	20 e 10	A	20 e 10
B	120 e 110	B	120 e 110
C	220 e 210	C	220 e 210
D	320 e 310	D	320 e 310

IV.3.2 - Alta impedância de interligação

IV.3.2.1 - Áreas por sensibilidade

O resultado da sensibilidade para o sistema 18 barras com esta configuração de jX está na Tabela 18. Conforme as faixas e cores definidas pela Tabela 2 para as colunas α , pode-se criar uma nova tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV para $jX = 10000\%$ no sistema 18 barras. A Tabela 19 traz este resultado.

Tabela 18 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Tabela 10 – Barras PQ									
Barras PQ									
10				20			210		
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)		Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)
Barras PV	2	-0,459081	100,0	2	-0,730291	100,0	202	-0,459081	100,0
	1	-0,318526	69,4	1	-0,161314	22,1	201	-0,318526	69,4
	202	-0,152323	33,2	202	-0,077142	10,6	2	-0,152323	33,2
	201	-0,106718	23,2	201	-0,054046	7,4	1	-0,106718	23,2
	302	-0,000135	0,0	302	-0,000069	0,0	302	-0,000135	0,0
	102	-0,000135	0,0	102	-0,000069	0,0	102	-0,000135	0,0
	301	-0,000094	0,0	301	-0,000048	0,0	301	-0,000094	0,0
	101	-0,000094	0,0	101	-0,000048	0,0	101	-0,000094	0,0
220			30			130			
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	
Barras PV	202	-0,730291	100,0	2	-0,309529	100,0	302	-0,306899	100,0
	201	-0,161314	22,1	202	-0,309529	100,0	102	-0,306899	100,0
	2	-0,077142	10,6	1	-0,215285	69,6	301	-0,213533	69,6
	1	-0,054046	7,4	201	-0,215285	69,6	101	-0,213533	69,6
	302	-0,000069	0,0	302	-0,000276	0,1	2	-0,000279	0,1
	102	-0,000069	0,0	102	-0,000276	0,1	202	-0,000279	0,1
	301	-0,000048	0,0	301	-0,000192	0,1	1	-0,000194	0,1
	101	-0,000048	0,0	101	-0,000192	0,1	201	-0,000194	0,1

Barras PQ									
320			310			120			
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	
Barras PV	302	-0,729682	100,0	302	-0,45785	100,0	102	-0,729682	100,0
	301	-0,161031	22,1	301	-0,318561	69,6	101	-0,161031	22,1
	102	-0,075681	10,4	102	-0,149716	32,7	302	-0,075681	10,4
	101	-0,052657	7,2	101	-0,104169	22,8	301	-0,052657	7,2
	202	-0,000069	0,0	2	-0,000136	0,0	2	-0,000069	0,0
	2	-0,000069	0,0	202	-0,000136	0,0	202	-0,000069	0,0
	1	-0,000048	0,0	1	-0,000095	0,0	1	-0,000048	0,0
	201	-0,000048	0,0	201	-0,000095	0,0	201	-0,000048	0,0
110									
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)							
Barras PV	102	-0,45785	100,0						
	101	-0,318561	69,6						
	302	-0,149716	32,7						
	301	-0,104169	22,8						
	2	-0,000136	0,0						
	202	-0,000136	0,0						
	1	-0,000095	0,0						
	201	-0,000095	0,0						

Tabela 19 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema 18 Barras ($iX=10000\%$)

Barras PQ											
		10	20	210	220	30	130	320	310	120	110
Barras PV	1	2 ^a	2 ^a	4 ^a	4 ^a	3 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a
	2	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	1 ^a	5 ^a	6 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a
	202	3 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a	6 ^a	5 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a
	201	4 ^a	4 ^a	2 ^a	2 ^a	4 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a
	301	7 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	3 ^a	2 ^a	2 ^a	4 ^a	4 ^a
	302	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a
	102	6 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a	2 ^a	3 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a
	101	8 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a	8 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	2 ^a	2 ^a

Examinando-se a Tabela 19 para a determinação das áreas pela observação das cores existentes, é possível perceber que:

- Para as barras 10, 20, 210, 220 e 30 os geradores 301, 302, 102 e 101 não têm nenhuma influência. Da mesma forma para as barras 130, 320, 310, 120 e 110 os geradores 1, 2, 202 e 201 não têm nenhuma influência. Logo, a impedância entre as barras 30 e 130 divide o sistema em 2 partes;
- As barras 10 e 20 são muito influenciadas pelos geradores 1 e 2, enquanto que as barras 210 e 220 são muito influenciadas pelos geradores 202 e 201. A barra 30 é influenciada pelos geradores 1, 2, 202 e 201, estando em uma região de transição;

- As barras 110 e 120 são muito influenciadas pelos geradores 101 e 102, enquanto que as barras 310 e 320 são muito influenciadas pelos geradores 302 e 301. A barra 130 é influenciada pelos geradores 101, 102, 302 e 301, estando em uma região de transição.

A partir então desta análise de sensibilidade, o sistema 18 barras pode ser dividido conforme está na Figura 24. A subdivisão do sistema dada através da análise de sensibilidade pode ser conferida também através da Tabela 20.

Tabela 20 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20	1, 2
B	110, 120	101, 102
C	210, 220	201, 202
D	310, 320	301, 302
Transição AC	30	-
Transição BD	130	-

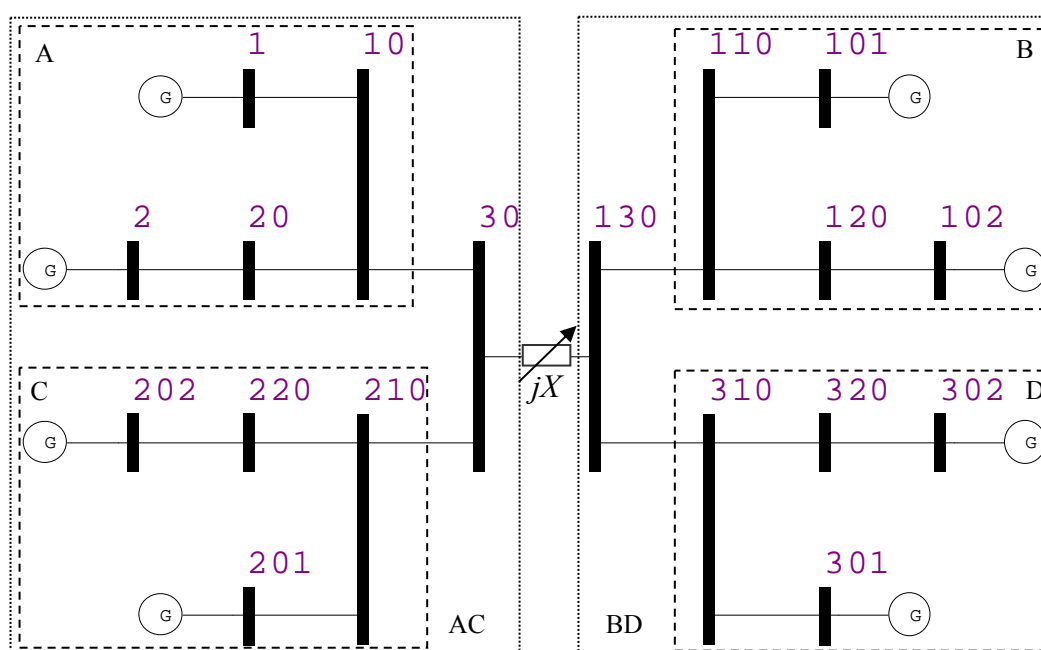


Figura 24 – Áreas por sensibilidade do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

IV.3.2.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema 18 barras obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o

algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 70% e 10, e o valor de σ considerado é de 0,5. Os autovalores da matriz J_{SQV} para $jX = 10000\%$ são dados, em ordem crescente, pela Tabela 21.

Tabela 21 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Autovalores (λ_i)	
i	Módulo
1	0,105410
2	0,125834
3	1,922306
4	1,949153
5	5,189101
6	5,195531
7	5,197784
8	5,211099
9	11,776071
10	11,833132
11	23,594937
12	23,602588
13	31,443914
14	31,519765
15	46,661388
16	46,726067
17	50,445368
18	50,578441

Os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_1 = 0,105410$, $\lambda_2 = 0,125834$, $\lambda_3 = 1,922306$ e $\lambda_4 = 1,949153$ da Tabela 21 são dados respectivamente pela Figura 25, Figura 26, Figura 27 e pela Figura 28.

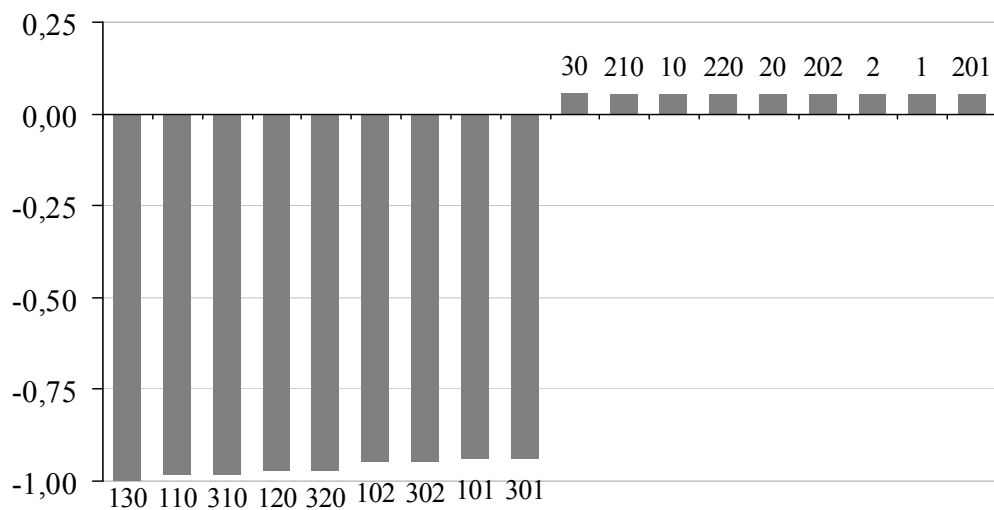


Figura 25 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

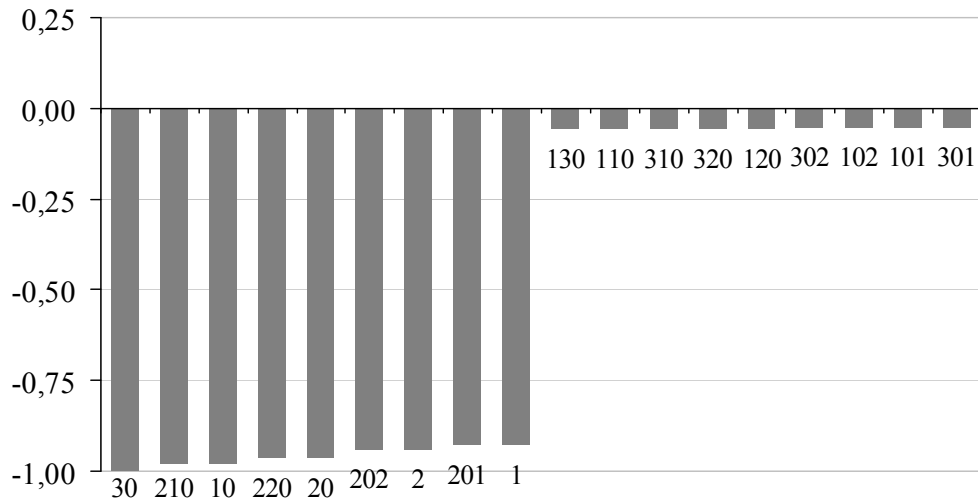


Figura 26 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

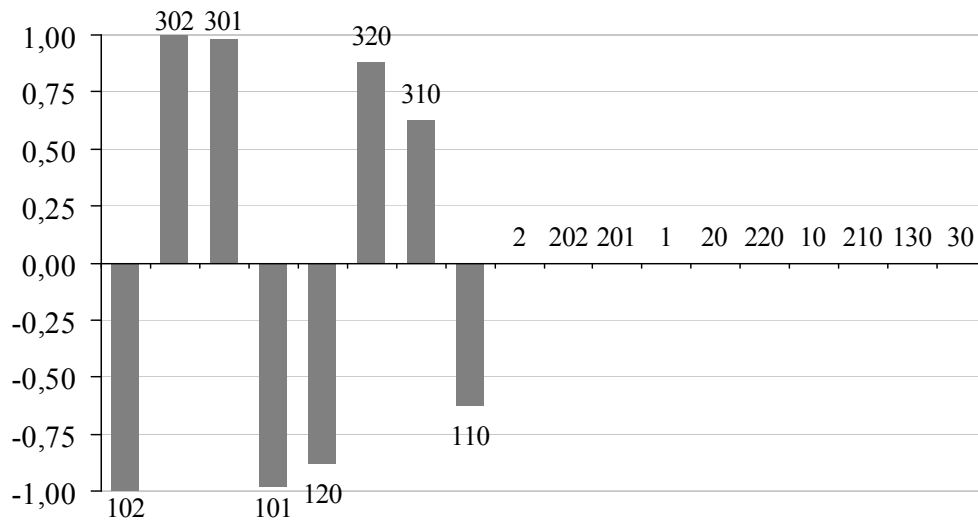


Figura 27 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Pode-se observar que os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_1 = 0,105410$ e $\lambda_2 = 0,125834$ representam o desacoplamento entre as áreas AC e BD destacadas na avaliação anterior na Figura 24. Estes autovalores representam a característica da singularidade da matriz. De um lado estão as barras 130, 110, 310, 120, 320, 102, 302, 101 e 301 na Figura 25, que unem as barras das áreas B e D. De outro lado estão as barras 30, 210, 10, 220, 20, 202, 2, 201 e 1 na Figura 26 que unem as barras das áreas A e C. Percebe-se assim que as áreas AC e BD da Figura 24 não influenciam uma sobre a outra.

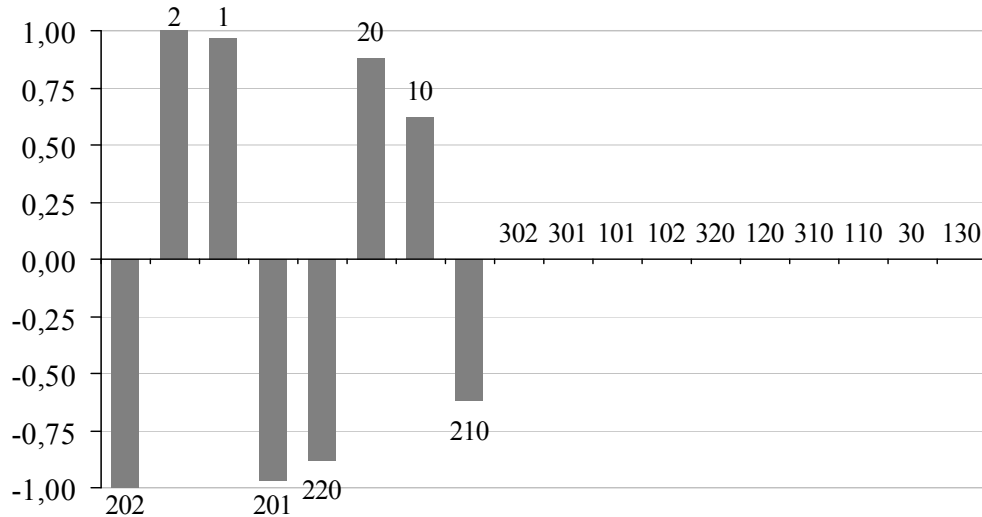


Figura 28 – Mode-Shape de λ_4 para o sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Como após a avaliação do *mode-shape* de $\lambda_2 = 0,125834$ os critérios ε_1 e ε_2 do algoritmo são atendidos, é encerrada a busca de áreas através dos menores autovalores, dividindo-se o sistema 18 barras em duas áreas. Embora os critérios do algoritmo já estejam atendidos, prosseguiremos analisando os autovalores seguintes.

Os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_3 = 1,922306$ e $\lambda_4 = 1,949153$ da Tabela 21 representam as subdivisões de controle A e C existentes na área AC e as subdivisões de controle B e D existentes na área BD, explicitando a existência de áreas de controle de menor porte.

Se considerarmos na montagem das áreas também os autovalores λ_3 e λ_4 , o resultado obtido será o mesmo encontrado com a sensibilidade, que determinou as áreas A, B, C e D da Figura 24 ou da Tabela 20.

IV.3.2.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\arccos(0,999)$, que representada um ângulo de 2,56 graus. O resultado obtido está na Tabela 22. A diferença em relação à sensibilidade e aos autovalores está na ausência dos geradores 1, 101, 201 e 301 em virtude da tolerância ε_1 muito pequena que foi adotada para a divisão das áreas. Mas estas barras poderiam ser consideradas de suas respectivas áreas de conexão por uma simples inspeção da condição topológica.

Tabela 22 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema 18 Barras ($jX=10000\%$)

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	10, 20	2
B	110, 120	102
C	210, 220	202
D	310, 320	302

IV.3.2.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , estão exibidas na Tabela 23 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Pela observação dos *mode-shape* da Figura 27 e Figura 28, nota-se que para a área A as barras PQ 20 e 10 possuem maior módulo, para a área B 120 e 110, para a área C 220 e 210 e para a área D 320 e 310, sendo estas as barras candidatas. As mesmas barras são indicadas através da equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , conforme destaca a Tabela 23.

Tabela 23 – Barras piloto do sistema 10 Barras ($jX=10000\%$)

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SQV}	
Área	Barras	Área	Barras
A	20 e 10	A	20 e 10
B	120 e 110	B	120 e 110
C	220 e 210	C	220 e 210
D	320 e 310	D	320 e 310

IV.4 - Sistema IEEE 14 barras

Neste tópico serão avaliadas as metodologias de determinação de áreas de controle no sistema IEEE 14 barras. A topologia deste sistema está demonstrada na Figura 29. Os dados deste sistema estão no Apêndice B, no formato do programa ANAREDE.

Na Tabela 24 está um resumo das principais características do sistema

Tabela 24 – Características principais do sistema IEEE 14 barras

<i>Principais Parâmetros do Sistema</i>	<i>Quantidade</i>
Barras / Barras PV	14 / 5
Circuitos/Transformadores	20/3
Carga Ativa	497,2 MW
Carga Reativa	141,1 Mvar

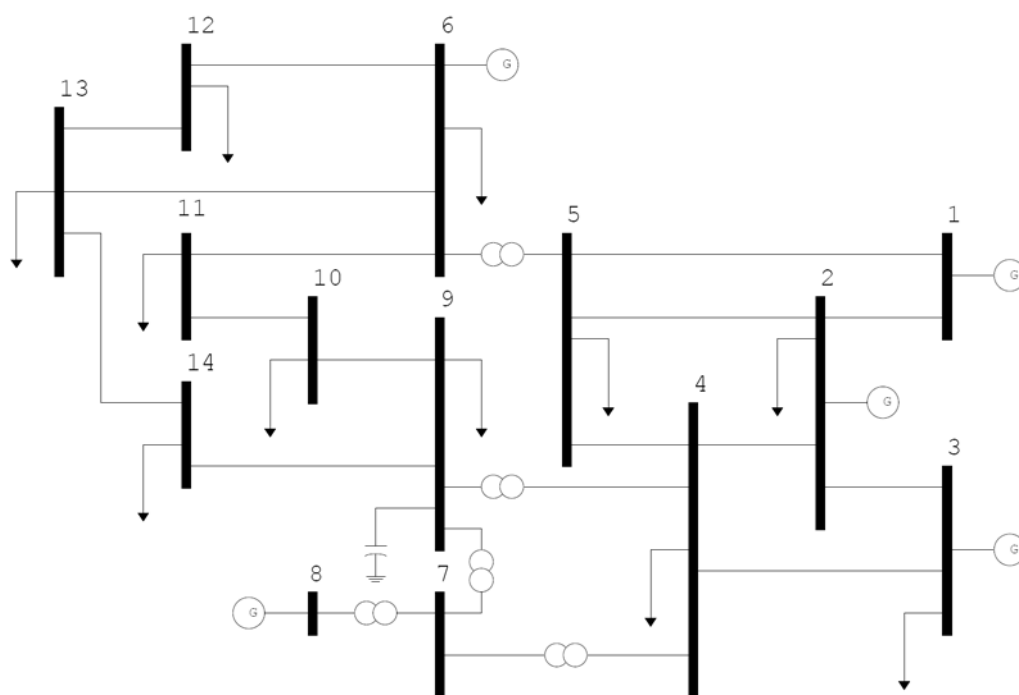


Figura 29 – Sistema IEEE 14 barras

IV.4.1.1 - Áreas por sensibilidade

Para se obter as áreas de controle de tensão, foi executada uma análise de sensibilidade de tensão para o sistema da Figura 29. A relação $\frac{\Delta Q_g^{PV}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$, que

representa a variação da potência reativa gerada em todas as barras PV em relação a uma injeção de potência reativa realizada de forma individual nas barras PQ do sistema, é apresentada através da Tabela 25.

Tabela 25 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras

Barras PQ									
4			5			7			
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	
Barras PV	2	-0,2726	100,0	2	-0,2743	100,0	8	-0,6365	100,0
	3	-0,1759	64,5	6	-0,2265	82,6	6	-0,3486	54,8
	6	-0,1701	62,4	1	-0,1221	44,5	2	-0,2320	36,4
	8	-0,1166	42,8	3	-0,0960	35,0	3	-0,1511	23,7
	1	-0,0636	23,3	8	-0,0648	23,6	1	-0,0597	9,4
9			10			11			
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	
Barras PV	6	-0,5680	100,0	6	-0,6738	100,0	6	-0,9087	100,0
	8	-0,4437	78,1	8	-0,3594	53,3	8	-0,1785	19,6
	2	-0,2128	37,5	2	-0,1727	25,6	2	-0,0858	9,4
	3	-0,1405	24,7	3	-0,1138	16,9	3	-0,0565	6,2
	1	-0,0611	10,8	1	-0,0493	7,3	1	-0,0245	2,7
12			13			14			
Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	Número	$\Delta Q_g/\Delta Q_c$	α (%)	
Barras PV	6	-1,0909	100,0	6	-1,0510	100,0	6	-0,7775	100,0
	8	-0,0313	2,9	8	-0,0591	5,6	8	-0,2646	34,0
	2	-0,0174	1,6	2	-0,0303	2,9	2	-0,1297	16,7
	3	-0,0105	1,0	3	-0,0191	1,8	3	-0,0843	10,8
	1	-0,0028	0,3	1	-0,0071	0,7	1	-0,0349	4,5

Segundo as faixas e cores definidas na Tabela 2 para as colunas de α da Tabela 25, pode-se criar uma nova tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV do sistema IEEE 14 barras. Este mapeamento está na Tabela 26.

Tabela 26 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras

		Barras PQ								
Barras PV	1	5 ^a	3 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a
	2	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a
	3	2 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a	4 ^a
	6	3 ^a	2 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a
	8	4 ^a	5 ^a	1 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a

Analisando a Tabela 26 pode-se notar que:

- Para as barras 11, 12, 13 e 14, o gerador da barra 6 tem influência predominante, sendo que os demais geradores (barras 1, 2, 3 e 8) têm pouca influência;
- Para as barras 7, 9 e 10, o gerador da barra 6 também tem influência marcante, porém está acompanhado pelo gerador da barra 8 que predomina sobre a barra 7 e está fortemente presente nas barras 9 e 10. Os demais geradores nas barras 1, 2 e 3 têm influência baixa;
- As barras 4 e 5 encontram-se muito próximas aos geradores nas barras 1, 2 e 3 e são dominados principalmente pela influência do gerador 2. Recebem também influência dos geradores nas barras 6 e 3.

A partir então desta análise de sensibilidade, o sistema IEEE 14 barras pode ser dividido conforme está na Figura 30. A Tabela 27 traz também a informação das áreas obtidas.

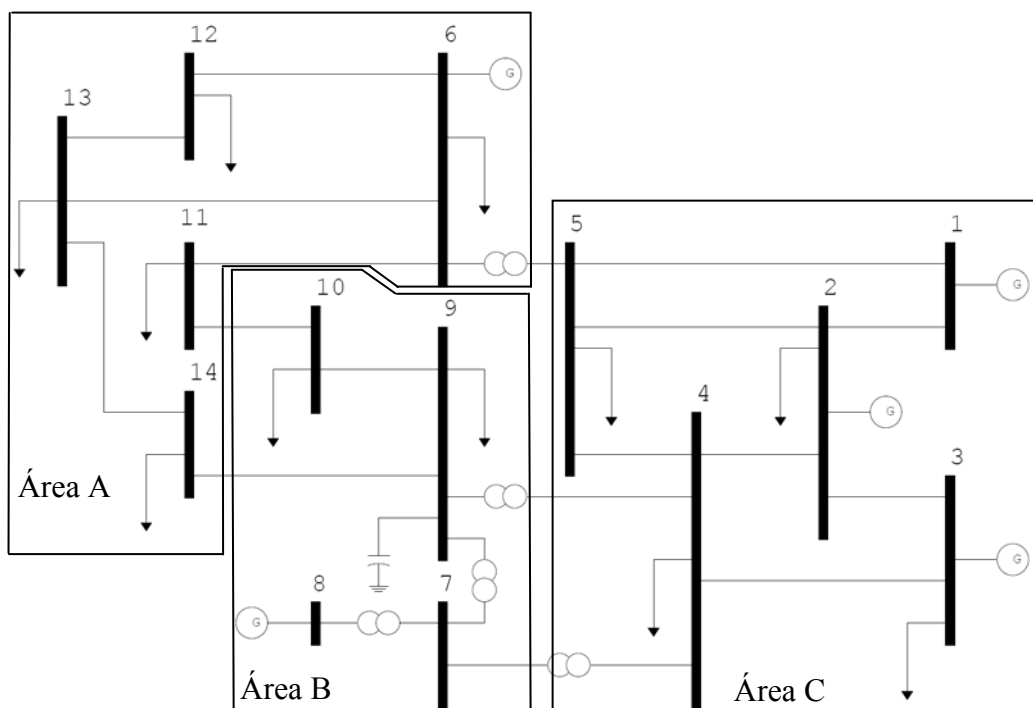


Figura 30 – Áreas por sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras

Tabela 27 – Áreas por sensibilidade do Sistema IEEE 14 barras

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	11, 12, 13, 14	6
B	7, 9, 10	8
C	4, 5	1, 2, 3

IV.4.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema IEEE 14 barras obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 80% e 10, e o valor de σ considerado é de 0,2. Os autovalores da matriz J_{SQV} são dados, em ordem crescente, pela Tabela 28.

Tabela 28 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 14 barras

Autovalores (λ_i)	
i	Módulo
1	0,201297
2	2,411922
3	4,031086
4	5,551012
5	6,813017
6	12,426693
7	13,324082
8	16,500753
9	20,322188
10	25,828713
11	29,956227
12	44,044500
13	50,137507
14	62,818486

Os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_1 = 0,201297$, $\lambda_2 = 2,411922$ e $\lambda_3 = 4,031086$ da Tabela 28 são dados respectivamente pela Figura 31, Figura 32 e Figura 33. Para os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_2 = 2,411922$ e $\lambda_3 = 4,031086$, considerou-se apenas os elementos cujo módulo fosse superior a 0,2. Os elementos com módulo inferior a 0,2 foram desprezados na formação das áreas de controle.

O autovalor $\lambda_1 = 0,201297$ representa a característica de singularidade da matriz J_{sgv} . Como todas as barras formam um sistema acoplado, todas aparecem com módulo significativo no *mode-shape* da Figura 31.

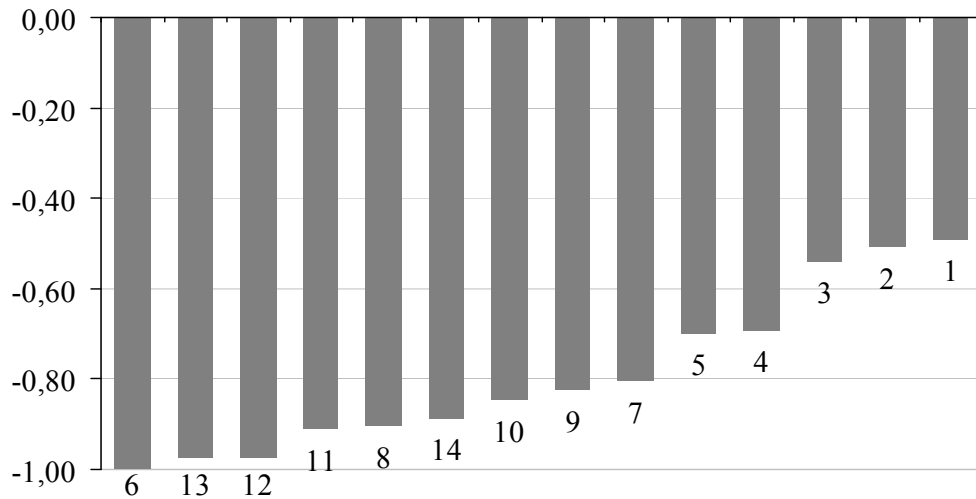


Figura 31 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema IEEE 14 barras

O autovalor $\lambda_2 = 2.411922$ apresenta a primeira divisão em áreas no sistema. De um lado as barras 8, 7 e 9, de outro as barras 6, 12 e 13, de acordo com apresentado na Figura 32.

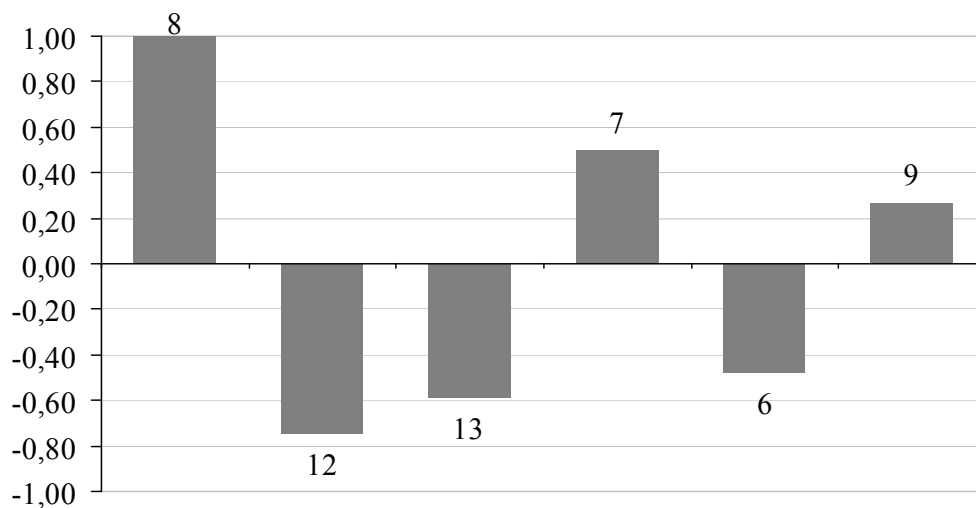


Figura 32 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema IEEE 14 barras

Já o autovalor $\lambda_3 = 4,031086$ apresenta a segunda divisão em áreas no sistema. De um lado as barras 1, 2, 3, 4 e 5, de outro as barras 8, 9, 10, 11 e 14, segundo o que está apresentado na Figura 33.

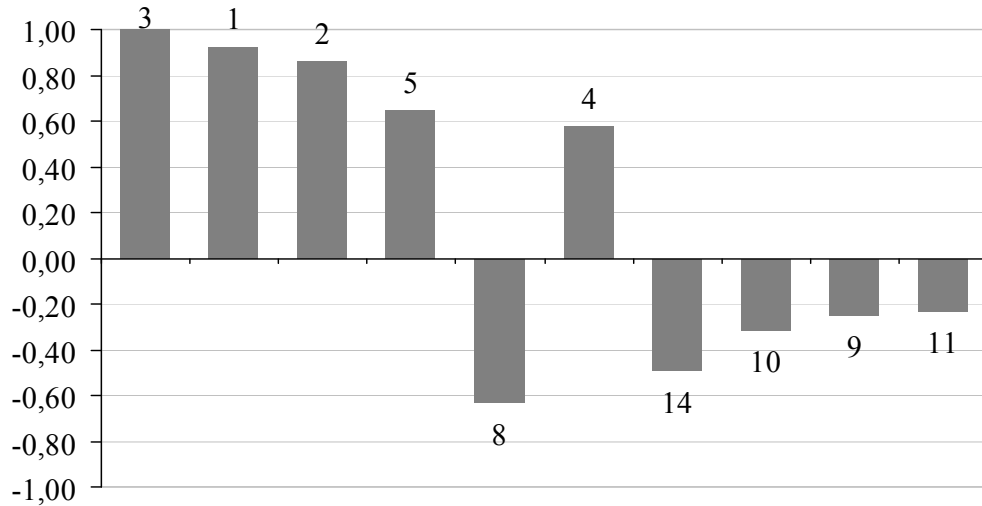


Figura 33 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema IEEE 14 barras

Deve-se notar que uma mesma área aparece tanto no *mode-shape* do autovalor $\lambda_2 = 2,411922$ quanto no *mode-shape* do autovalor $\lambda_3 = 4,031086$. Esta área envolve o gerador 8. No caso do *mode-shape* do autovalor $\lambda_3 = 4,031086$, a área determinada ao redor do gerador 8 é adicionada das barras 10, 11 e 14.

Como após a análise do autovalor λ_3 o número de barras agregadas total passou para 14, o critério ε_I foi atendido e o algoritmo interrompido, finalizando o processo de busca das áreas, tendo sido utilizados apenas os três menores autovalores. Logo, a divisão das áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV} do sistema IEEE 14 barras é apresentada na Figura 34.

Na Tabela 29 está a divisão obtida pelos menores autovalores da matriz J_{SQV} do sistema IEEE 14 barras e pode-se notar que há uma ligeira diferença em relação ao construído a partir da sensibilidade. As barras 11 e 14 foram retiradas da área A para a área B.

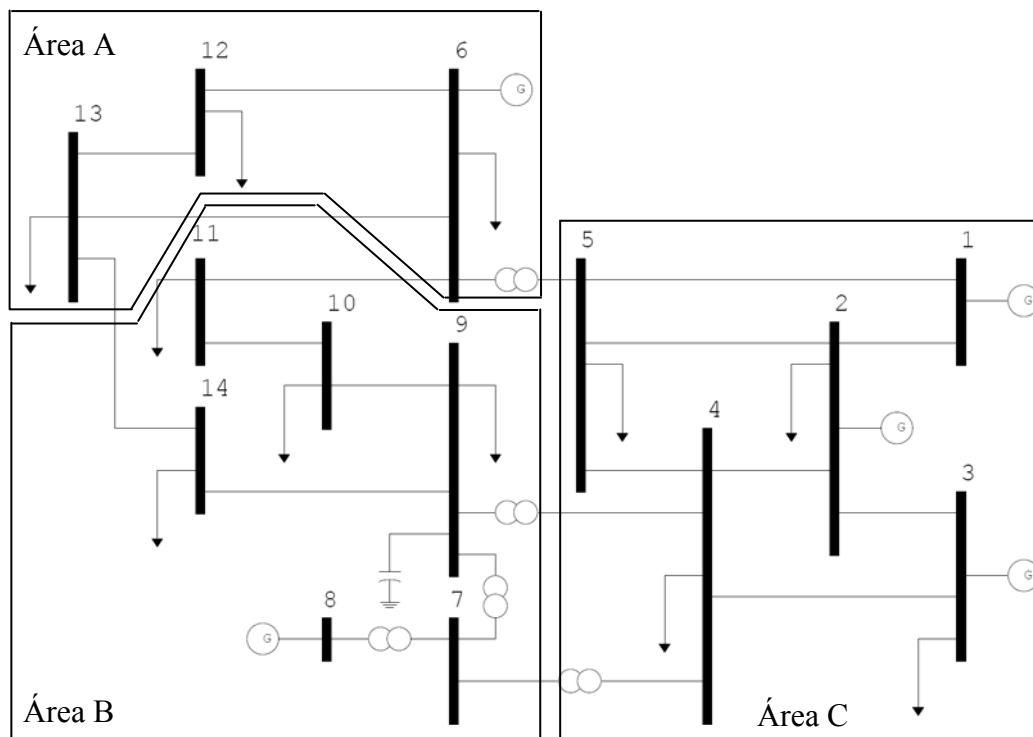


Figura 34 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 14 barras

Tabela 29 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 14 barras

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	12, 13	6
B	7, 9, 10, 11, 14	8
C	4, 5	1, 2, 3

IV.4.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\text{acos}(0,9955)$, que representada um ângulo de 5,4376 graus. O resultado obtido está na Tabela 30. A diferença em relação à sensibilidade está na ausência da barra 14 na área A e da barra 8 na área B em virtude da tolerância ε_1 muito pequena que foi adotada para a divisão das áreas. No caso da barra 8 a mesma poderia ser agregada em função da condição topológica da mesma, que está ligada somente a área B.

Tabela 30 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SOV} do Sistema IEEE 14 barras

Áreas	Barras PQ	Barras PV
A	11, 12, 13	6
B	7, 9, 10	-
C	4, 5	1, 2, 3

IV.4.1.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SOV} , estão exibidas na Tabela 31 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Pela observação do *mode-shape* da Figura 32, nota-se que para a área A as barras PQ 12 e 13 possuem maior módulo e para a área B as barras PQ 7 e 9. Para a área C na Figura 33 as barras PQ são 5 e 4.

Tabela 31 – Barras piloto do sistema IEEE 14 barras

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SOV}	
Área	Barras	Área	Barras
A	12 e 13	A	13 e 12
B	7 e 9	B	9 e 10
C	5 e 4	C	5 e 4

IV.5 - Sistema New England 39 barras

Neste item, a metodologia será avaliada na determinação de áreas de controle para o sistema *New England*. A topologia deste sistema é exibida na Figura 35. As características principais do sistema estão na Tabela 32. Os dados estão no formato do programa ANAREDE, no Apêndice B. Inicialmente procura-se determinar as áreas através da análise de sensibilidade. O uso deste sistema tem por objetivo avaliar a metodologia proposta para a determinação de áreas de controle em um sistema um pouco mais complexo.

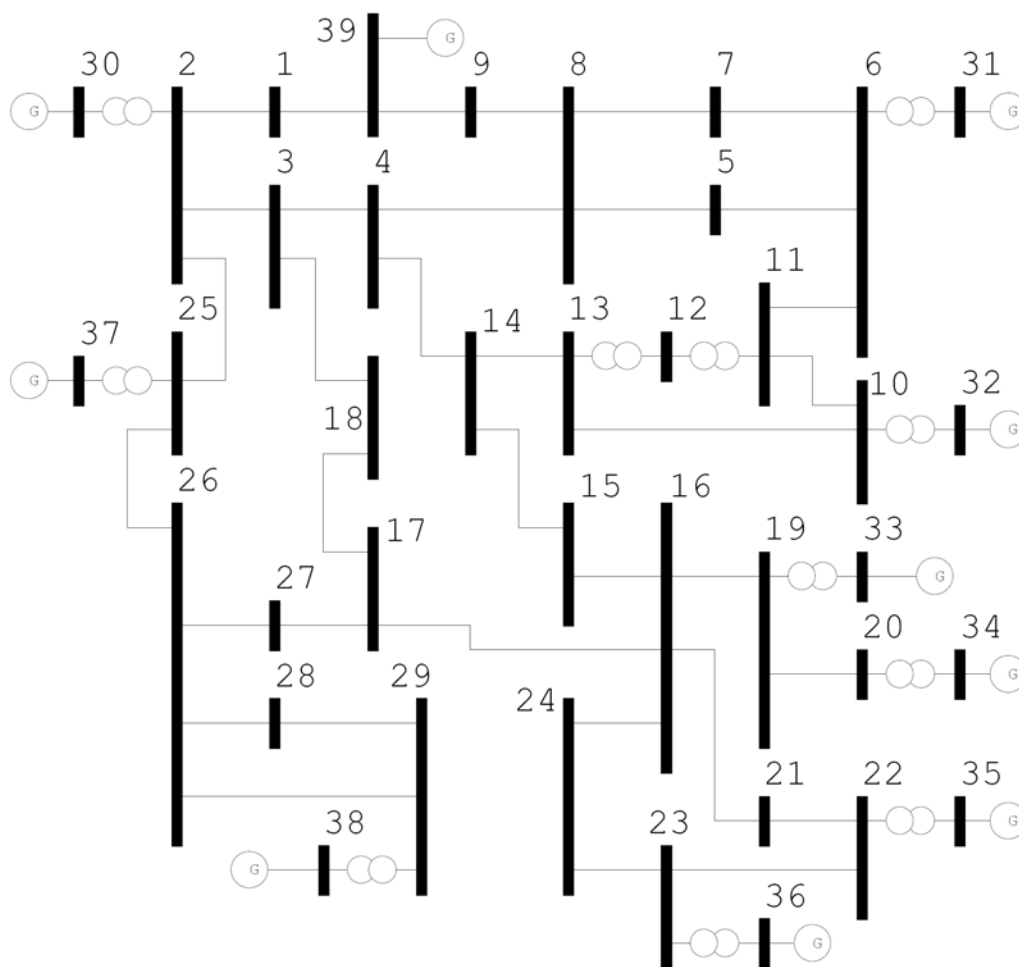


Figura 35 – Sistema New England

Tabela 32 – Características principais do Sistema New England

<i>Principais Parâmetros do Sistema</i>	<i>Quantidade</i>
Barras / Barras PV	39 / 10
Circuitos/Transformadores	46 / 12
Carga Ativa	6150,5 MW
Carga Reativa	1408,9 Mvar

IV.5.1.1 - Áreas por sensibilidade

Neste item, as áreas de controle de tensão foram obtidas a partir da execução de uma análise de sensibilidade de tensão para o sistema da Figura 35. A

relação $\frac{\Delta Q_g^{PV}}{\Delta Q_{inj}^{PQ}}$, que representa a variação da potência reativa gerada em todas

as barras *PV* em relação a uma injeção de potência reativa em uma determinada barra *PQ* do sistema, é apresentada através da Tabela 33.

Tabela 33 – Análise de Sensibilidade do Sistema New England

Barras PQ									
1			2			3			
Barras PV	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
	39	-0,739255	100,0	30	-0,463491	100,0	30	-0,276981	100,0
	30	-0,176698	23,9	37	-0,238912	51,5	37	-0,155543	56,2
	37	-0,09118	12,3	39	-0,154755	33,4	32	-0,140466	50,7
	38	-0,028126	3,8	38	-0,073657	15,9	39	-0,134265	48,5
	32	-0,023234	3,1	32	-0,060754	13,1	31	-0,125049	45,1
	31	-0,020517	2,8	31	-0,053575	11,6	35	-0,102134	36,9
	35	-0,018772	2,5	35	-0,049169	10,6	33	-0,090998	32,9
	33	-0,016725	2,3	33	-0,043808	9,5	38	-0,083265	30,1
	36	-0,010653	1,4	36	-0,027904	6,0	36	-0,057962	20,9
34	-0,007749	1,0	34	-0,020298	4,4	34	-0,042163	15,2	
4			5			6			
Barras PV	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
	32	-0,274408	100,0	31	-0,363199	100,0	31	-0,389639	100,0
	31	-0,255647	93,2	32	-0,295238	81,3	32	-0,304313	78,1
	39	-0,153998	56,1	39	-0,191889	52,8	39	-0,181562	46,6
	30	-0,137466	50,1	30	-0,086253	23,7	30	-0,07822	20,1
	35	-0,088992	32,4	35	-0,062151	17,1	35	-0,05824	14,9
	37	-0,07975	29,1	33	-0,055374	15,2	33	-0,05189	13,3
	33	-0,079289	28,9	37	-0,050388	13,9	37	-0,045808	11,8
	36	-0,050504	18,4	36	-0,035271	9,7	36	-0,033052	8,5
	38	-0,049646	18,1	38	-0,032491	8,9	38	-0,029867	7,7
34	-0,036738	13,4	34	-0,025657	7,1	34	-0,024043	6,2	
7			8			9			
Barras PV	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
	31	-0,358202	100,0	31	-0,342471	100,0	39	-0,748268	100,0
	32	-0,28368	79,2	32	-0,273308	79,8	31	-0,146025	19,5
	39	-0,239269	66,8	39	-0,26751	78,1	32	-0,116532	15,6
	30	-0,076433	21,3	30	-0,075472	22,0	30	-0,032117	4,3
	35	-0,056202	15,7	35	-0,055153	16,1	35	-0,023523	3,1
	33	-0,050073	14,0	33	-0,049139	14,3	33	-0,020958	2,8
	37	-0,044704	12,5	37	-0,04414	12,9	37	-0,018878	2,5
	36	-0,031895	8,9	36	-0,0313	9,1	36	-0,01335	1,8
	38	-0,029026	8,1	38	-0,028596	8,3	38	-0,012221	1,6
34	-0,023201	6,5	34	-0,022768	6,6	34	-0,009711	1,3	
10			11			12			
Barras PV	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
	32	-0,497852	100,0	32	-0,431617	100,0	32	-0,445262	100,0
	31	-0,247837	49,8	31	-0,295533	68,5	31	-0,272481	61,2
	39	-0,123966	24,9	39	-0,14348	33,2	39	-0,136119	30,6
	30	-0,072216	14,5	30	-0,074634	17,3	30	-0,079378	17,8
	35	-0,064465	12,9	35	-0,062844	14,6	35	-0,070882	15,9
	33	-0,057436	11,5	33	-0,055992	13,0	33	-0,063153	14,2
	37	-0,043076	8,7	37	-0,044228	10,2	37	-0,04738	10,6
	36	-0,036585	7,3	36	-0,035665	8,3	36	-0,040226	9,0
	38	-0,029927	6,0	38	-0,030092	7,0	38	-0,032913	7,4
34	-0,026613	5,3	34	-0,025943	6,0	34	-0,029262	6,6	

Barras PQ								
13			14			15		
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
32	-0,448136	100,0	32	-0,332769	100,0	35	-0,20653	100,0
31	-0,242834	54,2	31	-0,223967	67,3	33	-0,18401	89,1
39	-0,125732	28,1	39	-0,127419	38,3	32	-0,179555	86,9
30	-0,082248	18,4	35	-0,108346	32,6	31	-0,125672	60,8
35	-0,077218	17,2	30	-0,106285	31,9	36	-0,117208	56,8
33	-0,068798	15,4	33	-0,096532	29,0	30	-0,103131	49,9
37	-0,049366	11,0	37	-0,064396	19,4	34	-0,08526	41,3
36	-0,043822	9,8	36	-0,061487	18,5	39	-0,083726	40,5
38	-0,034931	7,8	38	-0,047012	14,1	37	-0,069445	33,6
34	-0,031877	7,1	34	-0,044727	13,4	38	-0,067719	32,8
16			17			18		
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
35	-0,249844	100,0	35	-0,188887	100,0	30	-0,204775	100,0
33	-0,222602	89,1	33	-0,168291	89,1	35	-0,155792	76,1
36	-0,141789	56,8	30	-0,159731	84,6	33	-0,138804	67,8
32	-0,111658	44,7	38	-0,130537	69,1	37	-0,130879	63,9
34	-0,103141	41,3	37	-0,115591	61,2	32	-0,122652	59,9
30	-0,101713	40,7	32	-0,111466	59,0	38	-0,112487	54,9
31	-0,082134	32,9	36	-0,107195	56,8	39	-0,103252	50,4
38	-0,076826	30,7	31	-0,088191	46,7	31	-0,10237	50,0
37	-0,071606	28,7	39	-0,083925	44,4	36	-0,088413	43,2
39	-0,064595	25,9	34	-0,077977	41,3	34	-0,064314	31,4
19			20			21		
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
33	-0,57986	100,0	34	-0,577785	100,0	35	-0,441753	100,0
34	-0,268675	46,3	33	-0,297814	51,5	36	-0,193489	43,8
35	-0,094666	16,3	35	-0,048589	8,4	33	-0,157444	35,6
36	-0,053724	9,3	36	-0,027575	4,8	32	-0,078956	17,9
32	-0,042292	7,3	32	-0,021688	3,8	34	-0,072951	16,5
30	-0,038507	6,6	30	-0,019727	3,4	30	-0,071902	16,3
31	-0,031101	5,4	31	-0,01594	2,8	31	-0,058069	13,1
38	-0,029116	5,0	38	-0,014953	2,6	38	-0,054347	12,3
37	-0,027148	4,7	37	-0,013954	2,4	37	-0,050666	11,5
39	-0,02436	4,2	39	-0,012367	2,1	39	-0,045547	10,3
22			23			24		
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)
35	-0,64059	100,0	35	-0,445465	100,0	35	-0,278543	100,0
36	-0,245498	38,3	36	-0,429617	96,4	33	-0,204009	73,2
33	-0,086567	13,5	33	-0,089139	20,0	36	-0,183084	65,7
32	-0,043421	6,8	32	-0,044701	10,0	32	-0,102336	36,7
34	-0,04011	6,3	34	-0,041302	9,3	34	-0,094527	33,9
30	-0,039552	6,2	30	-0,040707	9,1	30	-0,093226	33,5
31	-0,031939	5,0	31	-0,032875	7,4	31	-0,075279	27,0
38	-0,029877	4,7	38	-0,030769	6,9	38	-0,070407	25,3
37	-0,027848	4,3	37	-0,028686	6,4	37	-0,06562	23,6
39	-0,02511	3,9	39	-0,025782	5,8	39	-0,059229	21,3

Barras PQ									
25			26			27			
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	
37	-0,438333	100,0	38	-0,394718	100,0	38	-0,272392	100,0	
30	-0,321372	73,3	37	-0,213003	54,0	30	-0,17514	64,3	
38	-0,114875	26,2	30	-0,187884	47,6	37	-0,167923	61,6	
39	-0,108503	24,8	35	-0,093646	23,7	35	-0,138068	50,7	
32	-0,04907	11,2	33	-0,083435	21,1	33	-0,123013	45,2	
35	-0,047112	10,7	39	-0,075521	19,1	32	-0,08586	31,5	
31	-0,042531	9,7	32	-0,063448	16,1	39	-0,079472	29,2	
33	-0,041975	9,6	36	-0,053145	13,5	36	-0,078355	28,8	
36	-0,026736	6,1	31	-0,05162	13,1	31	-0,068687	25,2	
34	-0,019449	4,4	34	-0,038659	9,8	34	-0,056997	20,9	
28			29						
Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)	Número	$\Delta Qg/\Delta Qc$	α (%)				
38	-0,778877	100,0	38	-0,891759	100,0				
37	-0,111294	14,3	37	-0,077036	8,6				
30	-0,098026	12,6	30	-0,067752	7,6				
35	-0,048896	6,3	35	-0,033822	3,8				
33	-0,043565	5,6	33	-0,030134	3,4				
39	-0,039284	5,0	39	-0,027067	3,0				
32	-0,033112	4,3	32	-0,022892	2,6				
36	-0,027749	3,6	36	-0,019194	2,2				
31	-0,026932	3,5	31	-0,018614	2,1				
34	-0,020185	2,6	34	-0,013962	1,6				

Segundo as faixas e cores definidas na Tabela 2 para as colunas de α da Tabela 33, pode-se criar uma nova tabela com um mapeamento simplificado de toda a sensibilidade das barras PQ em relação às barras PV do sistema New England. Este mapeamento está na Tabela 34.

Tabela 34 – Mapa da Análise de Sensibilidade do Sistema New England

		Barras PQ																													
		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	
Barras PV	30	2ª	1ª	1ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	4ª	5ª	6ª	6ª	3ª	1ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	2ª	3ª	2ª	3ª	3ª	
	31	6ª	6ª	5ª	2ª	1ª	1ª	1ª	1ª	2ª	2ª	2ª	2ª	2ª	2ª	4ª	7ª	8ª	8ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	9ª	9ª	9ª	9ª	
	32	5ª	5ª	3ª	1ª	2ª	2ª	2ª	2ª	3ª	1ª	1ª	1ª	1ª	1ª	3ª	4ª	6ª	5ª	5ª	5ª	4ª	4ª	4ª	4ª	5ª	7ª	6ª	7ª	7ª	
	33	8ª	8ª	7ª	7ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	6ª	2ª	2ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	3ª	3ª	2ª	8ª	5ª	5ª	5ª	5ª	
	34	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	7ª	5ª	10ª	10ª	2ª	1ª	5ª	5ª	5ª	5ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	
	35	7ª	7ª	6ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	5ª	4ª	1ª	1ª	1ª	2ª	3ª	3ª	1ª	1ª	1ª	1ª	6ª	4ª	4ª	4ª	4ª	
	36	9ª	9ª	9ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	5ª	3ª	7ª	9ª	4ª	4ª	2ª	2ª	2ª	3ª	9ª	8ª	8ª	8ª	8ª	
	37	3ª	2ª	2ª	6ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	7ª	9ª	9ª	5ª	4ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	1ª	2ª	3ª	2ª	2ª
	38	4ª	4ª	8ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	9ª	10ª	8ª	4ª	6ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	8ª	3ª	1ª	1ª	1ª	1ª
	39	1ª	3ª	4ª	3ª	3ª	3ª	3ª	3ª	3ª	1ª	3ª	3ª	3ª	3ª	3ª	8ª	10ª	9ª	7ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	10ª	4ª	6ª	7ª	6ª	6ª

Examinando o mapa de sensibilidades da Tabela 34, visando à determinação das áreas de controle, é possível observar que:

- Para as barras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 e 14, os geradores das barras 33, 34, 35, 36, 37 e 38 têm pouca influência. Os geradores das barras 31, 32 têm influência forte. Estas barras formariam a área A. As barras 7 e 8 recebem influência significativa do gerador da barra 39, dada proximidade ao mesmo;
- Para as barras 19, 20, 21, 22, 23 e 24, os geradores das barras 30, 31, 32, 37, 38 e 39 têm influência baixa. Os geradores das barras 33, 34, 35 e 36 têm influência marcante nesta região. Estas barras formariam a área B;
- O gerador da barra 38 tem influência determinante nas barras 28 e 29, e significativa nas barras 26 e 27. O gerador da barra 37 tem influência importante nas barras 25, 26 e 27. O gerador da barra 30 tem influência marcante nas barras 1 e 2 e significativa nas barras 25 e 27. Percebe-se então que os geradores das barras 30, 37 e 38 compartilham uma área comum de influência através das barras 25, 26 e 27. Aliado a isto há também o fato de que os geradores das barras 31, 32, 33, 34, 35 e 36 têm influência baixa na região de influência dos geradores das barras 30, 37 e 38, característica a qual se encaixa também ao gerador da barra 39. Logo, a área C seria formada pelas barras 1, 2, 25, 26, 27, 28 e 29 mais os geradores das barras 30, 37, 38 e 39;
- As barras 15, 16, 17 e 18 caracterizam-se por ser uma área com influências significativas de geradores tanto da área A, quanto das áreas B e C. Logo, estas barras representam uma faixa de transição entre estas três áreas.

Através desta avaliação baseada na análise de sensibilidade, pode-se propor para o sistema *New England* a divisão que está apresentada pela Figura 36 e pela Tabela 35.

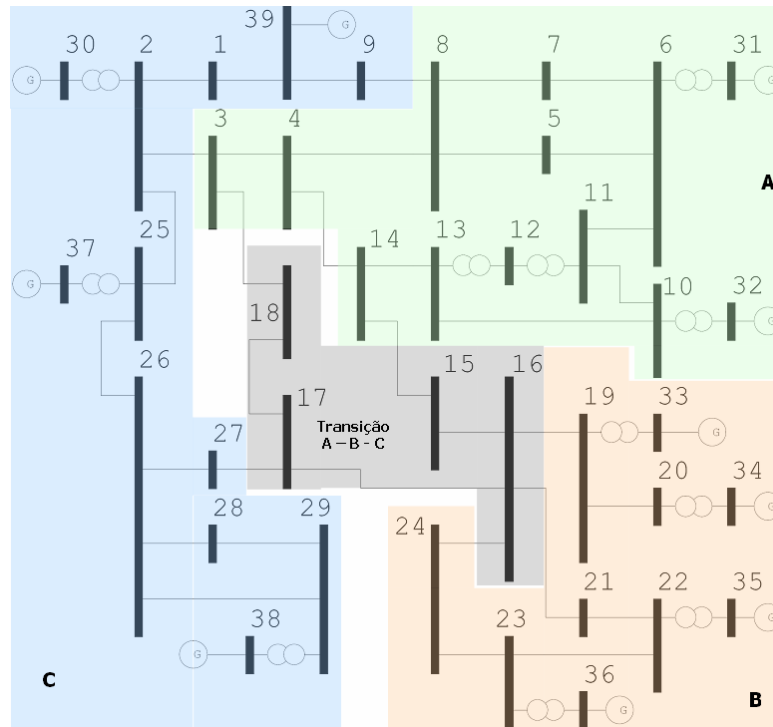


Figura 36 – Áreas por sensibilidade do Sistema New England

Tabela 35 – Áreas por sensibilidade do Sistema New England

Área	Barras PQ	Barras PV
A	3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14	31, 32
B	19, 20, 21, 22, 23 e 24	33, 34, 35, 36
C	1, 2, 25, 26, 27, 28, 29	30, 37, 38, 39
Transição A-B-C	15, 16, 17, 18	

IV.5.1.2 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Neste item será apresentada a divisão das áreas do sistema *New England* obtida a partir da avaliação dos menores autovalores da matriz J_{SQV} , utilizando o algoritmo apresentado na Figura 5. Os valores de ε_1 e ε_2 são respectivamente 70% e 10, e o valor de σ considerado é de 0,3. Os autovalores da matriz J_{SQV} são dados, em ordem crescente, pela Tabela 36.

Os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_1 = 1,040136$, $\lambda_2 = 4,314794$ e $\lambda_3 = 4,877888$ da Tabela 36 são dados respectivamente pela Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Para os *mode-shapes* dos autovalores $\lambda_2 = 4,314794$ e

$\lambda_3 = 4,877888$, considerou-se os elementos cujo módulo fosse superior a 0,3 para montagem das áreas do sistema.

Tabela 36 – Autovalores da matriz J_{SOR} do Sistema New England

Autovalores (λ_i)			
<i>i</i>	Módulo	<i>i</i>	Módulo
1	1,040136	21	130,318883
2	4,314794	22	134,385077
3	4,877888	23	145,018486
4	11,012073	24	156,655188
5	11,250263	25	178,718008
6	17,412378	26	209,334472
7	31,395855	27	216,656881
8	32,585983	28	222,489486
9	40,536847	29	235,511908
10	42,594513	30	251,703690
11	44,977250	31	335,142994
12	45,088411	32	363,522161
13	49,413206	33	372,363226
14	60,094916	34	398,710688
15	68,634318	35	410,707937
16	78,193390	36	525,621643
17	86,974738	37	675,435046
18	91,485309	38	787,388917
19	118,499344	39	1035,350703
20	123,894700		

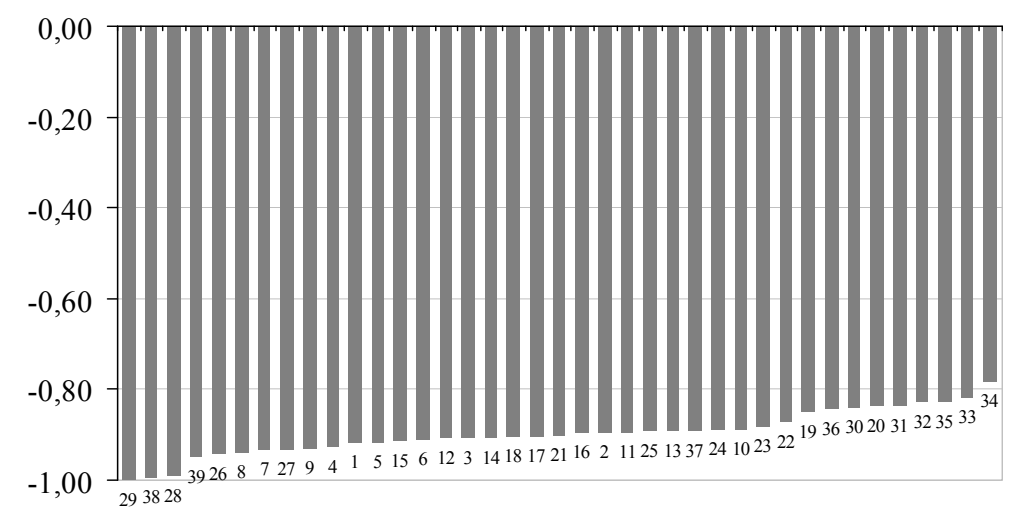


Figura 37 – Mode-Shape de λ_1 para o sistema New England

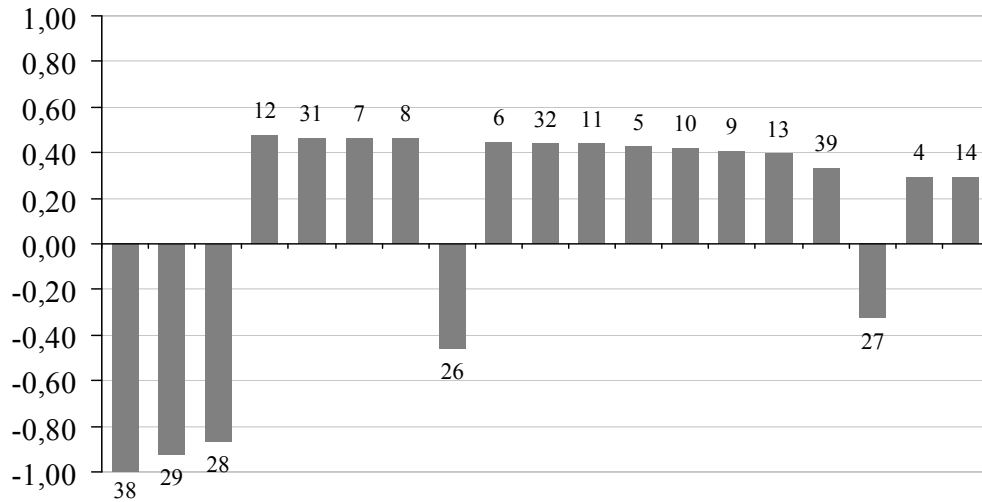


Figura 38 – Mode-Shape de λ_2 para o sistema New England

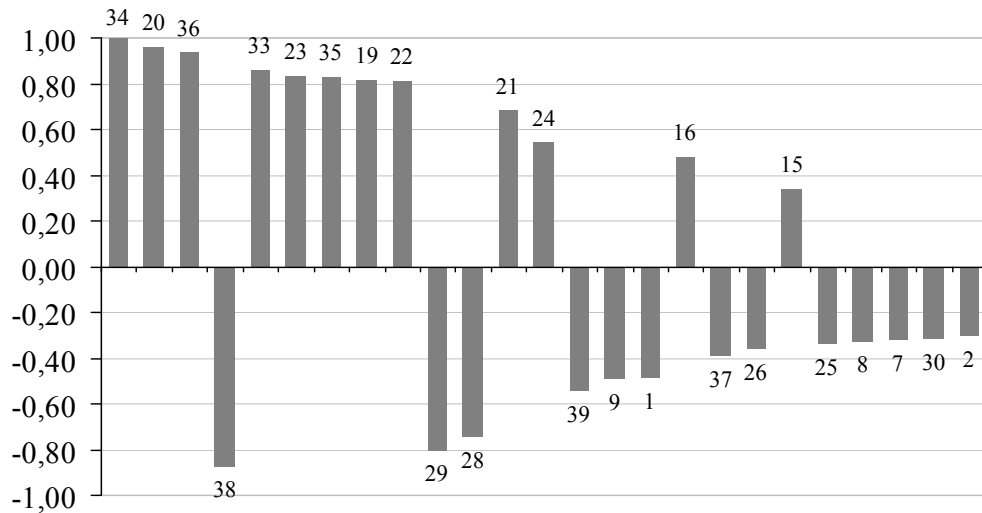


Figura 39 – Mode-Shape de λ_3 para o sistema New England

O autovalor $\lambda_1 = 1,040136$ representa a característica de singularidade da matriz J_{SQV} e, portanto não é utilizado na montagem das áreas.

O autovalor $\lambda_2 = 4,314794$ apresenta a primeira divisão em áreas no sistema. De um lado as barras 12, 31, 7, 8, 6, 32, 11, 5, 10, 9, 13, 39, 4 e 14, de outro as barras 38, 29, 28, 26 e 27, segundo está apresentado na Figura 38.

Já o autovalor $\lambda_3 = 4,877888$ apresenta a segunda divisão em áreas no sistema. De um lado as barras 34, 20, 36, 33, 23, 35, 19, 22, 21, 24, 16 e 15, de outro as

barras 38, 29, 28, 39, 9, 1, 37, 26, 25, 8, 7, 30 e 2, segundo está apresentado na Figura 39.

Deve-se notar que uma mesma área aparece tanto no *mode-shape* do autovalor $\lambda_2 = 4,314794$ quanto no *mode-shape* do autovalor $\lambda_3 = 4,877888$. Esta área envolve o gerador 38. No caso do *mode-shape* do autovalor $\lambda_3 = 4,877888$, a área determinada ao redor do gerador 38 é adicionada das barras 1, 37, 25, 30 e 2. As barras 39, 9, 8 e 7 já pertencem à outra área.

Como após a análise do autovalor λ_3 o número de barras agregadas total chegou para 36, o critério ε_l foi atendido e o algoritmo interrompido, finalizando o processo de busca das áreas, tendo sido utilizados apenas os três menores autovalores. Logo, a divisão das áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV} do sistema *New England* é apresentada na Figura 40.

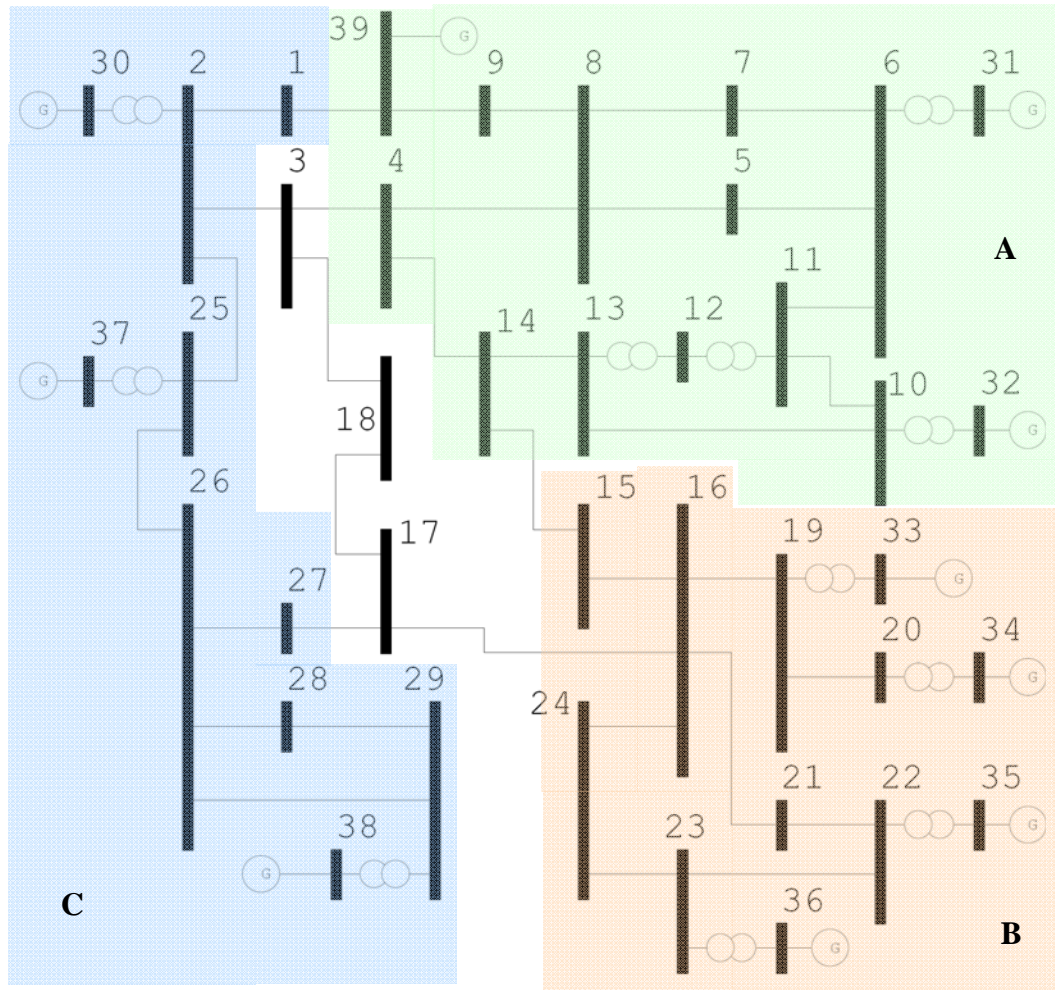


Figura 40 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema New England

Na Tabela 37 está a divisão obtida pelos menores autovalores da matriz J_{SQV} do sistema IEEE 14 barras.

Tabela 37 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema New England

<i>Área</i>	<i>Barras PQ</i>	<i>Barras PV</i>
A	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	31, 32, 39
B	15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24	33, 34, 35, 36
C	1, 2, 25, 26, 27, 28, 29	30, 37, 38

IV.5.1.3 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 deste algoritmo adotado para a busca de áreas é igual ao $\arccos(0,982)$, que representada um ângulo de 10,9 graus. O resultado obtido está na Tabela 38 e na Figura 41.

Tabela 38 – Áreas pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} do Sistema New England

<i>Áreas</i>	<i>Barras PQ</i>	<i>Barras PV</i>
A	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14	31, 32
B	15, 16, 21, 22, 23, 24	35, 36
C	2, 3, 17, 18, 25, 26, 27	30, 37
D	19, 20	33, 34
E	1, 9	39
F	28, 29	38

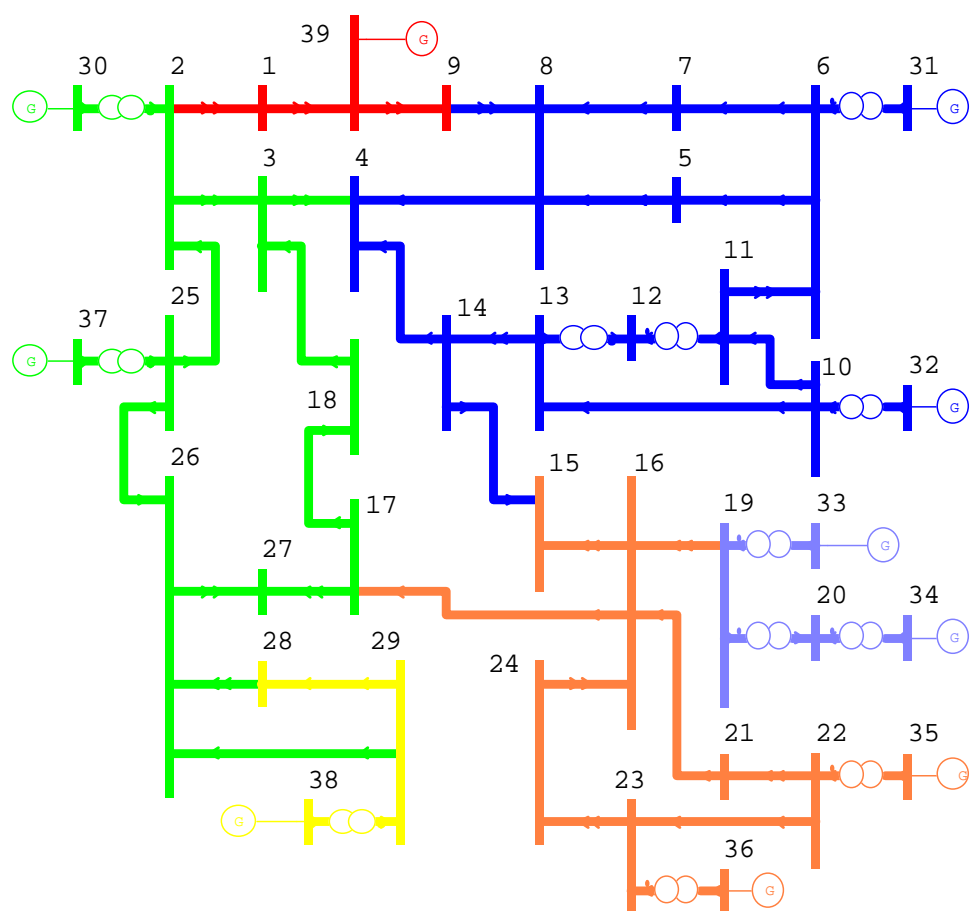


Figura 41 – Áreas pelas linhas da matriz J_{SQV} do Sistema New England

IV.5.1.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , estão exibidas na Tabela 39 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Tabela 39 – Barras piloto do sistema New England

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SQV}	
Área	Barras	Área	Barras
A	12 e 7	A	6 e 11
B	20 e 23	B	21 e 22
C	29 e 28	C	2 e 25
		D	20 e 19
		E	9 e 1
		F	29 e 28

Para os próximos sistemas, a avaliação das áreas por sensibilidade não será mais realizada em virtude da dificuldade de se compilar e analisar o mapeamento da sensibilidade realizado nos sistemas de pequeno e médio porte.

IV.6 - Sistema IEEE 118 barras

As características principais do sistema IEEE 118 barras estão na Tabela 40 e na Figura 42 está a topologia. Para este sistema não foi executada a análise de sensibilidade de tensão. Serão comparados os resultados obtidos apenas entre a avaliação dos menores autovalores e das linhas da inversa da matriz J_{SQV} .

Tabela 40 – Características principais do sistema IEEE 118 barras

<i>Principais Parâmetros do Sistema</i>	<i>Quantidade</i>
Barras / Barras PV	118 / 54
Circuitos/Transformadores	186 / 9
Carga Ativa	3668 MW
Carga Reativa	1438 Mvar

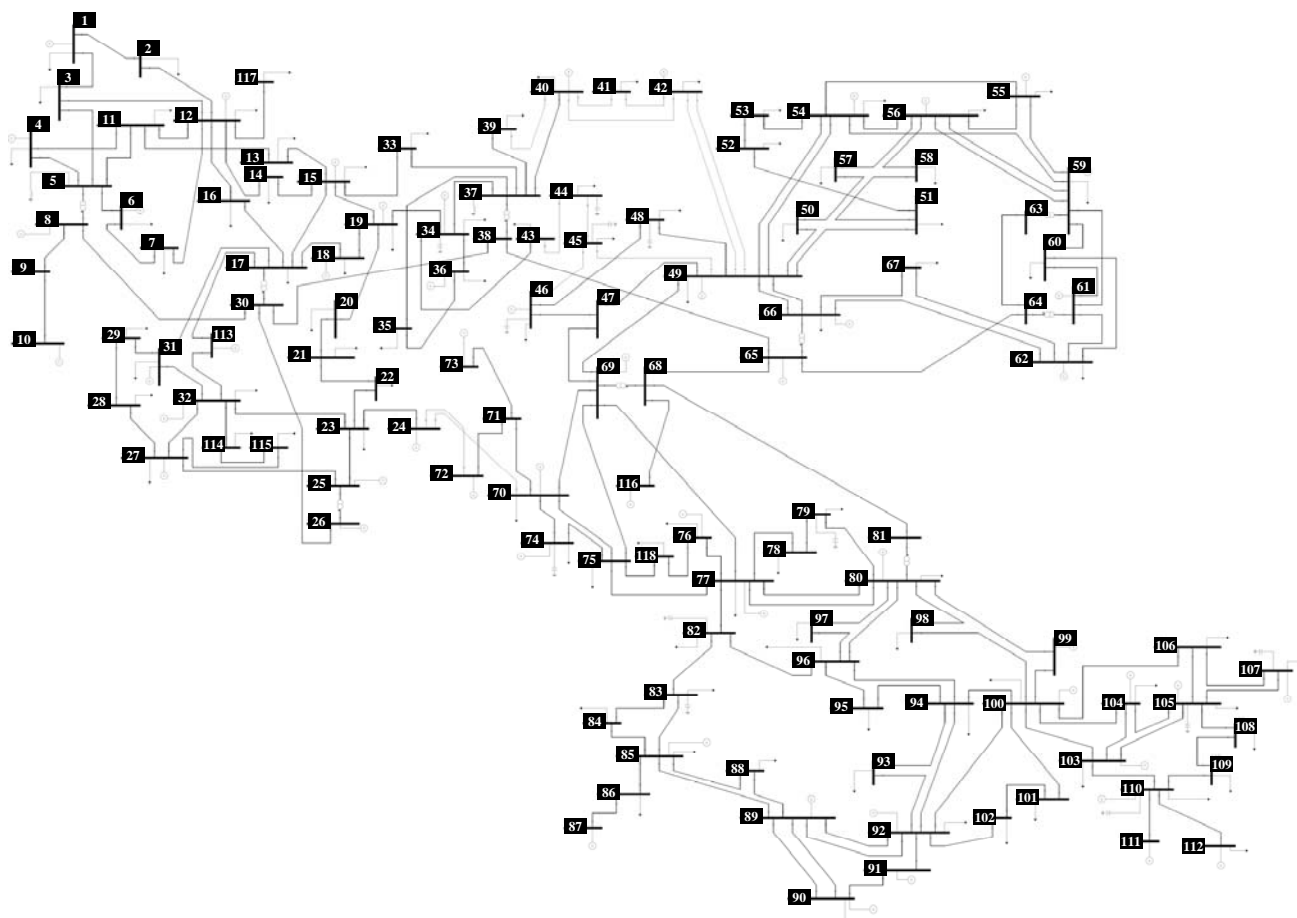


Figura 42 – Sistema IEEE 118 barras

IV.6.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Considerando como módulo mínimo para inclusão da barra via *mode-shape* o valor de σ igual a 0,4, ε_1 superior a 70% e ε_2 igual a 10, foram calculados os autovalores e autovetores da matriz J_{SQV} para o sistema IEEE 118 barras e aplicado o algoritmo descrito através da Figura 5. As áreas e seus respectivos números de barras estão na Tabela 41. Os dez menores autovalores estão na Tabela 42.

Tabela 41 – Áreas identificadas pelos menores autovalores no Sistema IEEE 118

Áreas	
Identificador	Número Total de Barras
1	37
2	35
3	27

Tabela 42 – Autovalores da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 118

Autovalores (λ_i)			
i	Módulo	i	Módulo
1	0,046736	6	1,839381
2	0,396122	7	2,158513
3	0,413667	8	2,599381
4	1,063532	9	3,308210
5	1,231193	10	3,712316

As três áreas obtidas via autovalores utilizam os três menores autovalores da Tabela 42. O A representação destas 3 áreas no diagrama unifilar do sistema estão em destaque na Figura 43 com traço contínuo na cor vermelha.

Na Tabela 43 estão listadas os números das barras inseridas em cada uma das áreas identificadas na Tabela 41.

Tabela 43 – Barras e áreas identificadas pelos menores autovalores no Sistema IEEE 118

Área	Barras
1	76, 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, 112, 118
2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 113, 114, 115, 117
3	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

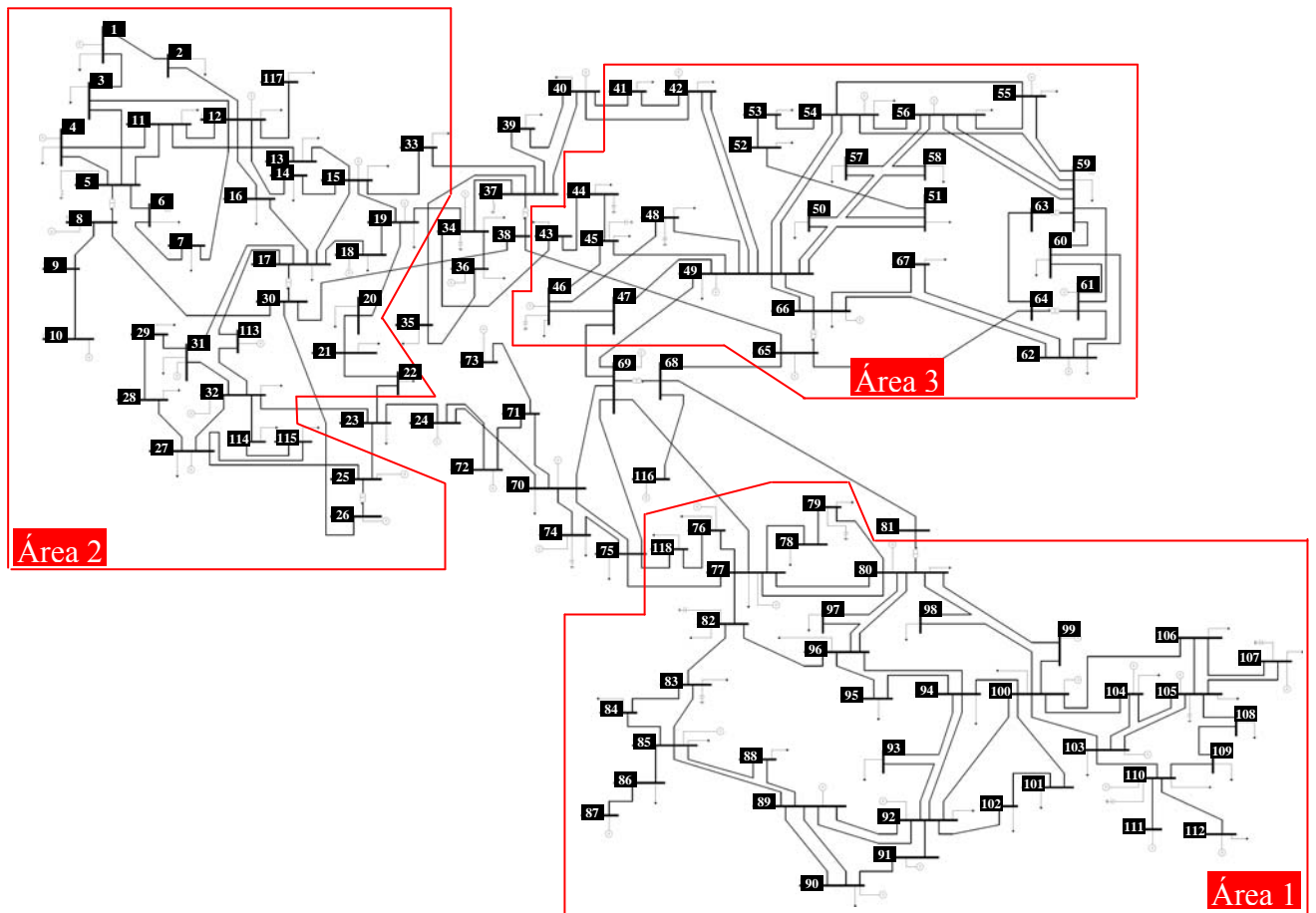


Figura 43 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema IEEE 118

IV.6.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 do algoritmo de busca de áreas é igual ao $\text{acos}(0,994)$, que representada um ângulo de 6,28 graus.

Na Tabela 45 estão listados os números das barras inseridas em cada uma das áreas identificadas na Tabela 44. Na Figura 45 as áreas A, B e C são representadas com o traço azul pontilhado e C, D e E com o traço azul contínuo.

Tabela 44 – Áreas identificadas pela matriz J_{SQV} no Sistema IEEE 118

Áreas	
Identificador	Número Total de Barras
A	36
B	18
C	43
D	5
E	4
F	3

Tabela 45 – Barras e áreas identificadas pela matriz J_{SQV} no Sistema IEEE 118

Área	Barras
A	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 113, 114, 115, 117
B	46, 47, 48, 49, 50, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67
C	68, 69, 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, 116, 118
D	34, 35, 36, 37, 38
E	51, 52, 53, 58
F	70, 71, 73

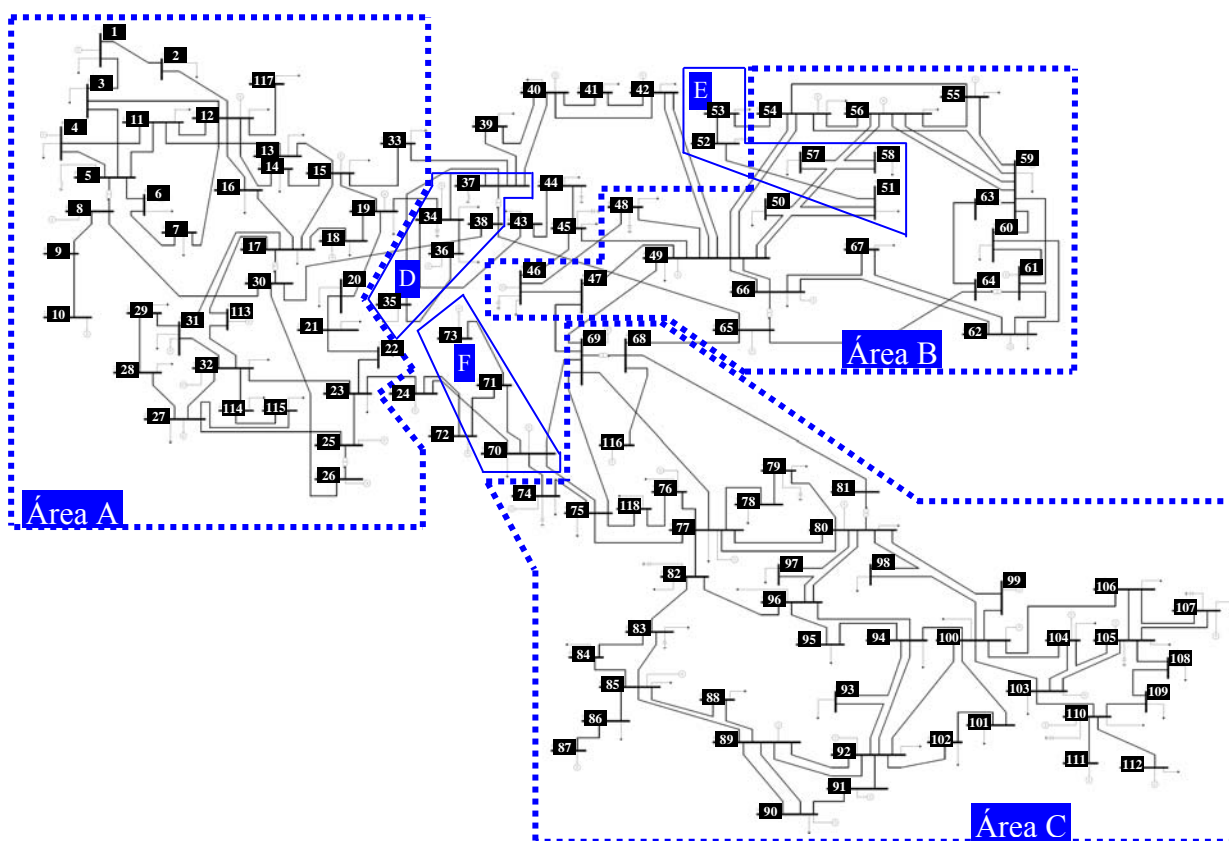


Figura 44 – Áreas pelas linhas da matriz J_{SQV} do Sistema IEEE 118

IV.6.1.3 - Comparação de resultados

A Figura 45 traz uma comparação dos resultados que foram obtidos via autovalores versus avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} . Há uma correspondência significativa entre as áreas obtidas.

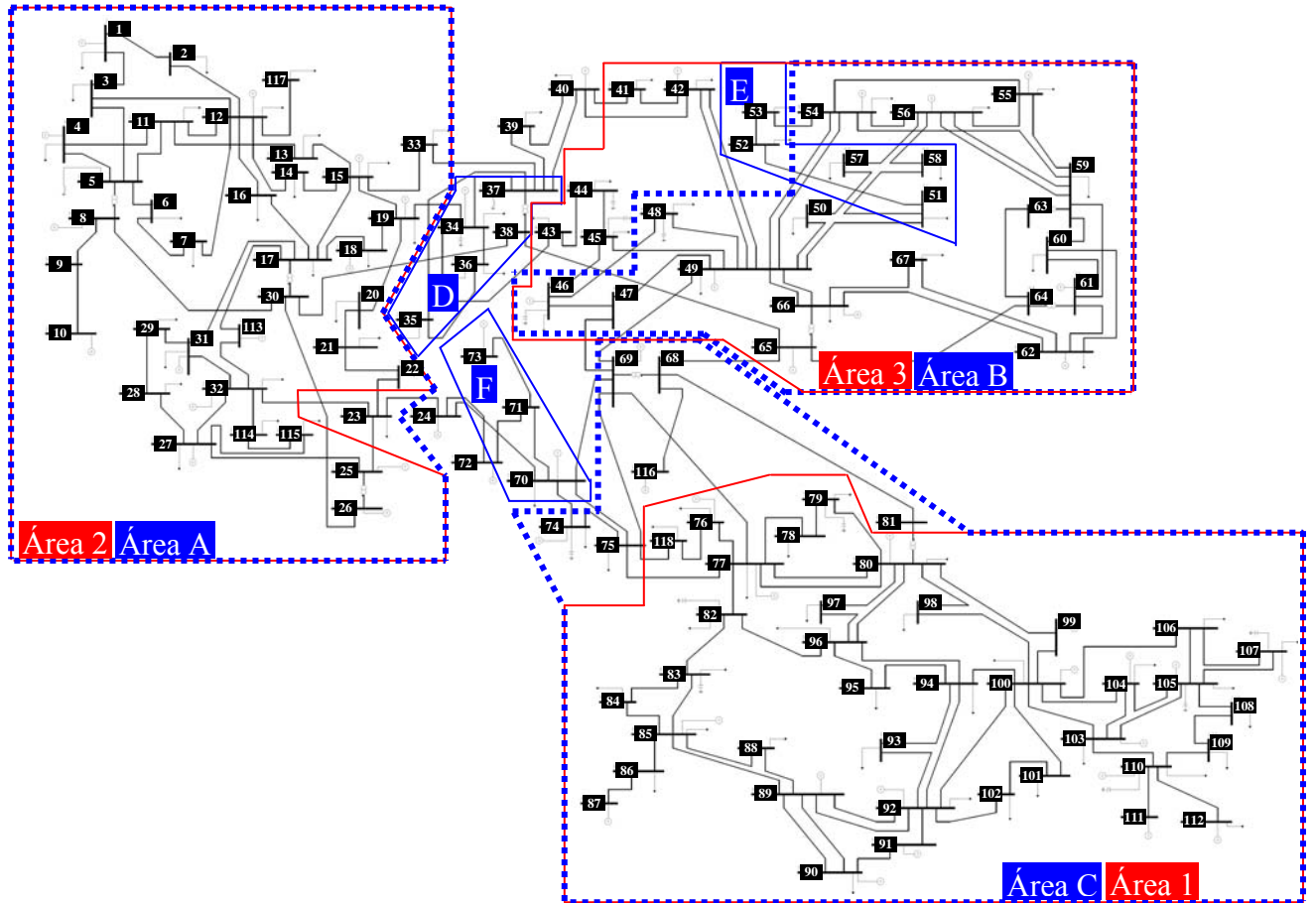


Figura 45 – Comparação dos resultados de busca por áreas no Sistema IEEE 118

IV.6.1.4 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} , estão exibidas na Tabela 46 a seleção das 2 primeiras barras candidatas de cada método a condição de barras piloto.

Tabela 46 – Barras piloto do sistema IEEE 118

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SQV}	
Área	Barras	Área	Barras
1	109 e 106	A	17 e 30
2	9 e 3	B	63 e 60
3	53 e 52	C	94 e 96
		D	37 e 38
		E	51 e 52
		F	71

Na Figura 46 estão em destaque as posições das barras piloto selecionadas pelos autovalores e pelas linhas da inversão da matriz J_{SQV} . Em vermelho estão as barras relacionadas ao mode-shape e em azul as barras relacionadas à matriz J_{SQV} .

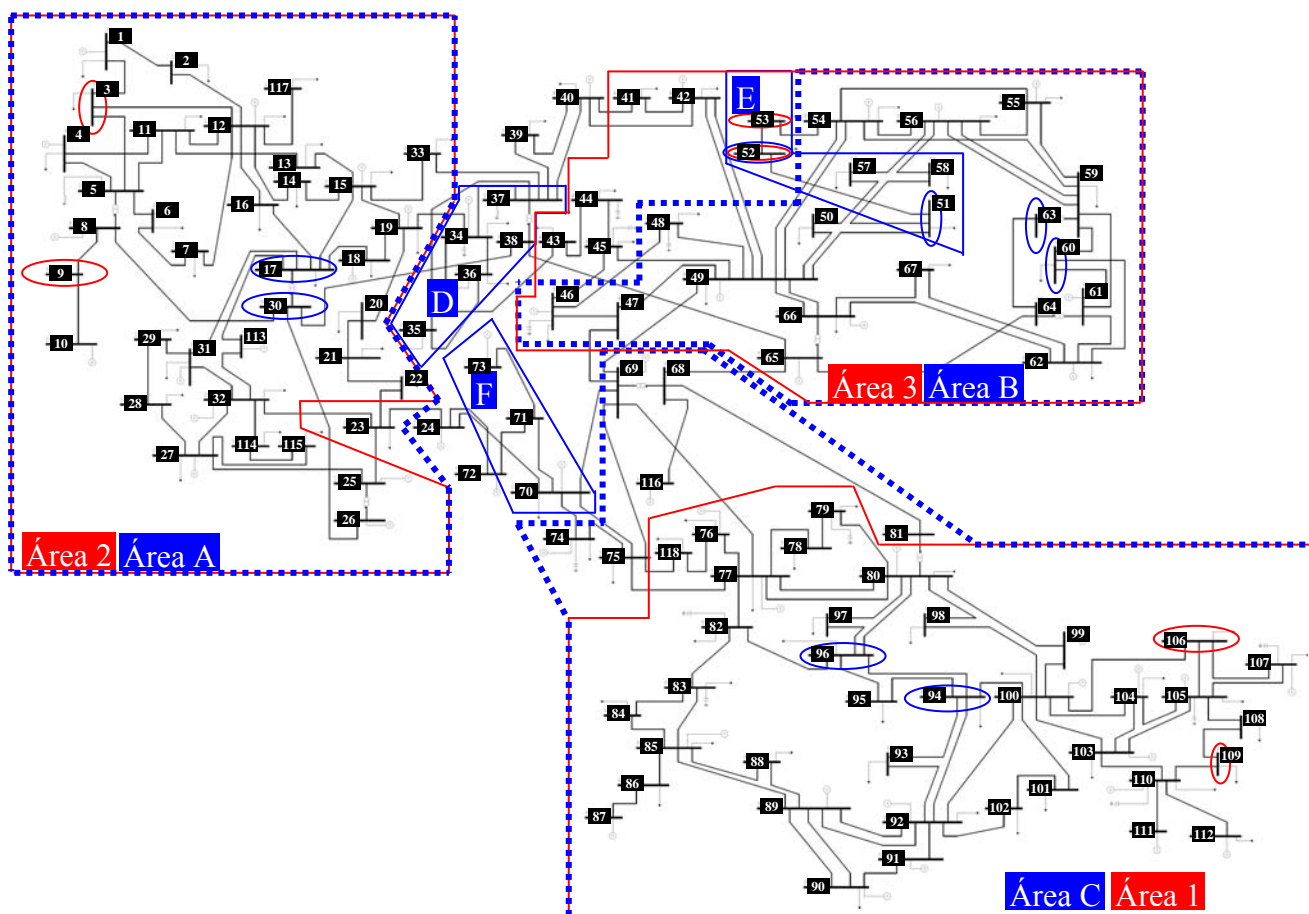


Figura 46 – Posição de barras piloto no Sistema IEEE 118

IV.6.1.5 - Estudo de desacoplamento entre as áreas

Com o intuito de demonstrar que as áreas de controle de tensão determinadas anteriormente possuem o desacoplamento esperado, será aplicada a solução da curva de carga no sistema IEEE 118 barras.

A curva de carga em valores percentuais do carregamento inicial do sistema é mostrada na Figura 47, sendo que estes fatores são aplicados a todas as barras de carga deste sistema. Esta curva é composta de 168 pontos, o que corresponde a uma semana completa com patamares de 1 hora, e tem por objetivo representar uma semana típica de verão com início em um domingo [58].

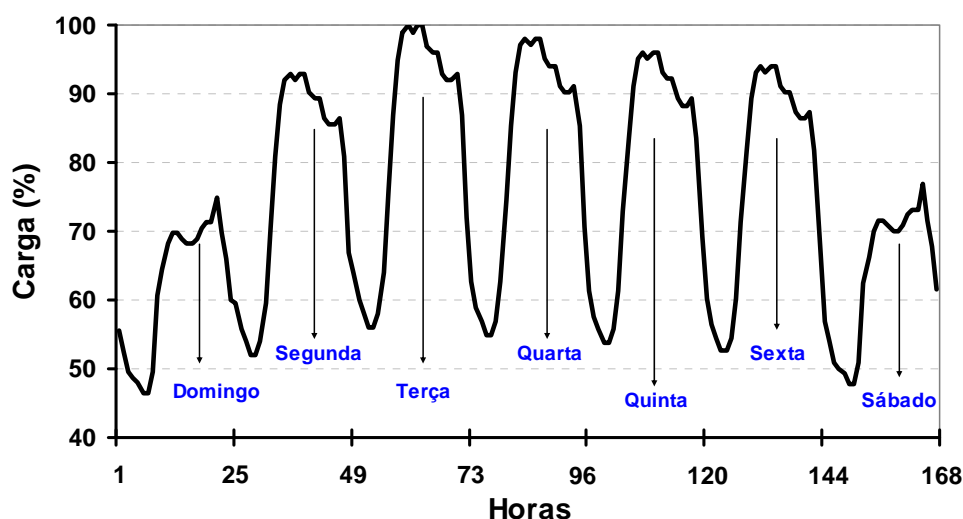


Figura 47 – Curva de Carga Aplicada ao Sistema IEEE 118

Embora esta curva de carga originalmente seja aplicada tanto a carga ativa quanto a carga reativa, neste estudo a curva exibida na Figura 47 será aplicada somente à parte reativa da carga. A parte ativa da carga permanecerá constante enquanto a parte reativa acompanha a trajetória da curva. Tanto a carga ativa quanto reativa neste sistema são consideradas do tipo potência constante.

Outro aspecto do estudo realizado é que a curva de carga será aplicada somente em uma das três áreas determinadas para o sistema IEEE 118 barras através dos menores autovalores. A área escolhida é a área 1 da Figura 46. O intuito é

comparar o impacto da curva de carga nas tensões das barras dentro da área 1 e fora da área 1. Como em todo o sistema IEEE 118 há um número significativo de geradores controlando tensões bem próximas as barras de carga, o que levaria a uma diminuição da sensibilidade das barras de carga fora da área 1 em relação à curva de carga, na área 2 todos os geradores tiveram seu controle de tensão travado. A idéia principal desta medida é deixar evidente o desacoplamento.

As barras cujas tensões foram monitoradas na área 2 foram escolhidas por estarem próximas ao limite da área, estando assim mais próximas também dos limites da área 1, o que as torna mais próximas eletricamente da área 1. As barras escolhida na área 2 foram as barras de número 20, 21 e 22 e na área 1 foram as barras de número 93, 94 e 95. A Figura 48 destaca o posicionamento destas barras nas respectivas áreas.

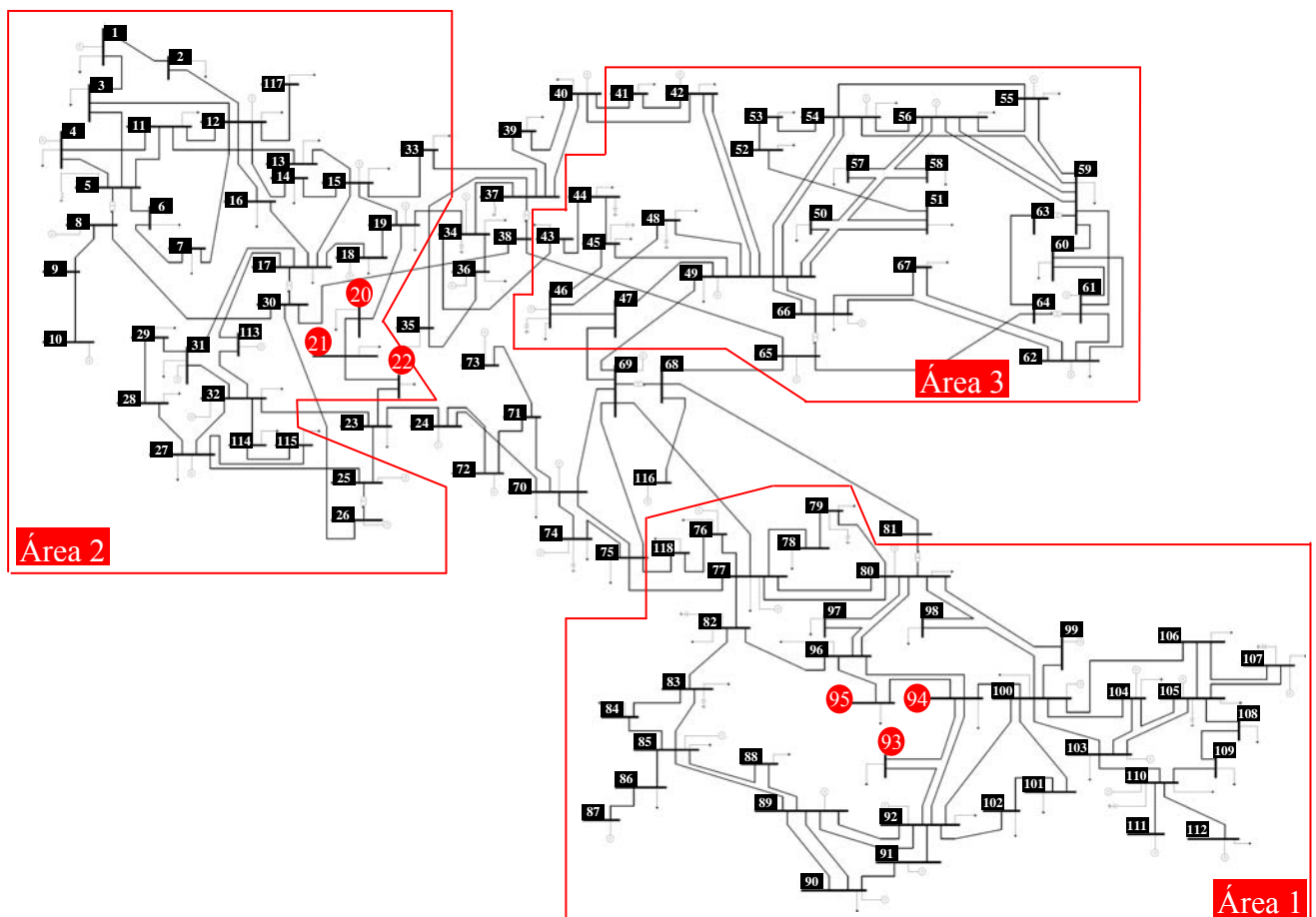


Figura 48 – Barras monitoradas na execução da curva de carga no Sistema IEEE 118

Após a execução da curva de carga para a parte reativa das cargas da área 1, as tensões monitoradas exibiram o perfil que está exposto na Figura 49.

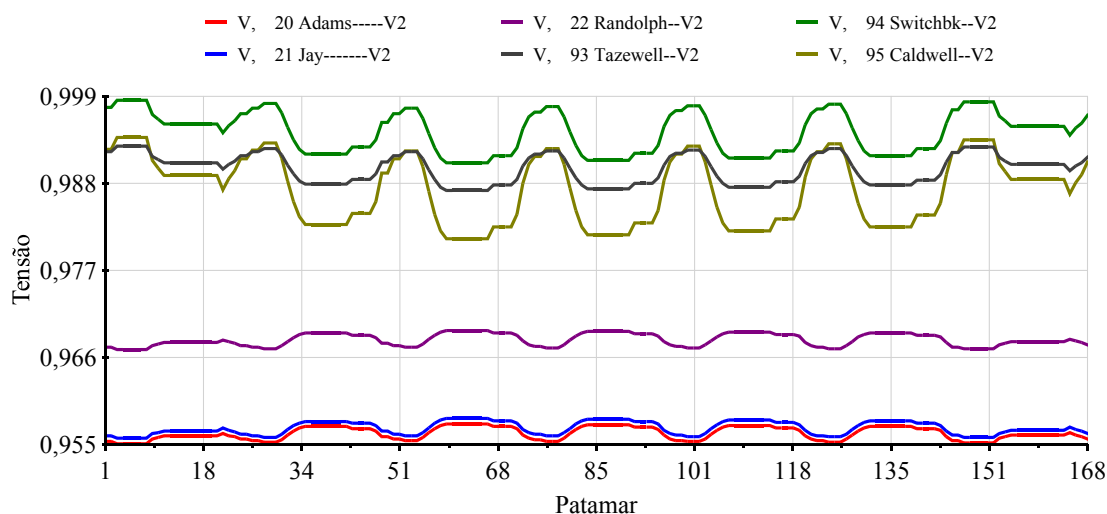


Figura 49 – Perfil de tensão das barras monitoradas na aplicação da curva de carga

Na Figura 49 observa-se que mesmo anulando todo o controle de tensão na área 2 da Figura 48, a variação de tensão das barras 20, 21 e 22 em função da curva de carga reativa aplicada a todas as cargas da área 1 é bem pequena, mantendo-se a tensão bem constante ao longo da aplicação da curva. As pequenas variações acontecem durante as rampas da carga reativa na área 1. Já para as barras dentro da área 1, a tensão das barras 93, 94 e 95 acompanha o perfil da curva de carga reativa aplicativa.

Este teste de aplicação de uma curva de carga reativa evidencia o desacoplamento que deve haver entre as tensões de áreas distintas.

IV.7 - Sistema S/SE Brasileiro 730 barras

As características principais do sistema S/SE brasileiro 730 barras estão apresentadas na Tabela 47. Para este sistema não foi executada a análise de sensibilidade de tensão. Serão comparados os resultados obtidos apenas entre a avaliação dos menores autovalores e a avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} .

Tabela 47 – Características principais do sistema S/SE brasileiro 730 barras

Principais Parâmetros do Sistema	Quantidade
Barras / Barras PV	730 / 116
Circuitos/Transformadores	1146 / 300
Carga Ativa	28565,3 MW
Carga Reativa	6573,9 Mvar

IV.7.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Considerando como módulo mínimo para inclusão da barra via *mode-shape* o valor de σ igual a 0,45, ε_1 igual a 50% e ε_2 igual a 200, foram calculados os autovalores e autovetores da matriz J_{SQV} para o sistema S/SE brasileiro 730 barras e aplicado o algoritmo descrito através da Figura 5. Os dez menores autovalores estão na Tabela 48.

Tabela 48 – Autovalores da matriz J_{SQV} do S/SE brasileiro 730 barras

Autovalores (λ_i)			
i	Módulo	i	Módulo
1	0,055132	6	0,342554
2	0,113508	7	0,354081
3	0,139362	8	0,373664
4	0,232743	9	0,461324
5	0,318539	10	0,559746

As áreas identificadas, seus respectivos números totais de barras e as barras pertencentes à mesma estão na Tabela 49.

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 1 / Número total de barras: 19						
41	B.SUL-CS 1MQ	242	R.VERDE-REAT	778	CORUMBA 138	787
229	B.ALTO--230	247	C.BRAVA--138	779	INHUMAS 138	788
230	S.MESA--230	762	ANHANGUERA69	780	FIRMINOP.138	789
232	BSUL--13.8A	776	ANAP.SUL138	781	IPORA 138	792
239	S.MESA---138	777	ANAPOLIS 138	786	B. ALTO 69	

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 2 / Número total de barras: 156							
196	CAMPINAS13	769	G.NORTE 138	952	CHARQUEA--69	1189	BAGE-2---230
198	POCOS---13.8	770	G.SUDESTE138	967	FLORIANO-138	1197	ALEGRETE4-69
223	BANDEI-TERC	771	G.SUDES138FC	968	FLORIANO--69	1202	CHARQUEA-B69
246	MARIMBON13.8	772	G. SUL 138	986	ILHOTA---69	1203	CHARQUEA-A69
252	N.PECANH-230	773	CAMPINAS 138	987	ILHOTA---A00	1205	HARMONIA--69
298	VREDONDII138	774	CAMPINASFICT	988	ILHOTA---B00	1213	GUARITA--230
299	NPECANHII138	775	DAIA 138	989	ILHOTA1---13	1224	MACAMBARA-69
455	SAO JOSE-088	808	JMESQUIT1-13	990	ILHOTA2---13	1225	MACAMBARA230
506	JURUMIR-1MAQ	809	JMESQUIT2-13	1042	PFUNDO---138	1228	PALMARES-138
512	SGRANDE-4MAQ	838	ACHATEAUB138	1043	PFUNDO---T00	1230	PELOTAS1-138
514	XAVANTE-3MAQ	841	CEU-AZUL-138	1044	PFUNDO---T13	1232	OSORIO-A-138
525	JAGUARI-2MAQ	842	DVIZINHOS138	1079	ANASTACIO138	1233	PELOTAS1--69
526	PARAIBU-1MAQ	844	FIGUACU--138	1086	DOU-ESUL-230	1234	OSORIO-B-138
554	ASSIS--Y--88	845	FBELTRAO-138	1087	DOU-FICT-ESU	1235	PELOTAS2-138
555	ASSIS-EEVP88	847	GUAIRA---138	1088	I.GRANDE-230	1236	PELOTAS3-230

Área 2 / Número total de barras: 156							
611	LNGARC-Y-230	848	JMESQUITA138	1089	IVINHEM.E138	1237	DRPELOT--138
612	LNGARCEZ-230	849	MCRONDON-138	1090	DOU-ESUL-138	1238	PMEDICI--138
613	LNGARCEZ--88	850	MEDIANEIR138	1094	M.D.R.P--138	1239	PMEDICI--230
615	XAVANTES-230	851	PALOTINA-138	1095	MIMOSO-E-138	1240	D.POSORIO138
711	BOISSUCAN138	855	REALEZA--138	1096	NAN-ESUL138	1241	EVELHA---138
712	CARAGUA--138	857	TOLEDO---138	1110	ACARAY----11	1245	QUINTA----69
713	CARAGUA---88	862	CGAUCHA--138	1111	ACARAY---138	1246	QUINTA---230
717	EMBRAER---88	863	GOIO-ERE-138	1127	MIMO 138	1253	SBORJA-2--69
720	JAGUARI-- 88	866	MAMBORE--138	1129	COUTO MI 138	1254	SBORJA-2-230
721	MAIRIPORA 88	867	MANDAGUAR138	1131	A SCAFFA 138	1260	PALEGRE-6-TA
723	MANAH-IAP--Y	874	UMUARAMA-138	1133	ALMOX 138	1261	PALEGRE-6-TB
724	PARAIBUNA 88	875	ANDIRA---138	1135	AQUIDA 138	1262	PALEGRE-6-69
725	RPARDO-2-138	876	ANDIRA---88	1137	CORU 138	1274	DSCRUZ1--230
727	SJCAMPOSY 88	877	ANDIRA-A-138	1139	MIRAN 138	1275	SCRUZ 1--230
728	SJCAMPOS2Y88	880	BANDEIRAN138	1141	MARACJU 138	1276	SMARIA---138
729	SKOL-----88	881	BVPARAISOI38	1143	DOU NAC 138	1280	SMARTA---138
730	S.SEBAST-138	882	CPROCOPIO138	1162	JACUI-6MQ-13	1281	SMARTA---230
732	TBAIXADA-138	885	FLORESTOP138	1171	PMED-A1MQ-13	1283	SROSA----230
733	TEBAR-----88	888	IVAIPORA-138	1172	PMED-B1MQ-13	1285	SVICENTE-138
735	VIC-AUX--138	900	ALEGRETE-0MQ	1179	PALEGRE-6-13	1290	TCOROAS--138
752	CDOURADA13-A	901	CHARQUEA-2CF	1181	VAIRES----13	1295	URUGUAIA5-69
754	AEROPORTO138	917	PFUNDO1---13	1182	ALEGRETE--69	1296	URUGUAIA5-230
767	MEIAPONTE138	918	PFUNDO2---13	1185	ALEGRETE2-69	1297	VAIRES----T1
768	XAVANTES 138	930	ALEGRETE-138	1186	ALEGRET2-230	1298	VAIRES---69

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 3 / Número total de barras: 8							
304	TMARIAS-04MQ	342	MCLAROS2-138	381	TMARIAS--289	398	VPALMA---345
341	MCLAROS--345	380	TMARIAS--345	382	TMARIAS--138	399	VPALMA---138

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 4 / Número total de barras: 49							
45	VITORIA--SIN	178	GRAJAU--138	202	UTEC----FIC2	278	PALMARES-138
140	ADRIANO--345	179	GRAJAU-FIC	203	UTEC--2--1MQ	279	TAP-4----138
141	ADRIAN-TRAFO	180	JACAREP--138	257	I.POMBOS-GER	280	TAP-3----138
142	ADRIAN-FICTI	181	JACARE FIC	258	I.POMBOS-138	281	TAP-2----138
144	JACAREP-345	184	SCRUZ----138	269	IMBA-TAP-138	282	TAP-1----138
147	CAMPOS--345	185	ANGRA -- 138	270	MERITI-MANOB	283	T.SUL---138
149	VITORIA--345	186	CATAGUAZ-138	271	MERITI---138	284	F.CANECA-138
150	VITORIA--FIC	194	ADRIAN-TERCI	272	TRIAGEM--138	393	UBERAB-A-138
172	IMBARIE-138	195	ADRIANO-13.8	273	SAUDADE--138	394	VALADARE-230
173	ADRIANO--138	197	JACARE TER	274	V.REDOND-138	750	CDOURADA11
174	FCE/CELF-RLE	199	VITORIA--TER	275	CASCADUR-138		
175	CAMPOS-138	200	UTEC----FIC1	276	BRISAMAR-138		
177	VITORIA--138	201	UTEC--1--1MQ	277	ZIN-----138		

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 5 / Número total de barras: 22							
24	M.MOR.B--4MQ	630	ARACATUBA138	655	PENAPOLIS 69	675	VVENTU-Y-138
330	JAGUARA--138	636	CATAND-2-138	661	PROMISSAO138	907	JLACERDA-1MQ
503	JUP138--2MAQ	645	IBITINGA-138	665	SJRPRETO-138	1008	JLACERDA--69
517	IBITING-3MAQ	646	IPORA----138	666	SJRPRETO- 69	1009	JLACERDA--44
518	NAVANHA-3MAQ	653	NAVANHAN-138	671	UBARANA--138		
519	PROMISS-2MAQ	654	PENAPOLIS138	672	UBARANA-- 69		

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 6 / Número total de barras: 85							
28	P.COLOMB-4MQ	649	JALES---138	816	CCOMPRIDO230	960	CURITIBA-230
31	SCRUI3.8-1MQ	674	VOTUPO-2-138	817	GPARIGOTS230	976	GRAVATAI-525
60	F.IGUACU-765	682	CACONDE--138	818	GPARIGOTU230	985	ILHOTA---138
61	FOZ-500-60HZ	683	BELAVISTA138	819	PILARZINH230	995	ITA -525
62	IV-FOZ-1-765	688	EUCUNHA--138	820	UBERABA--230	999	IVAIPORA-525
63	IV-FOZ-2-765	691	ITAIPAVA-138	821	UMBARA---230	1015	JOINVILL-230
65	IVAIPORA-765	693	LIMOIRO-138	824	GBMUNHOZ-500	1016	JOINVILL-138
66	IVAIPORA-525	702	SCARLOS--138	831	PGROSSAS-230	1027	JOINVILL--69
67	IVAIPORA--69	703	SCARLOS2-138	834	SMATEUS--230	1028	LONDRINA-500
68	IVAIPO-TRAFO	742	PARELHEI--88	925	SSANTIAG1-19	1029	LONDRI-E-230
69	IV-ITA-1-765	743	MONGAGUA-138	926	SSANTIAG2-19	1034	PALHOCA-230
70	IV-ITA-2-765	746	PERUIBE--138	927	SSANTIAG3-19	1054	SMATEUSE-230
72	ITABERA--765	747	REGISTRO-138	928	SSANTIAG4-19	1060	SSANTIAG-525

Área 6 / Número total de barras: 85							
73	ITA-TP-1-765	759	CDOURADA--69	933	AREIA----525	1062	SSANTIAG-A00
74	ITA-TP-2-765	800	GBMUNHOZ1-16	934	AREIA----230	1063	SSANTIAG-B00
190	PCOL-CPFL138	801	GBMUNHOZ2-16	935	AREIA----69	1066	TIJUCAS--138
520	3IRMAOS-1MAQ	802	GBMUNHOZ3-16	938	BLUMENAU-525	1106	ITAIPU60-500
521	CACONDE-1MAQ	803	GBMUNHOZ4-16	939	BLUMENAU-230	1107	ITAIPU60-7MQ
522	E.CUNHA-4MAQ	804	GPARGOT1-13	940	BLUMENAU-138	1210	GRAVATAI---2
523	LIMOEIR-2MAQ	805	GPARGOT2-13	943	CANOINHA-230		
583	EMBUGUACU138	806	GPARGOT3-13	956	CNOVOS---525		
647	ISOLTEIRA138	807	GPARGOT4-13	959	CURITIBA-525		

Tabela 49 – Áreas pelos menores autovalores no sistema 730 barras

Área 7 / Número total de barras: 11							
315	BARREIRO-SIN	386	OPRETO2--138	389	OPRETO2-CEST	1499	IGARAPE--138
333	JUIZFORA-CAP	387	OPREFIC1-138	859	APARANA--138	1500	IGARAPE-01MQ
346	MESQUITA-SIN	388	OPREFIC2-138	870	PARANAVAI138		

A Figura 50 traz um posicionamento aproximado das áreas obtidas através dos menores autovalores. O mapa da Figura 50 não possui todas as barras indicadas na Tabela 49.

A área 1 traz as barras no entorno de Brasília, incluindo barras em Goiás próximas a cidade de Goiânia, em número total reduzido.

A área 2 traz principalmente as barras de 138 kV e 230 kV no estado do Rio Grande do Sul. Embora haja um número expressivo de barras nesta área, uma parcela das barras não está diretamente conectada a esta região como, por exemplo, as barras de número 196 e 198, que estão nas áreas dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Isto se deve ao valor de σ considerado (0,45) e também ao fato de que para cada autovalor haverá sempre a divisão do sistema em duas partes, surgindo assim à possibilidade de uma barra ser incluída em uma área na qual esta não seja parte efetiva. Embora isto ocorra nesta área, o resultado principal está preservado que é a área existente no estado do Rio Grande do Sul.

A área 3 traz poucas barras da área MG no entorno da barra 304 (Usina de Três Marias). O fato de não ter sido agregadas outras barras pode estar relacionado também à questão do valor de σ , definido como critério. A área 7 traz também algumas barras da área Minas Gerais próximas a cidade de Ouro Preto na região central do estado de Minas Gerais.

A área 4 mostra a área de tensão formada através dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. As barras desta área estão todas bastante próximas, à exceção

da barra número 750. A área 5 traz barras localizadas no oeste do estado de São Paulo, próximo a usina de JUPIA no nível de 138 kV e 230 kV.

A área 6 forma uma área contendo a transmissão de 765 kV do sistema da usina de ITAIPU agregando algumas usinas próximas à cidade de São Paulo e também parte do sistema existente no estado do Paraná, pertence à rede da empresa ELETROSUL.

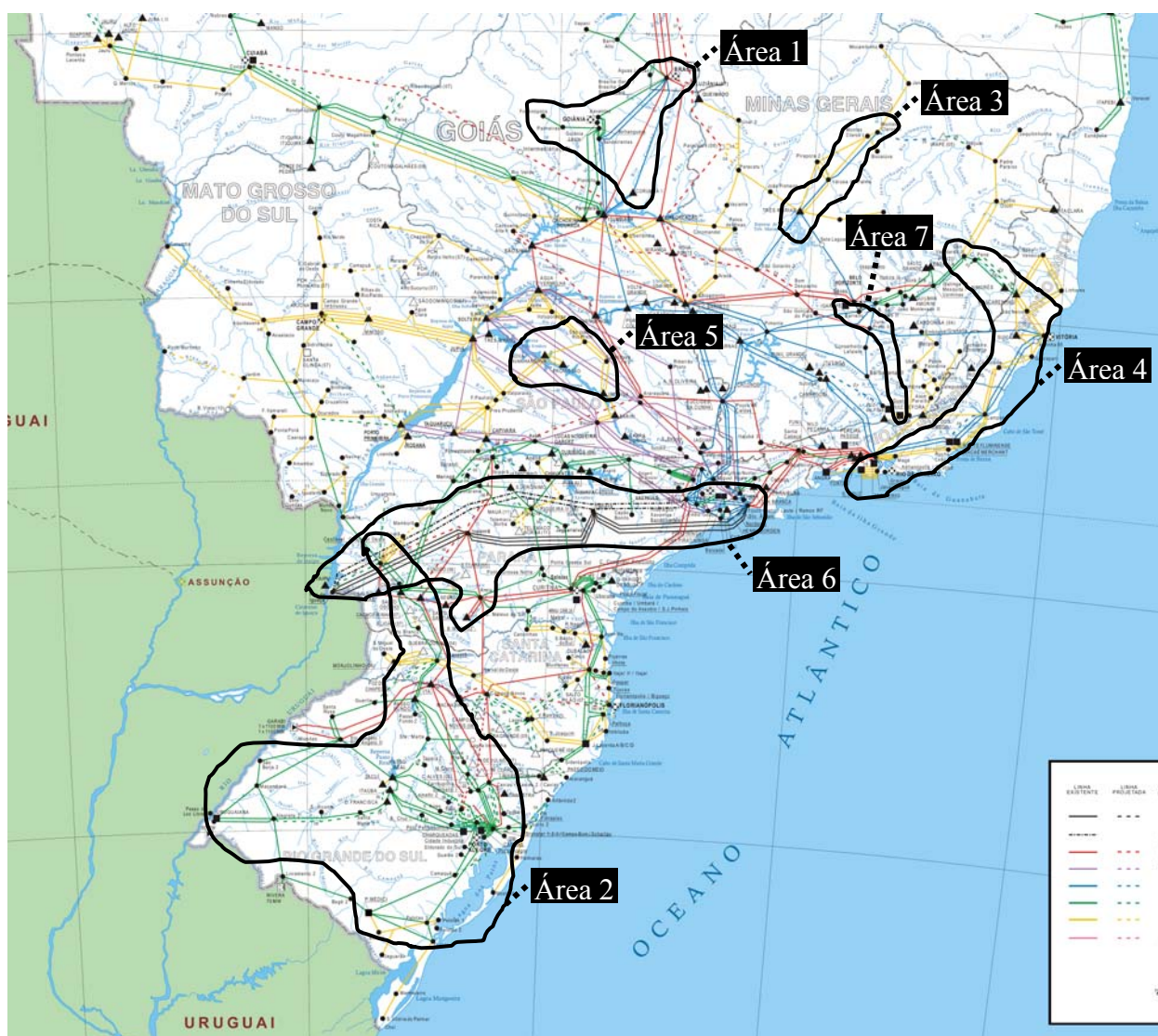


Figura 50 – Áreas pelos menores autovalores do Sistema S/SE 730 barras

IV.7.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 do algoritmo de busca de áreas é igual ao $\cos(0,819)$, que representada um ângulo de 35 graus. As áreas identificadas consideradas aquelas cujo número de barras total foi superior a 20, seus respectivos números totais de barras e as barras pertencentes à mesma estão na Tabela 50.

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema 730 barras

Área A / Número total de barras: 72							
10	ANGRA---1MQ	173	ADRIANO--138	202	UTEC---FIC2	274	V.RECOND-138
14	FUNIL---2MQ	174	FCE/SELF-RLE	250	N.PECANH-GER	275	CASCADUR-138
30	SCRUZ19--1MQ	175	CAMPOS-138	251	N.PECANH-138	276	BRISAMAR-138
31	SCRUZ13.8-1MQ	177	VITORIA--138	252	N.PECANH-230	277	ZIN-----138
44	GRAJAU---2MQ	178	GRAJAU---138	253	FONTES---GER	278	PALMARES-138
45	VITORIA--SIN	179	GRAJAU-FIC	254	FONTES---138	279	TAP-4----138
104	CPAULIST-500	180	JACAREP--138	255	P.PASSOS-GER	280	TAP-3----138
105	ANGRAREIS500	181	JACARE FIC	256	P.PASSOS-138	281	TAP-2----138
106	ADRIANO--500	182	FUNIL---138	257	I.POMBOS-GER	282	TAP-1----138
107	T.GRAJAU-500	183	CPAULIST-138	258	I.POMBOS-138	283	T.SUL----138
140	ADRIANO--345	184	SCRUZ---138	260	S.CECILI-138	284	F.CANECA-138
141	ADRIAN-TRAFO	185	ANGRA -- 138	261	VIGARIO BOMB	298	VREDONDII138
142	ADRIAN-FICTI	186	CATAGUAZ-138	262	VIGARIO--138	299	NPECANHII138
144	JACAREP-345	194	ADRIAN-TERCI	269	IMBA-TAP-138	458	APARECID-230
147	CAMPOS--345	195	ADRIANO-13.8	270	MERITI-MANOB	459	APARECID-088
149	VITORIA--345	197	JACARE TER	271	MERITI---138	461	S.CABECA-230
150	VITORIA--FIC	199	VITORIA--TER	272	TRIAGEM--138	462	S.CABECA--88
172	IMBARIÉ-138	200	UTEC----FIC1	273	SAUDADE--138	600	TAUBATE--230

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema 730 barras

Área B / Número total de barras: 226							
12	LCBARRET-5MQ	358	NEVESFIC-138	563	R.PRETO--440	859	APARANA--138
16	FURNAS---7MQ	362	PASSOS---138	564	R.PRETO--138	860	CMOURAO--138
20	MARIMBON-8MQ	364	PCALDAS1-138	567	S.BARBARA440	861	CIANORTE-138
22	M.MOR.A--6MQ	365	PCALDAS2-138	568	S.BARBARA138	862	CGAUCHA--138
24	M.MOR.B--4MQ	367	PIMENTA--345	571	SUMARE---440	863	GOIO-ERE-138
28	P.COLOMB-4MQ	368	PIMENTA--138	572	SUMARE---138	864	JALVORADA138
100	MARIMBON-500	370	SSIMAO---500	630	ARACATUBA138	865	LOANDA--138
101	ARARAQUA-500	372	TAQUARIL-345	632	BARIRI-A-138	866	MAMBORE--138
120	PCALDAS--345	373	TAQUARIL-230	636	CATAND-2-138	867	MANDAGUAR138
121	POCOSTRAFO	374	TAQUARIL-CAP	638	FLORIDA2-138	868	MARINGA--230
131	MASC-----345	376	TAQUARIL-138	645	IBITINGA-138	869	MARINGA--138
132	MASC.FICTICI	377	TAQUAFIC-230	646	IPORA---138	870	PARANAVAI138
134	LBARRETO-345	380	TMARIAS--345	647	ISOLTEIRA138	871	SDUMONT--138
136	FURNAS---345	381	TMARIAS--289	648	PPRIMA-A-138	874	UMUARAMA-138
170	PCALDAS--138	382	TMARIAS--138	649	JALES---138	878	APUCARANA230
171	CAMPINAS-138	384	OPRETO2--500	653	NAVANHAN-138	879	APUCARANA138
187	MASC-----138	385	OPRETO2--345	654	PENAPOLIS138	884	FIGUEIRA-230
190	PCOL-CPFL138	386	OPRETO2--138	655	PENAPOLIS 69	888	IVAIPORA-138
213	MARIMBON-345	387	OPREFIC1-138	657	PPRIMAV--138	954	CMOURAO--230
214	MARIMB-TRAFO	388	OPREFIC2-138	659	PPRUDENT-138	1031	MARINGA-E230
216	PCOLOMBIA345	389	OPRETO2-CEST	660	PPRUDE-2-138	1069	XANXERE--230
300	EMBORCA-04MQ	390	SGOTARDO-500	661	PROMISSAO138	1071	XANXERE---13
301	JAGUARA-03MQ	394	VALADARE-230	665	SJRPRETO-138	1072	XANXERE---00
303	SSIMAO--05MQ	396	VGRANDE--345	666	SJRPRETO- 69	1079	ANASTACIO138
304	TMARIAS-04MQ	398	VPALMA---345	671	UBARANA--138	1086	DOU-ESUL-230
305	VGRANDE-04MQ	399	VPALMA---138	672	UBARANA-- 69	1087	DOU-FICT-ESU
308	BARBACEN-345	500	AVERMEL-6MAQ	673	VALPARAIS138	1088	I.GRANDE-230
309	BARBACEN-138	501	ISOLTE-18MAQ	674	VOTUPO-2-138	1089	IVINHEM.E138

Área B / Número total de barras: 226							
310	BARBACEN-CAP	502	JUP440-10MAQ	675	VVENTU-Y-138	1090	DOU-ESUL-138
313	BARREIRO-345	503	JUP138--2MAQ	682	CACONDE--138	1094	M.D.R.P--138
314	BARREIRO-138	507	CAPIVAR-4MAQ	683	BELAVISTA138	1095	MIMOSO-E-138
315	BARREIRO-SIN	511	ROSANA--2MAQ	686	DESCALVA-138	1096	NAN-ESUL138
316	BARREIRO-FIC	513	TAQUARU-1MAQ	688	EUCUNHA--138	1110	ACARAY---11
320	EMBORCAC-500	517	IBITING-3MAQ	691	ITAIPIVA-138	1111	ACARAY---138
321	EMBORCAC-138	518	NAVANHA-3MAQ	692	LIMEIRA--138	1127	MIMO 138
325	JAGUARA--500	519	PROMISS-2MAQ	693	LIMOEIRO-138	1129	COUTO MI 138
326	JAGUARA--345	520	3IRMAOS-1MAQ	695	MGUACU--138	1131	A SCAFFA 138
327	JAGUARA--REA	521	CACONDE-1MAQ	696	MMIRIM--138	1133	ALMOX 138
328	JAGUARA-FT-R	522	E.CUNHA-4MAQ	697	MGUACU-2-138	1135	AQUIDA 138
330	JAGUARA--138	523	LIMOEIR-2MAQ	698	MMIRIM-2-138	1137	CORU 138
331	JUIZFORA-345	535	AVERMELHA500	699	PFERREIRA138	1139	MIRAN 138
332	JUIZFORA-138	536	AVERMELHA440	700	PINHAL--138	1141	MARACJU 138
333	JUIZFORA-CAP	537	AVERMELHA138	701	RCLARO--138	1143	DOU NAC 138
336	LAFAIETE-345	538	ISOLTEIRA440	702	SCARLOS--138	1158	ITAUBA4MQ-13
337	LAFAIETE-138	539	JUPIA---440	703	SCARLOS2-138	1162	JACUI-6MQ-13
338	LAFAIETE-CAP	541	JUPIA---138	705	SJVIST2-138	1175	PREAL-2MQ-13
341	MCLAROS--345	542	3IRMAOS--440	784	CATALAO 138	1215	ITAUBA---230
342	MCLAROS2-138	546	ROSANA---138	785	GOIASFERT138	1216	JACUI---138
344	MESQUITA-500	547	TAQUARUCU440	838	ACHATEAUB138	1242	PREAL---138
345	MESQUITA-230	548	TAQUARUCU138	839	CASCADEL-230	1243	PREAL---230
346	MESQUITA-SIN	549	CAPIVARA-440	840	CASCADEL-138	1278	SMARIA3--230
349	NEVES---500	550	CAPIVARA-138	841	CEU-AZUL-138	1280	SMARTA--138
350	NEVES---345	552	ASSIS---440	844	FIGUACU--138	1281	SMARTA--230
351	NEVES---REA	559	ARARAQUA-440	847	GUATIRA--138	1499	IGARAPE--138
353	NEVES---138	560	ARARAQUA-138	850	MEDIANEIR138	1500	IGARAPE-01MQ
354	NEVES---SIN	561	BAURU---440	851	PALOTINA-138		
356	NEVESFIC-345	562	BAURU---138	854	PINHEIROS138		

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema 730 barras

Área C / Número total de barras: 66							
40	BGERAL 34.5	232	BSUL--13.8A	759	CDOURADA--69	776	ANAP.SUL138
41	B.SUL-CS 1MQ	236	FCE/CEB-BSUL	760	ANHANGUER230	777	ANAPOLIS 138
217	ITUMBIARA345	238	RVERDE FCE	761	ANHANGUE.138	778	CORUMBA 138
218	BANDEIRA-345	239	S.MESA--138	762	ANHANGUERA69	779	INHUMAS 138
219	BRAS.SUL-345	240	R.VERDE-FICT	763	GOIANIA--230	780	FIRMINOP.138
220	BSULFIC230A	241	R.VERDE-TERC	764	G.LESTE--13A	781	IPORA 138
221	BSULFIC230B	247	C.BRAVA--138	765	G.LESTE--13B	782	QUIRINOP.138
222	BANDEIRA-FIC	307	AVATINGU-138	766	XAVANTES-230	783	RIO VERDE138
223	BANDEI-TERC	750	CDOURADA11	767	MEIAPONTE138	786	B. ALTO 69
224	B.SUL-FIC-6.	751	CDOURADA13	768	XAVANTES 138	787	NIQUEL---230
225	ITUMBIA-230	752	CDOURADA13-A	769	G.NORTE 138	788	N.TOCANT-230
226	BANDEIR-230	753	CDOURADA13-N	770	G.SUDESTE138	789	CODEMIN--230
227	B.GERAL-230	754	AEROPORTO138	771	G.SUDES138FC	790	MORRINHOS230
228	BSUL---230	755	C.DOURADA138	772	G. SUL 138	791	P. DAS EMAS
229	B.ALTO--230	756	CDOURADA-230	773	CAMPINAS 138	792	SAMA---138
230	S.MESA--230	757	CDOURADA-230	774	CAMPINASFICT		
231	R.VERDE-230	758	CDOURADA-FIC	775	DAIA 138		

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema 730 barras

Área D / Número total de barras: 105							
48	IBIUNA---3MQ	424	ANHANG--230	480	H.BORDEN--88	591	CABREUVA-138
86	ITAIPU50-345	425	ANHANGUERA-1	484	PIRATINI-230	593	STOANGELO440
87	IBIUNA---500	426	ANHANGUERA-2	485	PIRATINI-088	594	STOANGELO345
103	CAMPINAS500	427	TR.CEN-1-230	487	INTERL--345	595	STOANGELO138
123	CAMPINAS-345	428	TR.CEN-2-230	488	INTERL--230	677	AERO-GUAR138
124	CAMP.TRAFO	429	CENTRO-I-230	491	XAVANTES-345	678	STEREZIN-138
126	GUARULHO345B	430	CENTRO-I-088	492	BANDEIRA.345	680	AMPARO---138
127	GUARULHO345A	431	CENTRO-I-020	493	BANDEIRA-088	681	BRAGANCA-138
129	MOGI-----345	435	NORTE---345	494	BANDEIR-34.5	694	MAIRIPORA138
130	MOGI--FIC	436	NORTE---088	495	M.FORNAZ-345	709	BERTIOG2-138
160	GUARULHOS230	444	NORDESTE 345	496	M.FORNAZ--88	710	BIRITUBA-138
161	MOGI-----230	445	NORDESTE 88	525	JAGUARI-2MAQ	711	BOISSUCAN138
193	MOGI-TER-13.	446	MOGI-EP--230	526	PARAIBU-1MAQ	712	CARAGUA--138
400	HBO-E--5G+2P	447	MOGI-EP---88	532	EMBU-SINC-16	717	EMBRAER---88
401	HBO-S--6U+N8	448	MOGI-Q---230	533	SAA--SINC-16	720	JAGUARI-- 88
403	PIRATIN-13.8	449	ITAPETI--230	574	B.JARDIM-440	721	MAIRIPORA 88
404	PIRATIN-14.4	454	SAO JOSE-230	575	B.JARDIM-138	725	RPARDO-2-138
410	E.SOUZA--230	455	SAO JOSE-088	577	OESTE--AY440	726	SIFAO22--138
411	E.SOUZA--088	463	ITAPETI--345	578	OESTE--AE440	727	SJCAMPPOS 88
412	CBA-EP--230	471	BAIXADA--345	581	EMBUGUACU440	728	SJCAMPPOS2Y88
413	B.JARDIM-088	472	BAIXADA--230	582	EMBUGUACU345	729	SKOL-----88
415	OESTE---088	473	BAIXADA 88KV	584	CABREUVA-440	730	S.SEBAST-138
419	ANHANGUERA-3	474	SUL-----345	586	CABRV--TRAFO	734	V.CARVAL-138
420	ANHANGUERA-4	475	SUL-----088	587	CABRV--TRAFO	736	TBS-AUX--138
421	PIRITUBA-230	476	A.SERRA1-345	588	CABREUVA13.8		
422	PIRITUBA-088	477	A.SERRA2-345	589	CABREUVA13.8		

Área D / Número total de barras: 105						
423	ANHANG---345	478	H.BORDEN-230	590	CABREUVA-230	

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema 730 barras

Área E / Número total de barras: 70						
60	F.IGUACU-765	804	GPARGOT1-13	927	SSANTIAG3-19	990
61	FOZ-500-60HZ	805	GPARGOT2-13	928	SSANTIAG4-19	999
62	IV-FOZ-1-765	806	GPARGOT3-13	933	AREIA---525	1015
63	IV-FOZ-2-765	807	GPARGOT4-13	934	AREIA---230	1016
65	IVAIPORA-765	816	CCOMPRIDO230	935	AREIA---69	1027
66	IVAIPORA-525	817	GPARGOTS230	938	BLUMENAU-525	1028
67	IVAIPORA--69	818	GPARGOTU230	939	BLUMENAU-230	1029
68	IVAIPOTRAFO	819	PILARZINH230	940	BLUMENAU-138	1034
69	IV-ITA-1-765	820	UBERABA--230	943	CANOINHA-230	1035
70	IV-ITA-2-765	821	UMBARA---230	959	CURITIBA-525	1054
72	ITABERA--765	824	GBMUNHOZ-500	960	CURITIBA-230	1060
73	ITA-TP-1-765	829	PGROSSAN-230	967	FLORIANO-138	1062
74	ITA-TP-2-765	830	PGROSSAN-138	968	FLORIANO--69	1063
76	T.PRETO--765	831	PGROSSAS-230	985	ILHOTA---138	1066
800	GBMUNHOZ1-16	833	SABARA---138	986	ILHOTA---69	1106
801	GBMUNHOZ2-16	834	SMATEUS--230	987	ILHOTA---A00	1107
802	GBMUNHOZ3-16	925	SSANTIAG1-19	988	ILHOTA---B00	990
803	GBMUNHOZ4-16	926	SSANTIAG2-19	989	ILHOTA1---13	999

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema 730 barras

Área F / Número total de barras: 22						
808	JMESQUIT1-13	852	PBRANCO--230	919	SOSOR1A4-3MQ	1047
809	JMESQUIT2-13	853	PBRANCO--138	920	SOSOR5E6-2MQ	1050
842	DVIZINHOS138	855	REALEZA--138	1041	PFUNDO---230	1213
845	FBELTRAO-138	857	TOLEDO---138	1042	PFUNDO---138	1283
848	JMESQUITA138	917	PFUNDO1---13	1043	PFUNDO---T00	
849	MCRONDON-138	918	PFUNDO2---13	1044	PFUNDO---T13	

Tabela 50 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema 730 barras

Área G / Número total de barras: 72						
900	ALEGRETE-0MQ	1189	BAGE-2---230	1232	OSORIO-A-138	1261
901	CHARQUEA-2CF	1194	CAMAQUA--230	1233	PELOTAS1--69	1262
930	ALEGRETE-138	1196	CAMPOBOM-230	1234	OSORIO-B-138	1263
951	CHARQUEA-230	1197	ALEGRETE4-69	1235	PELOTAS2-138	1265
952	CHARQUEA--69	1200	CAXIAS-2-230	1236	PELOTAS3-230	1266
962	FARROUPI-230	1202	CHARQUEA-B69	1237	DRPELOT--138	1267
963	FARROUPI--00	1203	CHARQUEA-A69	1238	PMEDICI--138	1268
964	FARROUPI--13	1204	POLOPETRO230	1239	PMEDICI--230	1273
976	GRAVATAI-525	1205	HARMONIA--69	1240	D.POSORIO138	1274
1171	PMED-A1MQ-13	1207	FARRO-----69	1241	EVELHA---138	1275
1172	PMED-B1MQ-13	1210	GRAVATAI---2	1245	QUINTA---69	1276
1179	PALEGRE-6-13	1218	PIRELLI--138	1246	QUINTA---230	1285
1180	PALEGRE-9-13	1219	LANSUL---138	1253	SBORJA-2--69	1290
1181	VAIRES-----13	1224	MACAMBARA-69	1254	SBORJA-2-230	1295
1182	ALEGRETE--69	1225	MACAMBARA230	1257	CINDUST--138	1296
1185	ALEGRETE2-69	1227	MASSEYSPR138	1258	CINDUST--230	1297
1186	ALEGRET2-230	1228	PALMARES-138	1259	PALEGRE4-230	1298
1188	ELDORADO-230	1230	PELOTAS1-138	1260	PALEGRE-6-TA	1299

A Figura 51 traz um posicionamento aproximado das áreas obtidas através dos menores autovalores. O mapa da Figura 51 não possui todas as barras indicadas na Tabela 50.

A área A mostra a área de tensão formada através dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Em relação à área 4 formada com os autovalores nota-se um maior número de barras agregadas.

A área B é composta basicamente pela junção de parte da rede do estado de MG, com a rede de 440 kV do estado de São Paulo e mais algumas barras da rede de 138 kV do norte do estado do Paraná. Esta área poderia vir a ser

subdividida se fosse reduzido o valor do ângulo de 35 graus, que é critério para formação das áreas de controle e, portanto, fundamental para o resultado final obtido.

A área C é composta por barras no entorno de Brasília, incluindo barras em Goiás próximas a cidade de Goiânia, tal como ocorreu na área 1 obtida através dos autovalores.

A área D corresponde ao sistema no entorno da capital do estado de São Paulo, incluindo toda a região metropolitana, mais algumas barras no nível de 440 kV, 500 kV, 345 kV e 230 kV que alimentam esta região.

A área E, tal como a área 6 dos menores autovalores, contém a transmissão de 765 kV do sistema da usina de ITAIPU, agregando algumas barras ao norte do estado do Paraná e também a rede de 230 kV no litoral do estado de Santa Catarina.

A área F é formada por uma pequena parte da rede de 230 kV a oeste do estado de Santa Catarina. Já a área G, tal como a área 2 obtida com os menores autovalores, é formada basicamente pelas barras de 138 kV e 230 kV do sistema existente no estado do Rio Grande do Sul, envolvendo principalmente a região de Porto Alegre e toda região a oeste do estado.

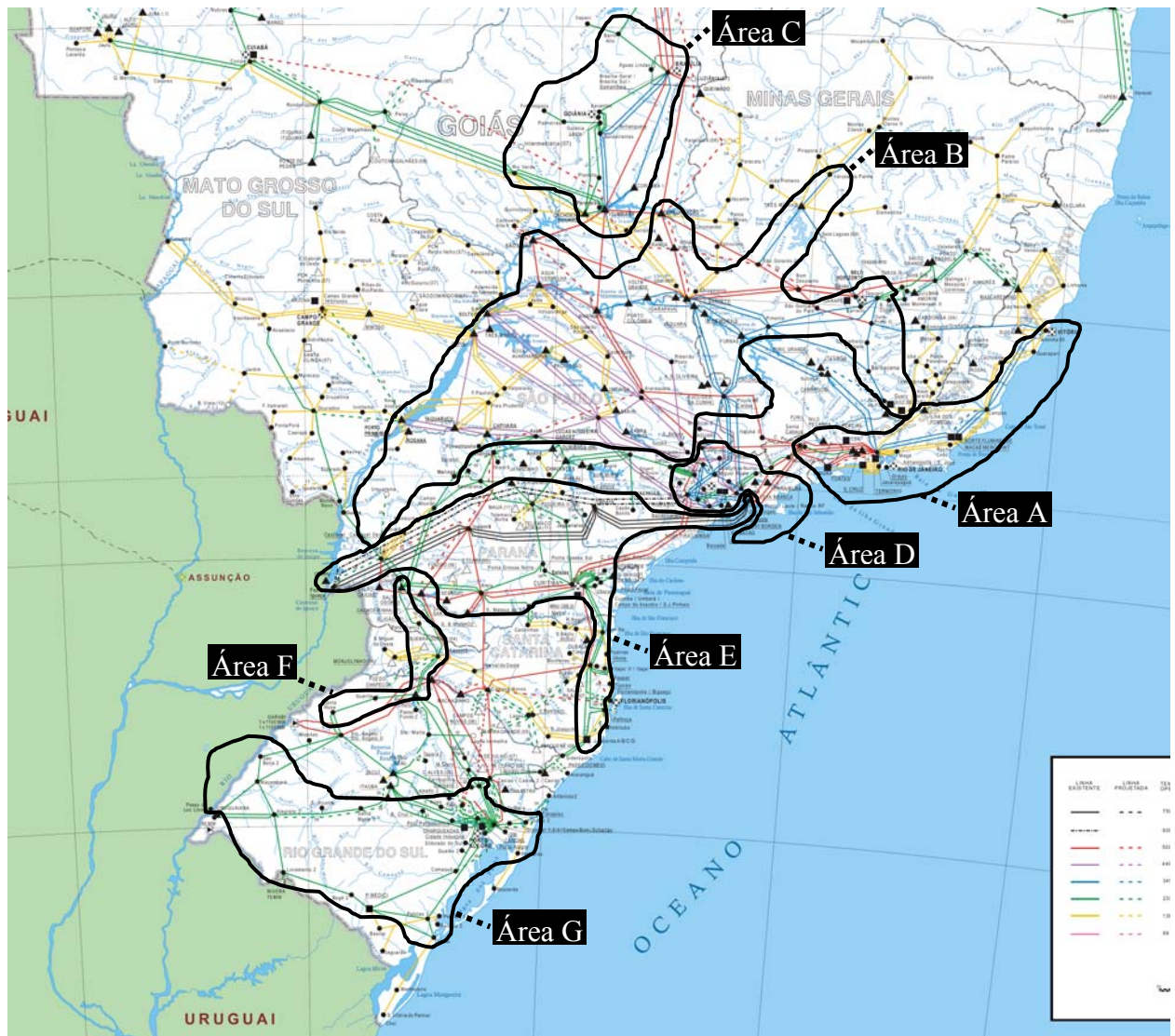


Figura 51 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema 730 barras

IV.7.1.3 - Barras piloto

Considerando os critérios definidos na metodologia para seleção de barras piloto, levando-se em consideração as barras PQ com maior módulo nos *mode-shape* de divisão das áreas e a equação (3.58) na avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} é exibida na Tabela 51 a seleção das 3 primeiras barras candidatas a barra piloto. As áreas consideradas são a área A obtida pelas linhas da inversa da matriz J_{SQV} e a área 4 obtida através dos menores autovalores da matriz J_{SQV} .

Estas áreas foram escolhidas porque o resultado nos dois métodos foi bastante semelhante, o que torna a comparação mais simples. Estas duas áreas representam a área de controle de tensão existente na área RJ/ES.

Tabela 51 – Barras piloto do sistema 730 barras

Metodologia			
Mode-Shape		Matriz J_{SOV}	
Área	Barras	Área	Barras
4	177, 150 e 149	A	279, 280 e 281

Na Figura 52 está a topologia da rede no entorno das barras apontadas para barra piloto na área 4 da Tabela 51 e na Figura 53 está a topologia da rede no entorno das barras apontadas para barra piloto na área A da Tabela 51. Tanto a barra próxima a região de Vitória quanto à barra de Grajaú são barras com compensadores síncronos e estas barras são conhecidas por agentes do setor como barras chave nesta região para o controle de tensão. Na Figura 54 está indicada a posição aproximada destas barras no mapa do sistema elétrico, indicando a região onde estariam localizadas as possíveis candidatas à barra piloto.

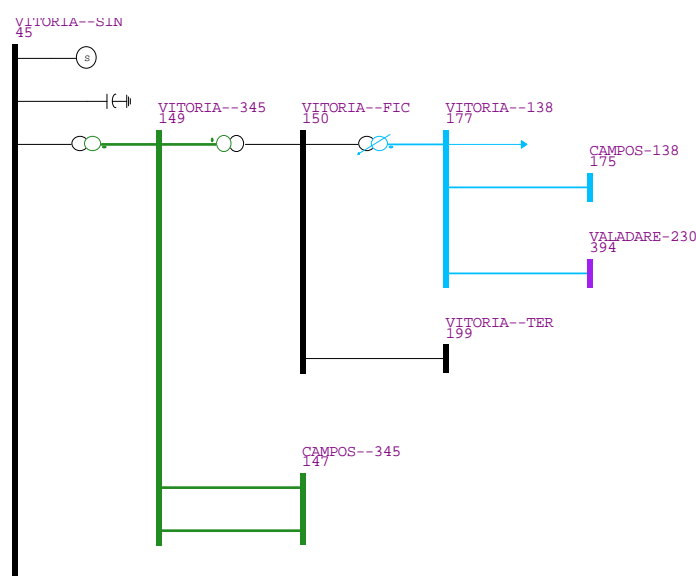


Figura 52 – Região próxima a barra VITORIA-SIN no sistema 730 barras

às cargas reativas na área A da Figura 51. Serão monitoradas as tensões das barras 140 (ADRIANO--345) e 144 (JACAREP-345) na área A, e das barras 308 (BARBACEN-345), 331 (JUIZFORA-345) e 336 (LAFAIETE-345) na área B que também está indicada na Figura 51. Na Figura 55 estão indicadas no mapa a posição destas barras monitoradas para a execução da curva de carga.

A curva de carga utilizada para as cargas reativas da área A é fornecida pelo *FRJ* real do dia 22 de fevereiro de 2005 (terça-feira) com intervalos de 10 minutos (143 pontos), conforme mostrado na Figura 56. O *FRJ* consiste no somatório da potência ativa que é importada pela área Rio, formada pelos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Este somatório é obtido nos pontos do sistema em 500 kV e 345 kV que são destacados na Figura 57.

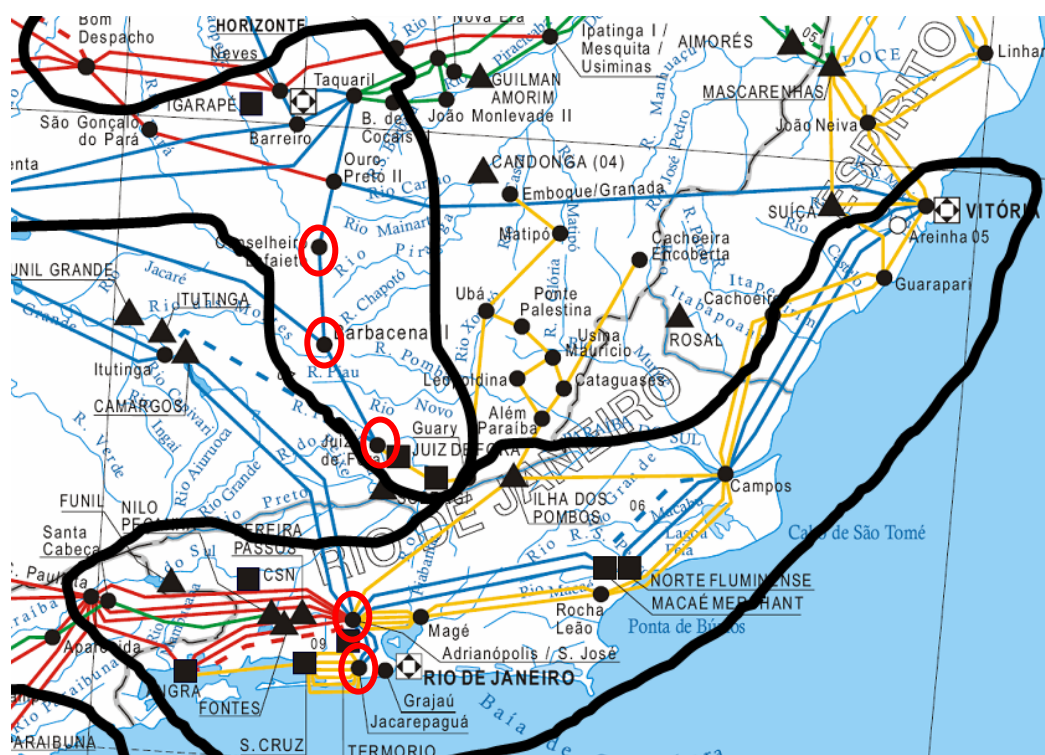


Figura 55 – Posição das barras monitoradas na execução da curva de carga no 730 barras

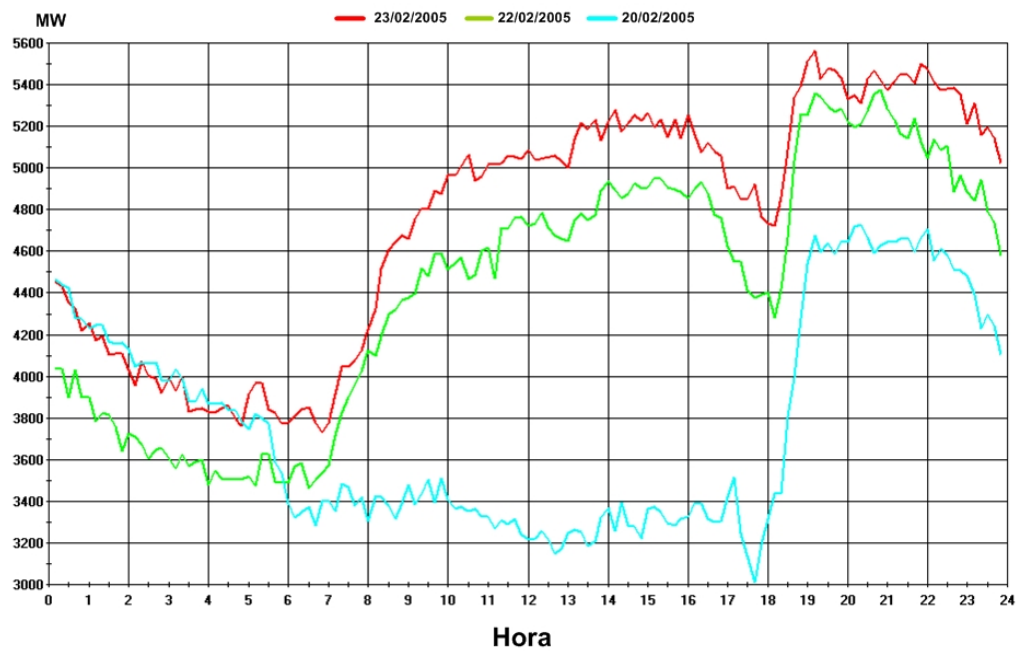


Figura 56 – FRJ para três dias de Fevereiro de 2005

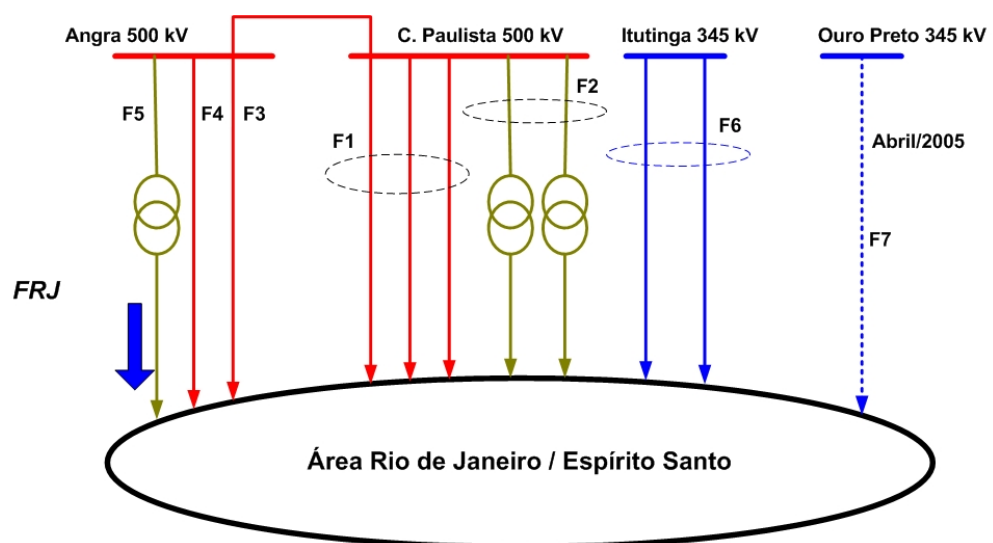


Figura 57 – Cálculo do FRJ

A curva da Figura 56 é normalizada em relação a seu valor máximo. A curva obtida (Figura 58) é utilizada como fator de carga que é aplicado a todas as barras com carga reativa na área A, mantendo-se a carga ativa igual ao caso base.

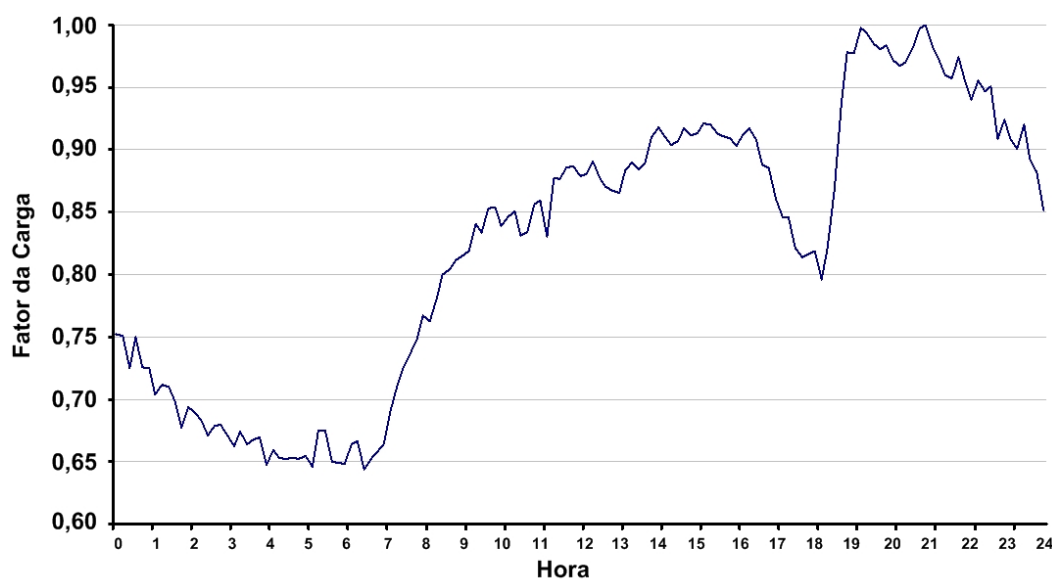


Figura 58 – FRJ normalizado pelo máximo da curva

Após a execução da curva de carga para a parte reativa das cargas da área A, as tensões monitoradas exibiram o perfil que está exposto na Figura 59.

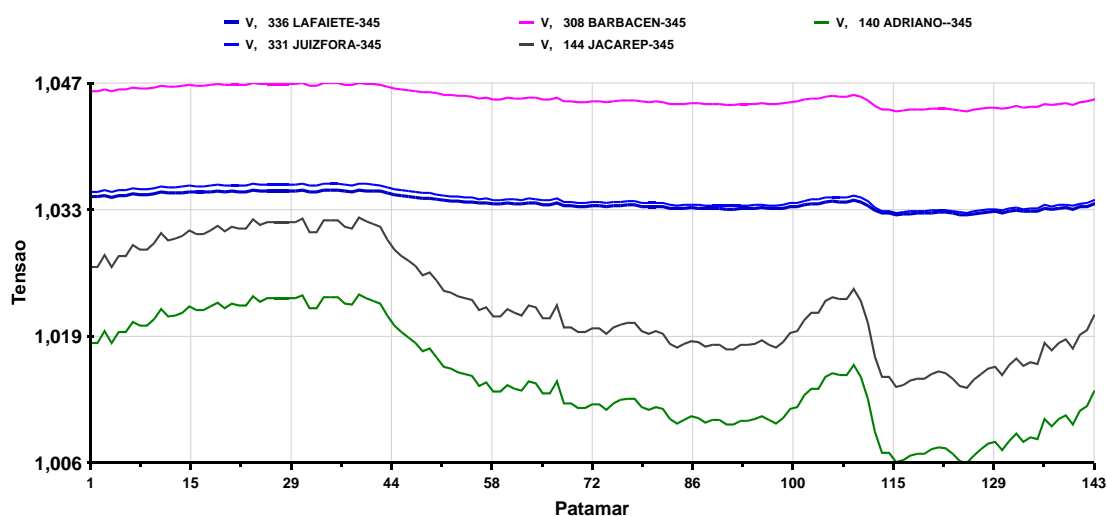


Figura 59 – Perfil de tensão das barras monitoradas na aplicação da curva de carga

No perfil de tensões apresentado na Figura 59 percebe-se que as barras da área B, que estão localizados no estado Minas Gerais, próximas à divisa com o estado do Rio de Janeiro, não são impactadas pela variação da tensão na área A causada pela aplicação da curva de carga reativa. Somente pequenas variações ocorrem durante as rampas da curva de carga. Já as barras da área A, que são barras de transmissão no nível de tensão de 345 kV, têm suas tensões fortemente influenciadas pela aplicação da curva de carga. A partir deste teste

pode-se notar que de fato há o desacoplamento desejado entre as áreas apontadas na busca de áreas de controle de tensão.

IV.8 - Sistema S/SE/CO Brasileiro 2149 barras

As características principais do sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras estão apresentadas na Tabela 52. Para este sistema não foi executada a análise de sensibilidade de tensão. Serão comparados os resultados obtidos apenas entre a avaliação dos menores autovalores e a avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV} .

Tabela 52 – Características principais do sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

<i>Principais Parâmetros do Sistema</i>	<i>Quantidade</i>
Barras / Barras PV	2149 / 255
Circuitos/Transformadores	3073 / 738
Carga Ativa	27680 MW
Carga Reativa	8743,1 Mvar

O sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras foi gerado a partir do caso “ONS - 1Q2008 - Janeiro Pesada”, caso base do primeiro quadrimestre de 2008 do Operador Nacional do Sistema (ONS), disponibilizado através do *site* da empresa [57]. Este caso base contém originalmente todo o sistema elétrico brasileiro, incluindo a região N/NE. O caso base foi reduzido utilizando o programa de equivalente de redes do ANAREDE, retirando toda a região N/NE e também todas as barras que estavam abaixo no nível de 138 kV nas regiões S/SE/CO. Com isto, o número de barras total caiu de 3738 para 2149.

IV.8.1.1 - Áreas pelos menores autovalores da matriz J_{SQV}

Considerando como módulo mínimo para inclusão da barra via *mode-shape* o valor de σ igual a 0,6 , ε_1 igual a 70% e ε_2 igual a 200, foram calculados os autovalores e autovetores da matriz J_{SQV} para o sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras e aplicado o algoritmo descrito através da Figura 5. Os dez menores autovalores estão na Tabela 53.

Tabela 53 – Autovalores da matriz J_{SOV} do S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Autovalores (λ_i)			
i	Módulo	i	Módulo
1	0.023180	6	0.114934
2	0.034557	7	0.132866
3	0.042253	8	0.136365
4	0.046310	9	0.140145
5	0.066473	10	0.150793

As áreas identificadas, seus respectivos números totais de barras e as barras pertencentes à mesma estão na Tabela 54. Nesta tabela estão mostradas apenas as áreas cujo número de barras foi superior a 50.

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 1 / Número total de barras: 73							
21	MANSO----4GR	4067	PARACAT3-138	4809	JAURU----3GR	4861	JAURU--13.8
1551	PARACAT1-138	4523	ITIQ-M1--2GR	4810	Pch Indi 138	4862	JAURU---230
1810	ATabuado--13	4525	ITIQ-M2--2GR	4813	DIAMANTI-138	4863	ARAPUTAN-138
1811	Paranaiba-13	4552	N.MUTUM--230	4823	DENISE---138	4873	P.LACERDA138
1812	Cassilan--13	4559	N.MUTUM--FIC	4829	DENISE---FIC	4877	PCH S.Cor138
1843	Camapua--138	4562	SORRISO--230	4833	TANGARA--138	4878	MINSELIN-138
1853	Selviria-138	4568	SORR.EL2-FIC	4835	SACRE-2--138	4880	SAPEZAL--138
1854	ATaboado-138	4569	SORR.ELN FIC	4839	D-SACRE2-138	4883	CACERES--138
1855	Paranaib-138	4572	LUCAS-RV-230	4841	JUBA-1---138	4893	POCONE---138
1856	Cassilan-138	4582	SINOP----230	4842	C.NOVO---138	4933	SIN.CEMAT138
1857	Chapadao-138	4583	SINOP-ELN138	4843	ITAMARATI138	4943	SINOP-CT-138
1858	CostRica-138	4589	SINO-ELN-FIC	4845	SE MAGGI 138	4953	CLAUDIA--138
1859	Paraíso--138	4592	MANSO----230	4846	JUBA-----7GR	4959	E.CLAUDIA138
1864	Buriti---138	4801	FCIMENTO-138	4847	BRASNORT-138	4963	COLIDER--138
1866	RetiVelh-138	4803	NOBRES---138	4848	FAZ.CORT-138	4973	A.FLORES-138
4037	UNAI2----138	4804	GUAPORE--3GR	4849	JUARA----138	4983	Matupa 138
4038	UNAI3----138	4805	GUAPORE--138	4851	JUINA----138		
4039	QUEIMADO-3GR	4807	JAURU----138	4853	Q.MARCOS-138		
4041	UHQUEIMA-138	4808	UH-JAURU-138	4860	JAURU---FIC		

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 2 / Número total de barras: 151							
30	SCRUZ-19-000	279	BRAHMA---138	1776	P.ANGEL2-138	2664	PINHEIROS138
45	VITORIA--1CS	289	CAMARA---138	1790	ARSENAL2-138	2665	PIUMA---138
46	CAMPOS----CE	293	CACHAMORRA	2600	MASCAREN-4MQ	2666	PITANGA--138
90	VIANA---345	881	BVParais-138	2601	SUICA---2MQ	2667	PRAIA---138
114	VITO-FIC-AT5	885	Floresto-138	2604	BRAGUSSA-138	2674	SAMARCO--138
115	VIT-AT5-13.8	1601	SAPUCAIA-138	2605	BRAGUSSA-TAP	2676	SGABRIEL-138
133	ADRIAN-F-T1D	1625	JABOATAO-138	2606	BOAPABA--138	2680	SUICA---138
143	ADRIAN-F-T2B	1626	LAMEIRAO-138	2608	VIANA--1-FIC	2682	TUBARAO138-1
145	ADRIAN-F-T1B	1637	ESPERANCA138	2609	A.LAGE---138	2683	TUBARAO138-2
146	ADRIAN-F-T2A	1638	A.FRANCO-138	2612	ARCEL---138	2684	TUBARAO138-3
147	CAMPOS---345	1639	MATO ALTO138	2613	BFERREIR-138	2691	FICT-CARAP-1
148	CAMPOS---FIC	1664	CEPEL---138	2614	CACHOEIRO138	2692	FICT-CARAP-2
149	VITORIA--345	1678	ITAPEBA1-138	2617	CACH---13.8	2693	FICT-JNEIV-1
150	VITO-FIC-AT1	1697	COSMOS---138	2618	VIANA--2-FIC	2694	FICT-JNEIV-2
151	VITOR--CI57%	1717	MAGE-----138	2619	VIANA---138	2695	N.VENEC-FICA
152	VITO-FIC-AT2	1728	IMBOASSIC138	2620	CARAPINA-138	2697	FICT-CACH--1
153	VITO-FIC-AT3	1730	ALCANTARA138	2622	CEASA---138	2906	PETR-CAC-138
154	VIT-13.8-AT2	1731	GUAXINDIB138	2623	CASTELO--138	2907	TAP-TSA--138
155	VIT-13.8-AT3	1732	P.ROSA---138	2624	CIVIT---138	2914	PAULISTA-138
156	VIT-13.8-AT4	1733	G.BRANCO-138	2625	BMINEIRA-138	3300	APARAIBA-138
157	CAMP-CAP-345	1734	S.PONTES-138	2626	CARIACICA138	3301	LEOPOLD--138
158	VITO-FIC-AT4	1735	INGA-----138	2629	CST_A2---138	3303	N.U.MAUR-138
173	ADRIANO--138	1736	V.PEDRAS-138	2631	FRUTEIRA-138	3305	CATAG(2)-138
174	R.LEAO---138	1737	ZONA SUL-138	2635	GUARAP.T-138	3307	MURIAE(2)138
175	CAMPOS---138	1738	ICARAI---138	2638	IBES-----138	3337	U.BRAUNA-138
177	VITORIA--138	1739	ARSENAL--138	2639	TAP-ITAPEMIR	3343	CONQUISTA138
184	S.CRUZ---138	1742	P.ANGELIC138	2640	ITAPEMIR-138	3913	TAPROVI--138

Área 2 / Número total de barras: 151							
199	VIT-13.8-AT1	1745	R.LEAO---138	2641	ITABIRA--138	3914	TAPROVII-138
200	UCAMPOS-FIC1	1751	MACABU---138	2643	JAGUARE--TAP	3962	N.FLU-G1-3GR
201	UT-UTEC--1MQ	1752	FRIBURGO-138	2644	JAGUARE--138	3963	N.FLU-V1-000
202	UCAMPOS-FIC2	1754	TERESOPOL138	2645	J.NEIVA--138	3966	UTEMMERC-345
203	UT-UTEC--1MQ	1755	RDC-ENTR.138	2647	J.NEIVA13.8A	3977	MERCHANT-000
211	CAMPOS--FIC2	1757	PALMAS 138	2649	FIESA----138	3978	MERCHANT-000
257	I.POMBOS-5GR	1758	PALMAS-----2	2652	ITARANA--138	3988	ZIN1--TAP138
258	I.POMBOS-138	1759	MOMBACA--138	2653	LINHARES-138	3989	ZIN2--TAP138
276	BRISAMAR-138	1760	UTEC-----138	2654	MASCAR.--230	4042	AIMORES--3GR
277	ZIN-----138	1762	CMP.DIST.138	2655	MASCAR.--138	4043	AIMORES--230
278	PALMARES-138	1765	ITALVA---138	2658	N.VENECIA138		

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 3 / Número total de barras: 96							
188	BG--FIC--TR2	1230	Livramen-230	1837	Ivinhema--13	2238	SER.NEGRA138
189	BG--FIC--TR1	1236	Pelotas3-230	1861	Sidroland-13	2239	SOCORRO--138
511	ROSANA-1-2GR	1238	PMedici--138	1881	CimEldor-138	2246	TRES.PONT138
546	ROSANA---138	1239	PMedici--230	1882	RBrilhan-138	2276	US.ELOY.C138
657	PPRIMA-A-138	1240	Pelotas3-138	1884	Amambai--138	2378	Lapa-----138
658	PPRIMA-B-138	1246	Quinta---230	1886	Caarapo--138	2389	TAF-Pien-138
750	C.DOUR11-2GR	1247	Quinta---138	1887	Cruzalti-138	2421	ATI261INP138
844	FIguacu--138	1274	SVPalmar-138	1895	PMurtin--138	2423	Jaguaria-138
850	Mediane1-138	1285	Marmelei-138	1948	CORDEIRY-138	2426	JGI262PSS138
858	VYolanda-138	1290	3Coroas--138	1963	IRACEMA1Y138	2440	JGI265PLP138
1043	RiveraCF-230	1803	Aquidauan-69	2056	POsorio--138	2460	AAlegre--138
1093	Ivinhema-138	1806	Aquidauan-13	2059	POsorioY-138	2465	Altonia--138
1096	NAndradY-138	1808	Amambai---13	2060	CanastrB-FIC	2468	Colorado-138
1098	TravesRP-138	1818	Corumba---13	2062	CanastrA-FIC	2498	AcarayCF-138
1127	Jardim---138	1820	DouMaxwel-13	2064	Canastra-138	2722	Cacador--138
1137	Corumba--138	1821	DouNacoes-13	2070	Pelotas1-138	2825	Perdigao-138
1139	DouMaxwe-138	1822	Cruzaltin-13	2071	Pelotas2-138	2892	Videira--138
1140	DouNacoe-138	1825	DouNacoes-69	2072	Jaguarao-138	3806	CORDEIRO-138
1145	Maracaju-138	1826	DouAlvora-13	2073	ArroioGr-138	3808	IRACEMA--138
1146	Miranda--138	1828	Jardim---138	2074	Pelotas4-138	3897	P.PRIMAVE138
1147	NAndradi-138	1829	Maracaju--13	2075	PelotasY-138	3898	ROSANA---138
1170	PMediciA-1GR	1830	Miranda---13	2103	US.PINHAL138	9202	Livramen-FIC
1172	PMediciB-1GR	1831	NAndradin-13	2179	BARREIRO-138	9423	UTEAAleg-138
1188	Bage2---230	1836	Ivinhema-FIC	2213	LINDOIA--138	9424	UTESInac-138

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 4 / Número total de barras: 55							
28	P.COLOMB-4GR	2100	BELAVISTA138	2232	RIOPEDRAS138	2315	GAVEA---138
190	PCOLOMBIA138	2115	CITROSUCO138	2234	SALTINHO-138	2316	COLOMBIA-138
322	FRUTAL---138	2117	DOBRADA--138	2237	SAO.PEDRO138	2320	J.PAULIST138
343	IGARAPAV-5GR	2120	US.GP+YFS138	2249	UNILESTE-138	2322	MINERVA--138
702	SCARLO-YP138	2121	VOLKSWAGE138	2255	ANHA-MAGUI38	2325	UsAMOGIA-138
703	SAOCARLOS138	2130	PIRANGI--138	2261	CATU-----138	2329	PITANGUEI138
704	VOLKSWAGY138	2133	PAR+TEC2-138	2266	HUMAITA--138	2335	VIRADOURO138
706	SCARLOS-AUX	2135	PROGRESSO138	2271	IPUA-----138	2340	COLINA---138
707	TECUMSEY-138	2140	TAIUVA--138	2282	PIONEIROS138	2346	SAOCARLOS138
771	REAL---138NA	2173	ST.MARINA138	2290	SERTAOZINI138	2550	TECUMSEH-138
1525	IGARAPAV-138	2190	CAPIVARI-138	2301	BARRETOS-138	4251	MPA+YFR--138
1539	JPINHEIR-138	2193	CATERPILA138	2306	CAI+M+BE-138	4255	IBATE+BTH138
1550	PARACAT2-138	2209	VOTORANT-138	2310	BARRETOS2138	4258	EMBRAER--138
1581	UBERABA5-138	2227	PIRMIRIM-138	2313	CUTRALE--138		

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 5 / Número total de barras: 55							
312	MIRANDA--3GR	1809	Coxim-----13	2860	SLourenc-138	3748	PCHMOSQUI138
340	MIRANDA--138	1833	RioVerde--13	2861	SMiguel2-138	3749	PCHMOSQUI-13
648	PIONEIRY-138	1883	Coxim---138	2936	D_CANEDO-138	3839	PIONEIRO 138
674	VOTUPO-2-138	1893	RioVerde-138	2945	SJALIAN--138	3885	CARDOSO-13.8
775	DAIA-----138	1901	CARDOSOLY138	2946	FLORES---138	3888	FERNANDO-138
776	JUNDIAI--138	1904	CARDOSO--138	2947	IACIARA--138	3894	P.DOESTE-138
777	ANAPOLIS-138	1906	FERNAND-Y138	3638	SE-MJ---13.8	3895	PBARRETO-138
778	CORUMBA--138	1909	PBARRE-Y-138	3641	CORUMBA4-2GR	4230	SJRPRET2-138
781	IPORA---138	1910	PDOESTE-Y138	3708	UHEESPORAI38	4232	TIE-MIRA-138
795	XAV--DAIA138	1917	VOTUPO-1Y138	3735	TAPPETROB138	4753	CASCA-3--138
1511	StaClara-3GR	2312	CONGONHAS138	3736	PETROBRAS138	4757	CASCA3-G-6.9
1561	NANUQUE--138	2328	MIRASSOL-138	3738	SENCANED-138	4763	C.VERDE--138

Área 5 / Número total de barras: 55							
1587	UBERLAN7-138	2827	Palmitos-138	3740	DAIA-PETR138	4773	PRIMAVER-138
1595	SCLARA---138	2836	QQueixo--2GR	3744	UHEESPORA-13		

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 6 / Número total de barras: 52							
60	F.IGUACU-765	965	Caxias---230	1186	Alegret2-230	1260	PAlegre6A-FIC
61	FOZ-500-60HZ	972	Garabi-1-525	1190	Canoas1--230	1261	PAlegre6B-FIC
69	IV-ITA-1-765	973	Garabi-2-525	1191	Caxias-C-230	1263	PAlegre6-230
70	IV-ITA-2-765	976	Gravatai-525	1198	CampoBom-230	1265	PAlegre9-FIC
71	IV-ITA-3-765	979	NSRita---525	1199	Guaiba2--230	1267	PAlegre9-230
73	ITA-TP-1-765	980	NSRita---230	1200	Caxias2--230	1268	PAlegre10-230
74	ITA-TP-2-765	995	Ita-----525	1204	PoloPetr-230	1270	PAlegre13-230
75	ITA-TP-3-765	996	Ita----G-525	1210	Gravata2-230	1273	Siderurg-230
904	Ita-----4GR	1030	Machadin-525	1212	Eldorado-230	1283	StaRosa--230
905	Ita-----1CS	1045	SAngelo--525	1231	Osorio2--230	1286	SVicente-230
915	Machadin-2GR	1046	SAngelo--230	1248	Canoas2--230	1315	Fibrapla-230
916	Machadin-1CS	1106	ITAIPU60-500	1258	CIndustr-230	1320	LBarros--230
964	Caxias---525	1107	ITAIPU60-9GR	1259	PAlegre4-230	1330	Atlanti2-230

Tabela 54 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área 7 / Número total de barras: 178							
18	ITUMBIAR-6GR	341	MCLAROS--345	1508	ARAXA----138	2507	SE-CN----138
35	CORUMBA--3GR	344	MESQUITA-500	1509	M.CARMELO138	2508	SE-CS----138
36	S.MESA---3GR	349	NEVES----500	1510	ARCOS----138	2513	SE-BN----138
41	B.SUL----000	350	NEVES----345	1512	BETIM2---138	2514	SE-BC----138
42	BAND10.5-CE1	353	NEVES----138	1515	UTIBIRIT-138	2517	E_TOCT---138
43	BAND10.5-CE2	354	NEVES-1--1CS	1517	SGONCAL2-FIC	2519	SE-CT----138
55	BALTO13.8-CE	355	NEVES-2--1CS	1518	CONGONHA-138	2987	AG.LINDAS230
92	SAMAMB--CAP1	356	NEVES-FIC-T1	1519	COROMAND-138	2988	ITAPACI--230
93	SAMAMB--CAP2	357	NEVES-FIC-T2	1520	CSBM-----230	2998	MINACU---138
94	SAMAMB--CAP3	358	NEV-FIC2-138	1521	DIVINOP2-138	3002	M.MARACA-230
111	BSUL---CI71%	359	NEV-FIC1-138	1523	FMBETIM3-138	3601	SE-TG---13.8
210	ITUMBIARA500	360	NPONTE---500	1524	GAFANHOT-138	3602	SE-CN---13.8
216	PCOLOMBIA345	367	PIMENTA--345	1526	IGARAPE--138	3603	SE-CS---13.8
217	ITUMBIARA345	368	PIMENTA--138	1527	DIVINOP1-138	3625	SE-BC---13.8
218	BANDEIRA-345	370	SSIMAO---500	1528	IGUATAMA-138	3964	CBRAVA--3GR
219	B.SUL----345	372	TAQUARIL-345	1533	IRAMINAS-138	3965	C.BRAVA--230
220	CORUMBA--345	373	TAQUARIL-230	1534	ITABIRA--230	4013	V.PALMA-FIC3
222	BSUL-FIC-230	376	TAQUARIL-138	1536	ITAUNA---138	4014	V.PALMA-FIC4
227	B.GERAL--230	377	SGONCALO-138	1540	JATOBA---138	4015	V.PALMA-FIC5
228	B.SUL----230	378	SGONCALO-500	1542	MCLAROS1-138	4021	MATOZI-1-138
229	B.ALTO---230	379	SGONCAL1-FIC	1545	NOVAERA--230	4022	PLEOP3-1-138
230	S.MESA---230	380	TMARIAS--345	1546	NLIMA----138	4023	VESPAS-1-138
232	B.SUL---13.8	381	TMARIAS--289	1548	OPRETO---138	4024	NEVES2-1-138
233	SAMAMBAI-500	382	TMARIAS--138	1552	PMINAS---138	4025	SLUZI2-1-138
234	SAMAMBAI-345	384	OPRETO2--500	1553	PATROCIN-138	4026	PAMPUL-1-138
235	S.MESA---500	385	OPRETO2--345	1555	PARAMINA-138	4027	VESPA2-1-138
236	B.SUL----138	386	OPRETO2--138	1556	PINDAIA--138	4028	VESPA2-5-500
237	SAMAMBAIA138	387	OPREFIC1-138	1558	PIRAPORA-138	4029	NGRANJ-1-138
239	S.MESA---138	388	OPREFIC2-138	1565	CINCO----138	4030	COMINC-1-138
244	BSUL-FIC--T7	389	OPRETO2-CEST	1566	SARAMENH-138	4031	SLAGO3-1-138
245	BSUL13.8-C30	390	SGOTARDO-500	1567	REGAP----138	4032	SLAGO2-1-138
247	C.BRAVA--138	391	SGOTARDO-345	1569	PIRAPOR2-138	4033	SLAGO1-1-138
300	EMBORCAC-4GR	393	SGOTARDO-FIC	1571	BURITIZ--138	4036	BETIM4---138
301	JAGUARA--4GR	396	VGRANDE--345	1573	NLIMA4-138	4050	BDESPAC3-500
302	N.PONTE--3GR	398	VPALMA---345	1574	BARREIR-FIC1	4052	CapimB-1-3GR
303	S.SIMAO--6GR	399	VPALMA---138	1575	BARREIR-FIC2	4053	CAPIM-1--138
304	T.MARIAS-5GR	784	CATALAO--138	1576	BARREIR-FIC3	4504	CS1IT-RV-230
313	BARREIRO-345	787	NIQUEL---230	1585	IBIRITEG-000	4505	CS2IT-RV-230
314	BARREIRO-138	788	N.TOCANT-230	1586	IBIRITEV-000	4511	CS2RV-BP-230
316	BARREIRO-FIC	789	CODEMIN--230	2501	SE-AC----138	9003	NEVES3---138
320	EMBORCAC-500	792	SAMA-----138	2502	SE-TG----138	9004	BCOCAIS3-230
321	EMBORCAC-138	1497	ASH-GOLD-230	2503	SE-RB----138	9006	BCOCAIS2-230
325	JAGUARA--500	1500	IGARAPE--000	2504	SE-RD----138	9023	BETIM3---138
326	JAGUARA--345	1505	SGOTARDO-FIC	2505	E_CN01---138		
328	JAGUARA-FT-R	1506	ARAGUARI-138	2506	E_CN02---138		

Na Figura 60 está a localização aproximada das áreas listadas através da Tabela 54. A área 1 traz grande parte da rede de 138 kV e 230 kV da CEMAT, localizada no estado do Mato Grosso do Sul, adicionada de algumas barras da ELETRONORTE.

A área 2 é composta da junção das redes de 138 kV e 345 kV que interligam os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, que incluem basicamente as empresas FURNAS, LIGHT, AMPLA e ESCELSA.

Já a área 3 é composta basicamente de parte da rede de 138 kV no litoral e ao sul do estado do Rio Grande do Sul. Embora estas barras sejam em maior número nesta área, foram agregadas barras ao sul do estado do Mato Grosso do Sul que não estão próximas das barras no Rio Grande do Sul. Esta inserção ocorre em função dos critérios adotados no algoritmo de busca pelos menores autovalores, que pode agregar barras em autovalores subsequentes ao que agregou as barras ao sul do estado do Rio Grande do Sul. As barras ao sul do estado do Mato Grosso do Sul foram unidas as do Rio do Grande do Sul em autovalor de módulo maior do que o autovalor que inseriu as barras iniciais. Apesar deste distanciamento entre os estados, a execução de uma análise de sensibilidade de tensão utilizando o programa ANAREDE nas barras 1093 (Ivinhema-138) no Mato Grosso do Sul e 1239 (PMedici-230) mostra que barras PV como 800 (GBMunhoz-3GR), 501 (I.SOLTE-18GR) e 48 (IBIUNA--4CS) podem perceber variações tanto em 1093 quanto em 1239, mostrando algum nível de relação entre regiões, ainda que pequeno.

A área 4 traz uma parte do sistema de 138 kV ao norte do estado de São Paulo, divisa com a região oeste do estado de Minas Gerais. Em virtude da quase totalidade das barras não estar presente no mapa da Figura 60, foi indicada apenas a região aproximada onde se encontram estas barras.

A área 5 não foi possível destacar no mapa, em virtude da maioria das barras indicadas pertencerem a CELG (Centrais Elétricas de Goiás) e não estão presentes no mapa.

A área 6 destaca boa parte do sistema de 500 kV no estado do Rio Grande do Sul. Na listagem das barras aparece parte das barras do sistema de transmissão

de ITAIPU, que não está completamente representada. A presença destas barras de ITAIPU é fruto também dos critérios de busca que pode agregar barras de regiões distintas em autovalores subsequentes.

Por último a área 7 traz boa parte do sistema de transmissão da área Minas Geras, destacando principalmente o sistema de 500 kV e 345 kV. É interessante ressaltar que esta área agregou parte do sistema próximo à cidade de Brasília, que no caso do sistema 730 barras estava em uma área em separado.

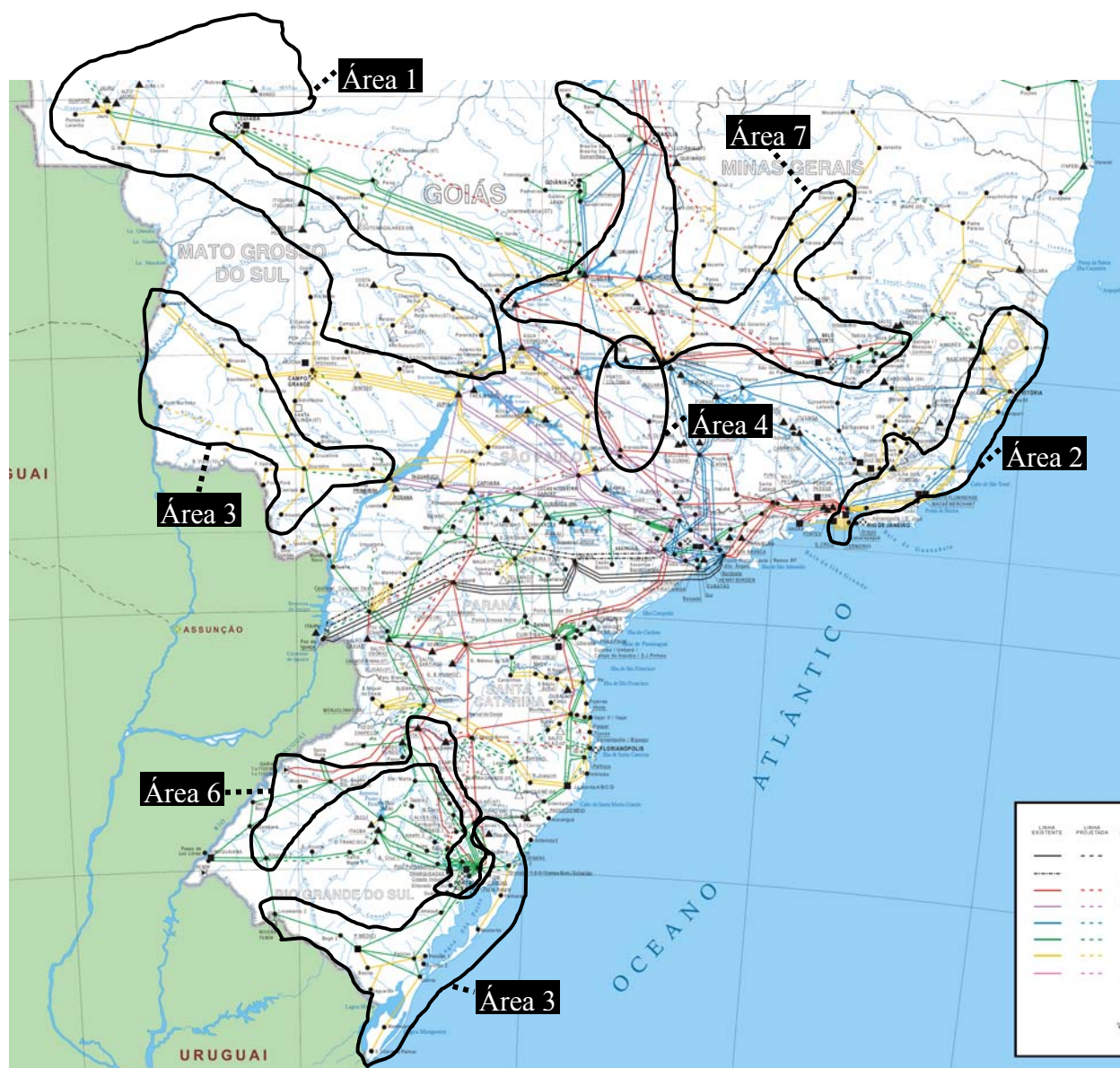


Figura 60 – Áreas pelos menores autovalores no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

IV.8.1.2 - Áreas pela avaliação das linhas da inversa da matriz J_{SQV}

Aplicando o algoritmo descrito através da Figura 7, será feita a busca da área levando-se em consideração a colinearidade dos vetores linha da inversa da matriz J_{SQV} .

A tolerância ε_1 do algoritmo de busca de áreas é igual ao $\cos(0,819)$, que representada um ângulo de 35 graus. As áreas identificadas consideradas aquelas cujo número de barras total foi superior a 100, seus respectivos números totais de barras e as barras pertencentes à mesma estão na Tabela 55.

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área A / Número total de barras: 269						
10	ANGRA-1--1GR	272	TRIAGEM--138	1637	ESPERANCA138	1734
11	ANGRA-2--1GR	273	SAUDADE--138	1638	A.FRANCO-138	1735
14	FUNIL-1--1GR	274	V.REDONDA138	1639	MATO ALTO138	1736
15	FUNIL-2--2GR	275	CASCADUR-138	1640	P.MIGUEL-138	1737
30	SCRUZ-19-000	276	BRISAMAR-138	1641	V.VALQUE-138	1738
31	SCRUZ-13-1GR	277	ZIN-----138	1642	PIEDADE--138	1739
38	GRAJAU-2-1CS	278	PALMARES-138	1643	B.DO MATO138	1740
44	GRAJAU-1-1CS	279	BRAHMA---138	1644	PDAGUA-A	1742
76	T.PRETO--765	280	A.BRANCA-TAP	1645	P.D'AGUA-138	1743
77	T.PRETO--500	281	RETIRO--138	1646	B.TIJUCA-A	1744
80	TPFIC500-AT3	283	TERM. SUL-138	1647	B.TIJUCA-138	1745
104	C.PAULIS-500	284	F.CANECA-138	1648	S.CONRADO138	1746
105	ANGRA----500	285	C.SOARES-138	1649	LEOPOLDO-138	1747
106	ADRIANO--500	286	R.FREIRE-138	1650	R.COMPRI-138	1748
107	GRAJAU---500	287	SARAPUI--138	1651	J.BOTA-A-138	1751
108	S.JOSE---500	288	ROSALI---138	1652	J.BOTA-B-138	1752
110	GR--FIC1-T52	289	CAMARA---138	1653	URUGUAI--138	1754
133	ADRIAN-F-T1D	290	SAMARITANO	1654	CENTENARI138	1755
135	JAC-FIC-TR1A	291	P.METRO1-138	1655	ACAMPISTA138	1757
137	JAC-FIC-TR2A	292	P.METRO2-138	1656	MJ.VAZ-1-138	1758
139	ADRIAN-F-T57	293	CACHAMORRA	1657	MJ.VAZ-2-138	1770
140	ADRIANO--345	294	SANTISSI-138	1658	LEBLON---138	1771
141	ADRI-500-T53	295	SEROPEDI-138	1659	P.SEIS---138	1772
142	ADRI-500-T55	454	S.JOSE---230	1660	JBOTANI1-138	1773
143	ADRIAN-F-T2B	458	APARECIDA230	1661	HUMAITA--138	1776
144	JACAREP--345	461	S.CABECA-230	1662	COPACABANA138	1780
145	ADRIAN-F-T1B	598	TAUBATE--500	1663	LEME-----138	1790
146	ADRIAN-F-T2A	599	TAUBATE--440	1664	CEPEL----138	3300
159	JAC-13.8-R30	600	TAUBATE--230	1665	JBOTANI2-138	3301
160	JAC-13.8-R60	601	TAUBATE--138	1666	DUPONT---TAP	3303
166	JAC-FIC-TR1B	1503	ITAJUBA3-500	1667	DUPONT---138	3305
167	JAC-13.8-R60	1504	ITAJUBA3-138	1668	INMETRO--138	3307
169	S.JOSE---138	1600	W.LUIS---138	1669	CACHAMBI-138	3310
172	IMBARIE--138	1601	SAPUCAIA-138	1670	MANGUEIRA138	3313
173	ADRIANO--138	1603	CIFERAL--138	1671	BERN.MELO138	3317
174	R.LEAO---138	1604	V.TELES--138	1672	MADUREIRA138	3321
178	GRAJAU---138	1605	CAXIAS---138	1673	C.S.N.---138	3323
179	GR--FIC2-T54	1606	ELDORADO-138	1674	S.BARBARA138	3329
180	JACAREP--138	1607	C.ROCHA--TAP	1675	P.PIRAY--138	3330
181	ANGRA-DEF138	1608	A.GRANDE-138	1676	S.BARRA MANS	3332
182	FUNIL---138	1609	RAMOS---138	1677	THYSSEN--138	3333
183	C.PAULIS-138	1610	MATURACA-138	1678	ITAPEBA1-138	3337
184	S.CRUIZ---138	1611	TERRANOVA138	1679	P.ERNESTO138	3338
185	ANGRA----138	1612	DEMOCRAT-138	1680	AEROPORTO138	3343
191	FUNIL--2-138	1613	TAP.PIRAY	1681	GOVERNAD-138	3456
194	ADR-13.8R100	1614	TAP.THYSSEN	1682	GUANABARA138	3850
195	ADR-13.8-C24	1615	FICAP----138	1683	FUNDAO---138	3913

Área A / Número total de barras: 269							
250	N.PECANHA-6GR	1616	CPO.MARTE138	1684	S.ANTONIO138	3914	TAPROVII-138
251	N.PECANHA138	1617	TROVAO---138	1685	MACKENZIE138	3958	CASCADURA138
252	N.PECANHA230	1618	COLEGIO--138	1686	BAEPENDI-138	3972	CSN-CONS.INT
253	FONTES---3GR	1619	R.SAUDOSO138	1687	ITAPEBA2-138	3974	ELETROB--000
254	FONTES---138	1620	POMBAL---138	1688	METRO BOTA-1	3975	ELETROB--138
255	P.PASSOS-2GR	1621	FONTINELE138	1689	METRO BOTA-2	3988	ZIN1--TAP138
256	P.PASSOS-138	1622	TAPGUANDU--1	1690	STA.LUZIA138	3989	ZIN2--TAP138
257	I.POMBOS-5GR	1623	TAPGUANDU--2	1691	BOTAFOGO-138	4100	JFORA-G113.8
258	I.POMBOS-138	1624	GUANDU---138	1692	B.DE PINA138	4101	JFORA---138
259	S.CECILIA BMB	1625	JABOATAO-138	1693	VIG.GERAL138	4200	S.JOSE-A-138
260	S.CECILIA138	1626	LAMEIRAO-138	1694	BAYER----138	4201	TERMR2-1-138
261	VIGARIO--BMB	1627	QUEIMADOS138	1695	CURICICA-138	4202	TERMR2-2-138
262	VIGARIO--138	1628	CAMERINO-138	1696	A.BRANCA-138	4203	TRG11-12-000
263	TAQUARA--138	1629	N.IGUACU-138	1697	COSMOS---138	4204	TRV18----000
265	VULCAN---138	1630	C.ROCHA--138	1699	CIM.TUPY-138	4205	TRV28----000
266	STA.CLARA138	1631	M.BARRETO138	1717	MAGE-----138	4206	TRG21-22-000
267	CPP---138	1632	PAVUNA---138	1728	IMBOASSIC138	4207	TRG31-32-000
268	Tap-CIFERAL	1633	GUADALUPE138	1730	ALCANTARA138	4208	TRV38----000
269	CTE-CSN--2GR	1634	PANAMERICANA	1731	GUAXINDIB138		
270	CORDOVIL-138	1635	ALVORADA-138	1732	P.ROSA---138		
271	MERITI---138	1636	TURIACU--138	1733	G.BRANCO-138		

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área B / Número total de barras: 249							
12	LCBARRET-6GR	369	JFORAT5--FIC	1546	NLIMA----138	3809	LEME-----138
16	FURNAS---7GR	372	TAQUARIL-345	1548	OPRETO---138	3827	SJBVIS-1-138
22	M.MOR.A--6GR	373	TAQUARIL-230	1550	PARACAT2-138	3838	CRESCIUM_138
24	M.MOR.B--4GR	376	TAQUARIL-138	1551	PARACAT1-138	4012	V.PALMA-13.8
120	P.CALDAS-345	377	SGONCALO-138	1552	PMINAS---138	4013	V.PALMA-FIC3
121	PC--FIC-AT51	378	SGONCALO-500	1554	PIAU-----138	4014	V.PALMA-FIC4
131	M.MORAES-345	379	SGONCAL1-FIC	1555	PARAMINA-138	4015	V.PALMA-FIC5
132	M.MORAES-FIC	380	TMARIAS--345	1556	PINDAIA--138	4016	PIDACA--2GR
134	LBARRETO-345	381	TMARIAS--289	1557	TOTONI---138	4017	PICADA---138
136	FURNAS---345	382	TMARIAS--138	1558	PIRAPORA-138	4018	CPM-----138
164	PC--FIC-AT02	383	VALADAR3-FIC	1559	CANDONGA-3GR	4020	PNOVA----138
165	PCAL13.8-R50	384	OPRETO2--500	1560	R.NEVES--138	4021	MATOZI-1-138
170	P.CALDAS-138	385	OPRETO2--345	1561	NANUQUE--138	4022	PLEOP3-1-138
187	M.MORAES-138	386	OPRETO2--138	1563	J.FORA7--138	4023	VESPAS-1-138
301	JAGUARA--4GR	387	OPREFIC1-138	1564	SACRAMEN-138	4024	NEVES2-1-138
302	N.PONTE--3GR	388	OPREFIC2-138	1565	CINCO----138	4025	SLUZI2-1-138
304	T.MARIAS-5GR	389	OPRETO2-CEST	1566	SARAMENH-138	4026	PAMPUL-1-138
305	V.GRANDE-4GR	390	SGOTARDO-500	1567	REGAP---138	4027	VESPA2-1-138
306	GUILMAN--3GR	391	SGOTARDO-345	1568	SDUMONT--138	4028	VESPA2-5-500
308	BARBACEN-345	393	SGOTARDO-FIC	1569	PIRAPOR2-138	4029	NGRAN-1-138
309	BARBACEN-138	394	VALADARE-230	1570	SGRANDE--161	4030	COMINC-1-138
313	BARREIRO-345	396	VGRANDE--345	1571	BURITIZ--138	4031	SLAGO3-1-138
314	BARREIRO-138	398	VPALMA---345	1572	SJDELREY-138	4032	SLAGO2-1-138
316	BARREIRO-FIC	399	VPALMA---138	1573	NLIMA4-138	4033	SLAGO1-1-138
317	SOBRAGI-03MQ	564	RIBPRETO-138	1574	BARREIR-FIC1	4036	BETIM4---138
318	CASSIA---138	700	PINHAL-Y138	1575	BARREIR-FIC2	4037	UNAI2----138
319	CPENA----230	705	SJBVIS-2-138	1576	BARREIR-FIC3	4038	UNAI3----138
324	MESQ-T3-13.4	1497	ASH-GOLD-230	1585	IBIRITEG-000	4039	QUEIMADO-3GR
325	JAGUARA--500	1498	VALADAR2-FIC	1586	IBIRITEV-000	4041	UHQUEIMA-138
326	JAGUARA--345	1499	VALADAR4-FIC	1588	VAZANTE--138	4042	AIMORES--3GR
327	SOBRAGI--138	1500	IGARAPE--000	1589	MESQUIT1-FIC	4043	AIMORES--230
328	JAGUARA-FT-R	1502	SGRANDE-04MQ	1590	MESQUIT2-FIC	4050	BDESPAC3-500
329	MESQ-T2-13.4	1505	SGOTARDO-FIC	1591	MESQUIT3-FIC	4061	CARATINGA138
330	JAGUARA--138	1508	ARAXA----138	1592	PESTRELA-230	4062	INHAPIM--138
331	JUIZFORA-345	1510	ARCOS----138	1594	PESTRELA-2GR	4063	MANHUACU-138
332	JUIZFORA-138	1511	StaClara-3GR	1595	SCLARA---138	4064	IRAPE----3GR
336	LAFAIETE-345	1512	BETIM2---138	1596	ACESITA--230	4065	IRAPE----345
337	LAFAIETE-138	1514	BOZEL---138	1932	ARARA-2-Y138	4067	PARACAT3-138
341	MCLAROS--345	1515	UTIBIRIT-138	1959	ELFUSA-Y-138	4070	ARACUAI-230
342	MCLAROS2-138	1516	CARANDAI-138	1973	LEME-Y---138	4071	IRAPE---230
344	MESQUITA-500	1517	SGONCAL2-FIC	1974	CRESCIUY-138	4080	PPARAISO138
345	MESQUITA-230	1518	CONGONHA-138	2002	SJBVIS-1Y138	4081	ARACUAI-138
346	MESQUITA-1CS	1519	COROMAND-138	2255	ANHA+MAGU138	4110	ALCOA----138
347	VALADAR1-FIC	1520	CSBM-----230	2257	BATATAIS-138	4111	DME-----138
348	VALADARE-138	1521	DIVINOP2-138	2260	BRODOSQUI138	4180	J.Fora-G-000
349	NEVES----500	1522	ESMAN----138	2261	CATU-----138	4182	JF-CFCL--138
350	NEVES----345	1523	FMBETIM3-138	2263	CRAVINHOS138	9001	MANHUACU-138

Área B / Número total de barras: 249							
353	NEVES----138	1524	GAFANHOT-138	2264	FRANCA---138	9002	BARROSO--138
354	NEVES-1--1CS	1526	IGARAPE--138	2271	IPUA-----138	9003	NEVES3---138
355	NEVES-2--1CS	1527	DIVINOP1-138	2273	JARDINOP-138	9004	BCOCAIS3-230
356	NEVES-FIC-T1	1528	IGUATAMA-138	2274	LEAO.XIII138	9006	BCOCAIS2-230
357	NEVES-FIC-T2	1529	GUILMAN--230	2277	MORROCIPO138	9008	CPENA----FIC
358	NEV-FIC2-138	1530	IPATINGT-230	2282	PIONEIROS138	9010	IPATING-FIC1
359	NEV-FIC1-138	1531	IPATINGT-161	2286	RES+GUAN-138	9023	BETIM3---138
360	NPONTE---500	1532	IPATINGD-161	2287	RIB.PRETO138	9030	TIMOTEO-230
361	JFORAT5--138	1534	ITABIRA--230	2288	PAT.PAULI138	9032	TIMOTEO-FIC1
362	PASSOS---138	1535	IPATINGT-138	2314	PINHAL---138	9033	TIMOTEO-FIC2
363	JFORAT3--FIC	1536	ITAUNA---138	2315	GAVEA----138	9040	USIMINA1-230
364	PCALDAS1-138	1539	JPINHEIR-138	2325	UsAMOGIA-138	9042	MCLACON--138
365	PCALDAS2-138	1540	JATOBA---138	2333	DIAMANTE-138	9045	USIMINA2-230
366	JFORAT4--FIC	1542	MCLAROS1-138	2654	MASCAR.--230		
367	PIMENTA--345	1544	MURTINHO-138	3803	ARARAS-2-138		
368	PIMENTA--138	1545	NOVAERA--230	3807	SJBV_E_138		

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área C / Número total de barras: 149							
18	ITUMBIAR-6GR	247	C.BRAVA--138	792	SAMA-----138	2997	CARAMURU-230
35	CORUMBA--3GR	248	TAP-RIOBOIS	793	PORANGATU138	2998	MINACU---138
36	S.MESA---3GR	307	AVATINGU-138	794	PLAN-DF--138	3002	M.MARACA-230
41	B.SUL---000	749	C.DOUR-1-230	795	XAV--DAIA138	3601	SE-TG---13.8
42	BAND10.5-CE1	750	C.DOUR11-2GR	796	ITIQUEIRA-138	3602	SE-CN---13.8
43	BAND10.5-CE2	751	C.DOUR13-2GR	797	MARAJOARA138	3603	SE-CS---13.8
55	BALTO13.8-CE	752	C.DOU13A-1GR	798	PACAEMBU-138	3604	SE-AC---13.8
92	SAMAMB--CAP1	753	C.DOU13N-3GR	1110	CELTINS-FCE	3625	SE-BC---13.8
93	SAMAMB--CAP2	754	C.DOU13K-2GR	2501	SE-AC----138	3627	SE-CT---13.8
94	SAMAMB--CAP3	755	C.DOURADA138	2502	SE-TG----138	3638	SE-MJ---13.8
111	BSUL---CI71%	756	C.DOUR-2-230	2503	SE-RB----138	3639	SE-SM---13.8
118	BANDE-FIC-T4	760	ANHANGUER230	2504	SE-RD----138	3641	CORUMBA4-2GR
168	BANDEI-2-230	761	ANHANGUE-138	2505	E_CN01---138	3700	RIOBOIS--138
188	BG--FIC--TR2	763	GOIANIA--230	2506	E_CN02---138	3702	CACH.ALTA138
189	BG--FIC--TR1	764	AEROPORTO138	2507	SE-CN----138	3708	UHEESPORA138
210	ITUMBIARA500	766	XAVANTES-230	2508	SE-CS----138	3710	INDEPEND.138
217	ITUMBIARA345	767	MEIAPONTE138	2513	SE-BN----138	3723	PIRINEUS-230
218	BANDEIRA-345	768	XAVANTES 138	2514	SE-BC----138	3724	PIRINEUS-138
219	B.SUL---345	769	FERROVIARI138	2517	E_TOCT---138	3726	MARAJO.138NA
220	CORUMBA--345	770	REAL-----138	2518	SE-ST----138	3727	RIOVERME.138
222	BSUL-FIC-230	771	REAL---138NA	2519	SE-CT----138	3729	PAMPLONA-138
223	BANDE-FIC-T1	772	ATLANTICO138	2523	SE-MJ----138	3730	CRISTALIN138
224	BANDE-FIC-T2	773	CAMPINAS-138	2524	SE-SM----138	3735	TAPPETROB138
225	ITUMBIARA230	774	CAMPINA138NA	2526	Corumba4-138	3736	PETROBRAS138
226	BANDEIRA-230	775	DAIA-----138	2936	D_CANEDO-138	3738	SENCANED-138
227	B.GERAL--230	776	JUNDIAI--138	2942	PIRI-FIC-230	3740	DAIA-PETRI38
228	B.SUL---230	777	ANAPOLIS-138	2945	SJALIAN--138	3744	UHEESPORA-13
229	B.ALTO---230	778	CORUMBA--138	2946	FLORES---138	3748	PCHMOSQUI138
230	S.MESA---230	779	INHUMAS--138	2947	IACIARA--138	3749	PCHMOSQUI-13
232	B.SUL---13.8	780	FIRMINOP-138	2968	BELAVISTA138	3750	STAMAPIPROV
233	SAMAMBAI-500	781	IPORA----138	2978	PARANAIBA230	3751	BRASUL6864
234	SAMAMBAI-345	782	QUIRINOP138	2985	PLANAL.GO138	3964	CBRAVA---3GR
235	S.MESA---500	785	UTEQUIRIN138	2987	AG.LINDAS230	3965	C.BRAVA--230
236	B.SUL---138	786	GOIA-----138	2988	ITAPACI--230	4504	CS1IT-RV-230
237	SAMAMBAIA138	787	NIQUEL---230	2990	PALMEIRAS230	9221	B.GERAL---60
239	S.MESA---138	788	N.TOCANT-230	2992	FIRMINOPO230		
244	BSUL-FIC--T7	789	CODEMIN--230	2994	TAP.TRIND138		
245	BSUL13.8-C30	790	PLANALTO-230	2995	TRINDADE-138		

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área D / Número total de barras: 125							
21	MANSO----4GR	4525	ITIQ-M2--2GR	4624	SE ADM 138	4835	SACRE-2--138
231	R.VERDE--230	4528	RONDON-2-AUX	4633	RONDO.CT-138	4839	D-SACRE2-138
238	R.VERDE--138	4529	RONDON---AUX	4634	SE BUNGE 138	4841	JUBA-1---138
240	R.VERDE--FIC	4530	COXIPO-CE-12	4643	JACIARA--138	4842	C.NOVO---138
241	R.VERDE-13.8	4531	RVNORTE--500	4653	B.GARCAS-138	4843	ITAMARATI138
249	TAP-RIOCLARO	4532	COXIPO---230	4663	N.XAVANT-138	4845	SE MAGGI 138
783	RIOVERDE-138	4533	COXIPO---138	4673	AGUA BOA-138	4846	JUBA-----7GR
791	PARQUEMAS138	4540	BP-RON-2-230	4683	CANARANA-138	4847	BRASNORT-138
2943	TAP-ACRE-138	4541	BP-RON-1-230	4703	CUIABA---138	4848	FAZ.CORT-138
3701	RIOCLARO-138	4542	NOBRES---230	4713	V.GRANDE-138	4849	JUARA----138
3703	TAPPERDIG138	4545	COXIPO-A-AUX	4723	C.ALTA---138	4851	JUINA----138

Área D / Número total de barras: 125							
3704	PERDIGAO-138	4546	COXIPO-B-AUX	4733	CPA-----138	4853	Q.MARCOS-138
3705	GESSYLEVE138	4547	COXIPO-C-AUX	4743	RODOVIAR-138	4860	JAURU---FIC
3706	ACREUNA--138	4548	COXIPO-D-AUX	4749	ENG.RODOV138	4861	JAURU--13.8
3960	R.VERDE-FIC2	4552	N.MUTUM--230	4753	CASCA-3--138	4862	JAURU----230
4502	B.PEIXE--230	4559	N.MUTUM--FIC	4757	CASCA3-G-6.9	4863	ARAPUTAN-138
4503	B.PEIXE--138	4562	SORRISO--230	4763	C.VERDE--138	4873	P.LACERDA138
4507	CS1RV-IT-230	4568	SORR.EL2-FIC	4773	PRIMAVER-138	4877	PCH S.Cor138
4508	BP-RV-1--230	4569	SORR.ELN FIC	4783	CRISTO R.138	4878	MINSELIN-138
4509	B.PEIXE--FIC	4572	LUCAS-RV-230	4793	TREV-LAG-138	4880	SAPEZAL--138
4510	CS1RV-BP-230	4582	SINOP---230	4801	FCIMENTO-138	4883	CACERES--138
4512	C.MAGAL.-230	4583	SINOP-ELN138	4803	NOBRES---138	4893	POCONE---138
4513	C.MAGAL.-138	4589	SINO-ELN-FIC	4804	GUAPORE--3GR	4933	SIN.CEMAT138
4514	CUIABA--500	4592	MANSO---230	4805	GUAPORE--138	4943	SINOP-CT-138
4515	CUIABA--230	4593	EPE-----138	4807	JAURU----138	4953	CLAUDIA--138
4517	RIBEIRAO-500	4594	P.PEDRA--230	4808	UH-JAURU-138	4959	E.CLAUDIA138
4518	RIBEIRAO-230	4596	CBA--GAS-000	4809	JAURU---3GR	4963	COLIDER--138
4520	P.PEDRA--3GR	4597	CBA--VAP-000	4810	Pch Indi 138	4973	A.FLORES-138
4521	ITIQUIRA-230	4611	FERRONOR 138	4813	DIAMANTI-138	4983	Matupa 138
4522	RONDON.--230	4613	PETROVI--138	4823	DENISE--138		
4523	ITIQ-M1--2GR	4619	TAP-PET--138	4829	DENISE---FIC		
4524	RON-CUI--230	4623	RONDO.CM-138	4833	TANGARA--138		

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área E / Número total de barras: 216							
48	IBIUNA---4CS	478	A.SERRA1-345	845	FBeltrao-138	2015	GUARUJ-2Y138
50	T.PRETO--000	479	A.SERRA2-345	846	Guaira---230	2016	GUARUJ-3Y138
58	IVAIPOR-FIC2	480	H.BORDEN-230	847	Guaira---138	2018	UBATUBA1-138
59	IVAIPOR-FIC3	484	PIRATINI-230	848	FChopim--138	2019	UBATUBA2-138
60	F.IGUACU-765	488	INTERLAG-345	849	MCRondon-138	2025	MASSAGUAY138
61	FOZ-500-60HZ	489	INTERL-1-230	850	Mediane1-138	2417	Belem---138
62	IV-FOZ-1-765	490	INTERL-2-230	851	Palotina-138	2418	Castro---138
63	IV-FOZ-2-765	491	XAVANTES-345	852	PBranco--230	2436	Palmeira-138
64	IV-FOZ-3-765	492	BANDEIRA-345	853	PBranco--138	2437	PGrossaS-138
65	IVAIPORA-765	495	M.FORNAS-345	854	Pinheiro-138	2439	CTO215BTv138
66	IVAIPORA-525	532	EMBU-GUA-1CS	855	Realeza--138	2442	Cleveland-138
68	IVAIPOR-FIC1	533	S.ANGELO-1CS	856	Segredo--525	2443	Palmas---138
69	IV-ITA-1-765	581	EMBUGUAC-440	857	Toledo---138	2448	Laranjei-138
70	IV-ITA-2-765	582	EMBUGUACU345	858	VYolanda-138	2452	QIguacu--138
71	IV-ITA-3-765	593	STOANGEL-440	860	CMourao--138	2453	TD0833FGB138
72	ITABERA--765	594	STOANGELO345	866	Mambore--138	2454	CSegredo-138
73	ITA-TP-1-765	595	STOANGELO138	868	Maringa--230	2457	Olimpico-138
74	ITA-TP-2-765	708	PETROM-Y-138	871	SDumont--138	2458	CascavOe-230
75	ITA-TP-3-765	709	BERTIO-2-138	872	Sarandi--230	2463	Copacol--138
78	T.PRETO--345	710	BIRITIBAY138	878	Apucaran-230	2475	Fundao---2GR
81	TPFIC345-AT4	711	BOISSUCAY138	879	Apucaran-138	2476	Fundao---138
86	IBIUNA---345	712	CARAGUA--138	886	Ibipora--230	2483	Araponga-138
97	GUARU-2--345	723	MANAH-YB-138	887	Ibipora--138	2488	Rolandia-138
102	POCOS----500	725	RIOPARDO-138	891	RDavidsB-138	2491	CristoReil38
103	CAMPINAS-500	726	SIFAO22Y-138	892	VeraCruz-138	2498	AcarayCF-138
122	IBIUNA---500	730	SSEBASTIA138	893	RDavidsA-138	3048	PETROM---138
125	IBIUNA--CAP1	732	BAIXADA--138	896	CascavOe-525	3051	BIRITIBA-138
127	MOG-RLC1-345	734	V.CARVAL-138	897	SCaxias--525	3054	BOISSUC--138
128	MOG-RLC2-345	800	GBMunhoz-3GR	898	FChopim--230	3066	MANAH---138
129	MOGI---345	801	GBMunhoz-1CS	919	SOsorla4-3GR	3069	PETRO-RPO138
130	IBIUNA--CAP2	806	StaClara-2GR	920	SOsorla4-1CS	3072	SIFAO 22-138
161	MOGI-FCE-230	807	StaClara-138	921	SOsor5e6-1GR	3078	S.SEBAST.138
401	HBO-S--6U+G8	808	GJRicha--3GR	922	SOsor5e6-1CS	3084	GLEBA D--138
404	PIR-14.4-000	809	GJRicha--1CS	925	SSantiag-2GR	3087	V.CARVAL.138
405	N.PIRAT1-000	810	GNBraga--3GR	926	SSantiag-2CS	3090	MASSAG.--138
425	TRCEN-1--230	811	GNBraga--1CS	933	Areia---525	3446	A.VILLAR-230
426	TRCEN-2--230	823	Areia---138	934	Areia---230	3471	B.SANT.--345
427	CENTRO---230	824	GBMunhoz-525	954	CMourao--230	3844	BERTIO-1-138
431	ANHANG---230	825	Guarapua-138	978	Guaira-F-230	3845	BERTIO-2-138
435	NORTE---345	826	Irati---138	999	IvaiporE-525	3846	BERTIO-3-138
438	M.REALE--345	829	PGrossaN-230	1027	Londrina-525	3853	GUARUJA1-138
439	ANHANG---345	830	PGrossaN-138	1028	LondrinE-230	3854	GUARUJA2-138
442	NORDESTE-345	831	PGrossaS-230	1031	MaringaF-230	3855	GUARUJA3-138
446	MOGI-EP--230	832	RioAzul--138	1047	SOsorio--230	3857	ILHABELA-138
448	ITAPETI--230	833	Sabara---138	1060	SSantiag-525	3864	GUARATUBA138
449	ITAPETI--345	835	Socorro--138	1091	EldoradF-138	3866	UBATUBA1-138
450	MOGI-Q---230	836	UVitoria-138	1106	ITAIPU60-500	3867	UBATUBA2-138

Área E / Número total de barras: 216							
451	AVILLAR-Y230	837	VilaCarl-138	1107	ITAIPU60-9GR	3869	GUARUJ_D_138
464	LESTE---345	838	AChateau-138	1141	Eldorado-138	9327	PGrossaN-FIC
466	RAMON-RF-345	839	Cascavel-230	1847	Navirai--138	9335	Areia----FIC
471	BAIXADA--230	840	Cascavel-138	2011	BERTIO-1Y138	9422	PCHLudes-138
472	BAIXADA--230	841	CeuAzul--138	2012	GUARATUBY138	9430	Coamo----138
474	SUL-----345	842	2Vizinho-138	2013	DOWQUIM-Y138	9437	PGO178MAS138
477	CARBOCL--230	844	FIguacu--138	2014	GUARUJ-1Y138	9438	FBL611SAD138

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área F / Número total de barras: 151							
500	A.VERMEL-6GR	674	VOTUPO-2-138	2106	AMER.BRAS138	3814	LIMEIR_5_138
501	I.SOLTE-18GR	692	LIMEIR-1-138	2107	ARARA+CTR138	3816	MGUACU-1-138
502	JUPIA---11GR	695	MGUACU---138	2120	US.GP+YFS138	3817	MGUACU-2-138
503	JUPIA138-2GR	696	MMIRIM-2-138	2121	VOLKSWAGE138	3818	MMIRIM-1-138
507	CAPIVARA-4GR	703	SAOCARLOS138	2127	PRADOS---138	3819	MMIRIM-2-138
510	P.PRIMA-14GR	704	VOLKSWAGY138	2132	PAIOL+LUP138	3823	MGUACU_C_138
513	TAQUARUC-5GR	706	SCARLOS-AUX	2133	PAR+TEC2-138	3825	RCLARO-2-138
520	T.IRMAOS-5GR	707	TECUMSEY-138	2136	RINCAO---138	3826	RCLARO-3-138
535	AVERMELHA500	1901	CARDOSO1Y138	2142	UIRAPURU-138	3833	ECOEELH_V_138
536	AVERMELH-440	1903	3LAGOAS-Y138	2147	BAURU---138	3834	LIMEIR_A_138
537	AVERMELHA138	1904	CARDOSO--138	2156	CELPV---138	3835	LIMEIR_R_138
538	ISOLTEIR-440	1906	FERNAND-Y138	2179	BARREIRO-138	3839	PIONEIRO_138
539	JUPIA---440	1907	CASTILHOY138	2213	LINDOIA--138	3881	A.VERMELH138
541	JUPIA---138	1909	PBARRE-Y-138	2236	PATRI+MET138	3884	CAPIVARA-138
542	3IRMAOS--440	1910	PDOESTE-Y138	2238	SER.NEGRAL38	3885	CARDOSO-13.8
543	3IRMAOS--138	1911	PIRAPO-1Y138	2239	SOCORRO--138	3886	CASTILHO-138
544	PPRIMAV--440	1913	P.VENC-Y-138	2246	TRES.PONT138	3888	FERNANDO-138
545	NPPrimav-230	1915	PPRUD2-1Y138	2268	IGUAPE---138	3890	I.SOLTEI-138
547	TAQUARUC-440	1917	VOTUPO-1Y138	2269	IPANEMA--138	3892	JUPIA---138
548	TAQUARUCU138	1931	ARARA-1-Y138	2270	IPIRANGA-138	3894	P.DOESTE-138
549	CAPIVARA-440	1933	ARTURNO-Y138	2276	US.ELOY.C138	3895	PBARRETO-138
550	CAPIVARA-138	1947	CONCHALY-138	2293	V.ALBERTI138	3896	PIRAPOZI-138
552	ASSIS---440	1948	CORDEIRY-138	2312	CONGONHAS138	3899	TAQUARUC-138
556	ASSIS---525	1954	CUNIAO-1Y138	2328	MIRASSOL-138	3900	3IRMAOS--138
559	ARARAQUA-440	1956	LUK-----Y138	2344	ITAPIRA--138	3901	T.LAGOAS-138
560	ARARAQUA-138	1962	MVARGA-Y-138	2349	PETROBRAS138	4230	SJRPRET2-138
561	BAURU---440	1963	IRACEMA1Y138	2550	TECUMSEH-138	4232	TIE-MIRA-138
562	BAURU---138	1976	LIMEIR-2Y138	3172	PRUDENTII138	4255	IBATE+BTH138
563	RIBPRETO-440	1977	LIMEIR-3Y138	3176	PVENCESL 138	4256	IESA-----138
565	MMIRIM-3-440	1978	LIMEIR-4Y138	3802	ARARAS-1-138	4258	EMBRAER--138
566	MMIRIM-3-138	1982	MGUACU-2Y138	3804	ARTURNO--138	4259	RIB.NOROEL138
569	SBAR-AUX-138	1985	MMIRIM-1Y138	3805	CONCHAL--138	4300	UTETLAGA-000
578	DERV_JUP_TRI	1996	RCLARO-2Y138	3806	CORDEIRO-138	4301	UTETLAGB-2GR
579	DERV_JUP_VAL	1997	REFINA-Y-138	3808	IRACEMA--138	4302	UTETLAGA-138
647	ISOLTEIRA138	1998	RIPASA-Y-138	3810	LIMEIR-1-138	4303	UTETLAGB-138
648	PIONEIRY-138	2000	RCLARO3-Y138	3811	LIMEIR-2-138	9544	NPPrima1-440
649	JALES---138	2100	BELAVISTA138	3812	LIMEIR-3-138	9545	NPPrima2-440
659	PPRUDENTE138	2103	US.PINHAL138	3813	LIMEIR-4-138		

Tabela 55 – Áreas pela matriz J_{SOV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

Área G / Número total de barras: 125							
901	Charquea-2CF	1192	Caxias5--230	1249	Taquara--230	1329	SCruz1-2-FIC
951	Charquea-230	1194	Camaqua--230	1250	SAngeLo2-230	1330	Atlanti2-230
962	Farroupi-230	1198	CampoBom-230	1252	SaoLuis--138	2056	POsorio--138
963	MClaro---230	1199	Guaiba2--230	1254	SaoBorja-230	2059	POsorioY-138
964	Caxias---525	1200	Caxias2--230	1255	SCruz1-Y-230	2060	CanastrB-FIC
965	Caxias---230	1204	PoloPetr-230	1256	Stacruz1-230	2061	CruzAlta-138
972	Garabi-1-525	1206	Garibald-230	1257	CIndustr-138	2062	CanastrA-FIC
976	Gravatai-525	1210	Gravata2-230	1258	CIndustr-230	2064	Canastra-138
979	NSRita---525	1212	Eldorado-230	1259	PAlegre4-230	2066	Cachoeir-FIC
980	NSRita---230	1213	Guarita--230	1260	PAlegre6A-FIC	2068	Cachoeir-138
1043	RiveraCF-230	1215	Itauba---230	1261	PAlegre6B-FIC	2070	Pelotas1-138
1045	SAngeLo--525	1216	JACUI---138	1263	PAlegre6-230	2071	Pelotas2-138
1046	SAngeLo--230	1217	LajeadoY-230	1265	PAlegre9-FIC	2072	Jaguarao-138
1067	UruguaCF-230	1218	Lajeado2-230	1267	PAlegre9-230	2073	ArroioGr-138
1152	STiaraju-1GR	1219	Lansul---138	1268	PAlegre10-230	2074	Pelotas4-138
1155	Itauba---2GR	1223	DFrancis-230	1270	PAlegre13-230	2075	PelotasY-138
1156	Itauba---1CS	1225	Macambar-230	1273	Siderurg-230	2078	Missoes--230
1159	MClaro---1GR	1227	MaxsPrin-138	1274	SVPalmar-138	2084	Pepsi----138
1161	MClaro-G-230	1228	NPrata2--230	1278	SMaria3--230	2085	Lajea2-2-FIC
1162	Jacui---4GR	1230	Livramen-230	1280	SaoSCai--138	2086	Scharlau-230

<i>Área G / Número total de barras: 125</i>							
1164	UruguaiG-2GR	1231	Osorio2--230	1283	StaRosa--230	2090	Scharlau-138
1165	UruguaiV-1GR	1236	Pelotas3-230	1285	Marmelei-138	2092	Parobe---138
1170	PMediciA-1GR	1237	Monteneg-138	1286	SVicente-230	2093	Scharlau-FIC
1172	PMediciB-1GR	1238	PMedici--138	1290	3Coroas--138	2094	Taguara--138
1175	PReal----1GR	1239	PMedici--230	1291	Tapera---230	2096	Vipal----230
1176	DFrancis-1GR	1240	Pelotas3-138	1294	UruguaiA-230	2097	SCruz1-1-FIC
1177	DFrancis-1CS	1241	EstVelha-138	1296	Uruguai5-230	2099	Zoologic-138
1184	2Irmaos--138	1242	PReal----138	1297	VenAires-FIC	9202	Livramen-FIC
1186	Alegret2-230	1243	PReal----230	1299	VenAires-230	9280	Gariball-FIC
1188	Bage2----230	1246	Quinta---230	1315	Fibrapla-230		
1190	Canoas1--230	1247	Quinta---138	1320	LBarros--230		
1191	Caxias-C-230	1248	Canoas2--230	1327	Lajea2-1-FIC		

Na Figura 61 está a localização aproximada das áreas listadas através da Tabela 55. A área A mostra a região no entorno da cidade do Rio de Janeiro, atendida pelas redes das empresas FURNAS, LIGHT e AMPLA. Diferentemente do ocorrido com a área 2 obtida com os autovalores, as barras de 345 kV e 138 kV ao norte do estado do Rio de Janeiro e no Espírito Santo não foram incluídas, tais como CAMPOS e VITÓRIA.

A área B é composta pelo sistema de transmissão na área Minas Gerais no nível de tensão de 500 kV, 345 kV, 230 kV e 138 kV, sendo a área formada por praticamente toda a rede existente neste estado.

A área C correspondente à rede elétrica que engloba o Distrito Federal e a rede em 230 kV no entorno da cidade de Goiânia. Esta área não ficou em destaque na avaliação feita através dos autovalores.

A área D traz a rede de 138 kV e 230 kV que passa pela capital de Mato Grosso, Cuiabá, destacando o tronco responsável pelo atendimento ao estado do Mato Grosso. Esta área se assemelha a área 1 obtida via autovalores.

A área E traz o sistema de transmissão de 765 kV de ITAIPU acrescido de parte de rede de 500 kV e 230 kV ao norte do estado do Paraná, oeste do estado de São Paulo e a região no entorno da cidade de São Paulo.

A área F traz parte do sistema de 440 kV e 138 kV a oeste do estado de São Paulo englobando a rede em volta de usinas do rio Tietê e parte do rio Paraná.

A área G mostra toda a rede de 230 kV existente no estado do Rio Grande do Sul, acrescida de algumas barras de 138 kV ao sul do estado. Esta área na

avaliação via autovalores apareceu partida. Já no sistema 730 barras esta área também foi obtida.

Uma comparação entre autovalores e matriz J_{SQV} mostra que a informação das áreas obtidas via matriz J_{SQV} está presente nos autovalores, ainda que a forma de determinação das áreas no algoritmo com autovalores subdivida uma área ou até mesmo uma barra que não estariam a princípio participando de uma mesma área.

O valor escolhido para σ é determinante na formação das áreas, podendo haver mudanças sensíveis no resultado final. Valores muito pequenos para σ tendem a formar áreas grandes, descaracterizando as áreas reais.

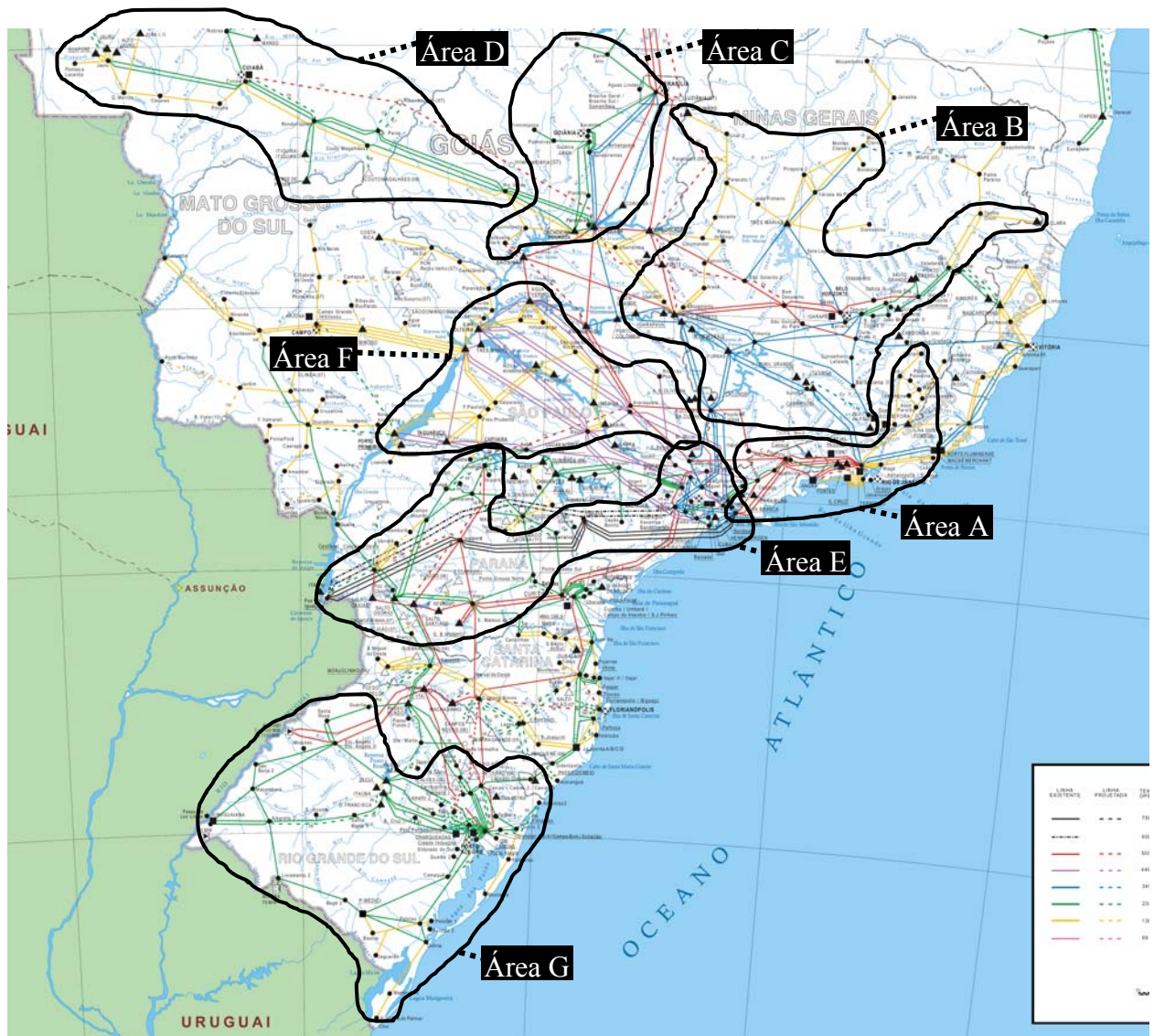


Figura 61 – Áreas pela matriz J_{SQV} no sistema S/SE/CO brasileiro 2149 barras

IV.9 - Esforço computacional

Na Tabela 56 está um sumário com os tempos computacionais dos casos utilizados neste trabalho. O microcomputador utilizado é um *QuadCore Intel* de 2,83 GHz, com 3,25 GB de memória RAM. Na Tabela 56 também está uma coluna que contabiliza o número de autovalores utilizados para se formar as áreas de controle em cada um dos casos. Os autovalores utilizados são um dos critérios de parada existentes no algoritmo de busca a partir dos autovalores de menor módulo.

Tabela 56 – Esforço computacional

<i>Sistemas</i>	<i>Autovalores</i>		<i>Matriz J_{sqv}</i>
	<i>Tempo (s)</i>	<i>Utilizados</i>	<i>Tempo(s)</i>
10 barras ($jX=1000\%$)	0,063	4	0,047
18 barras ($jX=1000\%$)	0,077	4	0,078
IEEE 14	0,062	3	0,078
<i>New England</i>	0,062	3	0,188
IEEE 118	0,092	3	3,515
Brasileiro 730 barras S/SE	8,140	163	3853,50 (1,07 horas)
Brasileiro 2149 barras S/SE/CO	138,137 (2,3 minutos)	201	293.700,20 (3,4 dias)

CAPÍTULO V -

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

V.1 - Considerações Finais

Este trabalho propõe uma metodologia para a determinação de áreas de controle de tensão em sistemas elétricos de potência. Esta é baseada na utilização dos autovalores de menor módulo e seus respectivos autovetores. Estes autovalores são calculados a partir de uma matriz de sensibilidade QV que é obtida a partir da redução da matriz Jacobiana completa do problema de fluxo de potência. A partir dos *mode-shape* gerados com os autovetores à direita dos autovalores de menor módulo é feita a divisão do sistema em áreas.

Para fins de comparação com a metodologia proposta, uma metodologia de determinação de áreas baseada nos fatores da matriz de sensibilidade QV é utilizada. Esta metodologia manipula a mesma matriz de sensibilidade QV de onde são calculados os autovalores. Para a obtenção das áreas de controle de tensão, são comparados os fatores de sensibilidade da matriz de sensibilidade QV a partir da realização do produto escalar entre todas as linhas da matriz. As barras cujo produto escalar de suas linhas na matriz de sensibilidade QV possuir um ângulo abaixo de uma tolerância irão fazer parte de uma mesma área de controle.

A metodologia proposta para identificar áreas de controle de tensão a partir dos menores autovalores e seus autovetores demonstrou resultados similares aos obtidos pela análise de sensibilidade de tensão tradicional, como também com os obtidos pela avaliação dos ângulos entre as linhas da matriz de sensibilidade QV . Nos casos de grande porte (730 e 2149 barras), a similaridade de resultados foi menor, o que pode ser atribuído aos ajustes a serem realizados no algoritmo como, por exemplo, no valor do módulo a ser considerado na

avaliação do *mode-shape*. O ajuste desta tolerância, bem como o aperfeiçoamento do algoritmo de busca deve ser mais investigado visando obter melhores resultados, evitando-se que sejam formadas áreas descontínuas, incompletas ou particionadas. A inclusão errada de barras em uma área em um determinado autovalor pode prejudicar também a identificação correta de áreas nos autovalores subseqüentes. Os valores dos módulos mínimos considerados para o *mode-shape* ao longo do trabalho foram escolhidos empiricamente e seu ajuste não foi trivial, o que exigiu para cada sistema o uso de diversos valores até a escolha final. Outro aspecto importante na utilização de autovalores e que deve ser observado é a questão do erro numérico, que pode influenciar nos resultados.

Embora os resultados da metodologia a partir dos autovalores em sistemas de grande porte possam ser aperfeiçoados, no aspecto computacional seu custo é muito atraente, tendo em vista o tempo muito inferior de obtenção das áreas quando comparado a análise das linhas da matriz de sensibilidade QV . No caso de se avaliar as áreas com diversos cenários distintos, o requisito custo computacional se torna mais importante.

A metodologia para obtenção de áreas de controle que utiliza as linhas da matriz de sensibilidade QV trouxe resultados também muito similares à análise de sensibilidade tradicional nos casos de pequeno porte e resultados mais abrangentes nos sistemas de grande porte. Embora no caso de redes de grande porte os resultados tenham sido mais abrangentes, a escolha do valor de ângulo a ser considerado na comparação das linhas da matriz QV não é trivial, podendo alterar significativamente os resultados. Ângulos menores aumentam o número de áreas assim como ângulos maiores tendem a formar áreas com números de barras cada vez mais elevados. Os valores utilizados no trabalho foram obtidos empiricamente.

No quesito tempo computacional a metodologia que utiliza as linhas da matriz de sensibilidade QV teve, para os sistemas de grande porte, um consumo de tempo bastante elevado, como evidenciado no caso do sistema 2149 barras. Isto se deve ao aumento do número de vezes que o produto escalar é realizado entre as linhas da matriz, que é $[nb \times nb]$, com vetores de dimensão $[nb \times 1]$.

Utilizada como método de busca auxiliar de áreas, a análise de sensibilidade de tensão tradicional, realizada nos sistemas de pequeno porte, depende da determinação de critérios para se agrupar manualmente as áreas de controle, que em sistemas de maior porte podem se tornar bastante complexos. A forma de agrupamento utilizada nos sistemas de pequeno porte através da análise visual dos mapas de sensibilidade torna-se praticamente inviável de ser executada em sistemas de médio e grande porte, sendo esta a razão de sua não utilização nestes sistemas.

Nos casos avaliados foram obtidas áreas bem semelhantes, um pouco diferentes ou até mesmo áreas que apareceram subdivididas na comparação entre os métodos. Para dirimir as diferenças entre as metodologias, podem-se estabelecer critérios adicionais como, por exemplo, a curva de carga reativa utilizada nos sistemas 118 e 730 barras para se avaliar o impacto destas diferenças e estabelecer melhor os limites entre as áreas. Deve-se ressaltar também que estas diferenças entre as avaliações pelos autovalores e pelas linhas da matriz de sensibilidade QV passam pelas características intrínsecas de cada método.

Os procedimentos de obtenção de barras pilotos a partir tanto do *mode-shape* quanto da avaliação das linhas da matriz mostraram que a indicação feita por cada método tem significados distintos, dado que inicialmente buscou-se investigar se os dois métodos indicariam as mesmas barras ou barras próximas. A barra PQ indicada através do *mode-shape* representa a barra PQ mais próxima dos geradores que possuem também o maior módulo no *mode-shape*. Na avaliação pelas linhas da matriz, a barra piloto indicada representa a barra PQ mais próxima de todas as demais barras da área. A utilização destes resultados requer um aprofundamento maior, testando através de um fluxo de potência continuado se as barras sugeridas como barras piloto poderiam melhorar, por exemplo, o máximo carregamento na área determinada pela busca, ou melhorar algum outro critério que seja definido para a escolha da barra piloto.

A divisão das áreas proposta neste trabalho têm como objetivo inicial a questão da implantação do CST. Contudo este tipo de estudo pode ser aplicado com outros objetivos como, por exemplo, mercado e circulação de potência reativa.

V.2 - Sugestões de Trabalhos Futuros

Este tópico traz algumas sugestões de possíveis temas a serem desenvolvidos, visando à continuidade da pesquisa que foi iniciada através deste trabalho de tese. As principais sugestões são:

- Avaliação de alterações nas áreas formadas pelos autovalores da matriz J_{SQV} frente a diferentes cenários de carregamento e contingências pré-estabelecidas;
- Inclusão de busca de subdivisões em áreas de controle estabelecidas pelos autovalores de menor módulo;
- Detecção, através dos autovalores, da interação entre geradores, compensadores síncronos e compensadores estáticos de potência reativa pertencentes a uma mesma área, para fins de coordenação e adequação das ações de controle de potência reativa;
- Avaliação dos impactos na margem de carregamento de cada área e na margem do sistema da implantação do CST nas áreas determinadas pelas metodologias propostas.

APÊNDICE A -

REVISÃO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

A.1 - Considerações Iniciais

O cálculo de um fluxo de potência equivale à solução de um sistema de equações algébricas não-lineares. Os recursos da matemática disponíveis para a solução destas equações são relativamente escassos. Na grande maioria dos casos, o emprego de métodos diretos de solução não é possível, devendo ser usados métodos iterativos. Não se pode ainda, garantir que um sistema de equações não-lineares tenha qualquer solução ou, caso tenha solução, que seja única ou existam várias outras. Felizmente, no problema de fluxo de potência, tais dificuldades ficam bastante atenuadas pelo fato de que as faixas de valores permitidos para as variáveis do problema, praticamente são as mesmas para a grande maioria dos sistemas elétricos de potência existentes.

O método para solução do fluxo de potência deve atender a alguns requisitos básicos, notadamente; eficiência computacional, confiabilidade especialmente no que concerne a problemas mal-condicionados e flexibilidade para representação de dispositivos de controle. O método de Newton-Raphson é um método numérico geral para a determinação de raízes reais de equações não-lineares, com grande confiabilidade de convergência e velocidade. A aplicação eficiente deste método para fluxo de potência foi desenvolvida em sua formulação clássica no final da década de sessenta.

É possível demonstrar que o método de Newton-Raphson apresenta uma taxa de convergência quadrática, isto é, a norma do vetor de resíduos diminui com o quadrado do número de iterações. Isto significa que o método converge

rapidamente na vizinhança da solução. Entretanto, essa convergência é fortemente dependente das condições iniciais do problema, em sistemas de potência definida por tensões e ângulos em barras de carga. Caso a condição inicial não esteja contida em uma região próxima da solução procurada (região de atração) o processo iterativo poderá convergir para uma solução não desejável ou até mesmo apresentar uma divergência.

O objetivo deste apêndice é fazer uma rápida revisão da solução das equações de fluxo de potência utilizando-se o método de Newton-Raphson.

A.2 - Método de Newton-Raphson

Se for conhecida uma aproximação $x^{(0)}$ para uma das raízes reais da equação (a.1).

$$y = f(x) \quad (\text{a.1})$$

Então, uma aproximação melhor $x^{(h+1)}$, onde $h = 0, 1, 2, \dots$, pode ser obtida calculando-se (a.5) pela Série de Taylor, considerando-se apenas os dois primeiros termos desta série.

$$y = f(x^{(h)}) + f'(x^{(h)}) \cdot \Delta x^{(h)} + \frac{f''(x^{(h)})}{2!} \cdot (\Delta x^{(h)})^2 + \dots \quad (\text{a.2})$$

$$y - f(x^{(h)}) = f'(x^{(h)}) \cdot \Delta x^{(h)} \quad (\text{a.3})$$

$$\Delta y^{(h)} = y - f(x^{(h)}) \quad (\text{a.4})$$

$$\Delta x^{(h)} = [f'(x^{(h)})]^{-1} \cdot \Delta y^{(h)} \quad (\text{a.5})$$

A variável x é atualizada a cada iteração da seguinte forma:

$$x^{(h+1)} = x^{(h)} + \Delta x^{(h)} \quad (\text{a.6})$$

O processo retorna a (a.2) até que sua convergência seja obtida quando:

$$x^{(h+1)} - x^{(h)} \leq \varepsilon \quad (\text{a.7})$$

Generalizando-se para j equações tem-se:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_j) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_j) \\ &\vdots \\ y_j &= f_j(x_1, x_2, \dots, x_j) \end{aligned} \quad (\text{a.8})$$

A correção a cada iteração é então obtida da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(h)} \\ \Delta x_2^{(h)} \\ \vdots \\ \Delta x_j^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right)^{(h)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right)^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_j}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_j}{\partial x_j}\right)^{(h)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(h)} \\ \Delta y_2^{(h)} \\ \vdots \\ \Delta y_j^{(h)} \end{bmatrix} \quad (\text{a.9})$$

A.2.1 - Aplicações das Equações do Fluxo de Potência

Para uma barra genérica k tem-se:

$$S_k = P_k + j \cdot Q_k \quad (\text{a.10})$$

As equações básicas do fluxo de potência são dadas pelas equações (a.11) e (a.12), e definidas por [24].

$$P_k = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \sin \theta_{km}) \quad (\text{a.11})$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \sin \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.12})$$

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (\text{a.13})$$

Aplicando-se o método iterativo de Newton-Raphson na solução das equações (a.11) e (a.12), tem-se uma relação linearizada entre as variações do módulo da tensão e do ângulo, para as variações nas potências ativa e reativa. Desta forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{a.14})$$

de onde tem-se [24]:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.15})$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.16})$$

$$H_{kk} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - Q_k \quad (\text{a.17})$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{a.18})$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k \cdot G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{a.19})$$

$$N_{kk} = \frac{(P_k + V_k^2 \cdot G_{kk})}{V_k} \quad (\text{a.20})$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{a.21})$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 \cdot G_{kk} + V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{a.22})$$

$$M_{kk} = -V_k^2 \cdot G_{kk} + P_k \quad (\text{a.23})$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.24})$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.25})$$

$$L_{kk} = \frac{(Q_k - V_k^2 \cdot B_{kk})}{V_k} \quad (\text{a.26})$$

Os resíduos de potência são dados por:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{a.27})$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{a.28})$$

A matriz Jacobiana é altamente esparsa na aplicação do fluxo de potência, sendo a equação (a.14) resolvida direta e rapidamente a cada iteração, utilizando-se a eliminação ordenada para solução de grandes sistemas lineares esparsos [59,60].

A partir de um conjunto inicial de tensões nas barras, são calculadas as potências ativa e reativa, bem como os respectivos resíduos de potência. Caso estes resíduos estejam dentro de uma tolerância pré-determinada, considera-se que o processo iterativo convergiu para uma solução. Caso contrário, calcula-se a matriz Jacobiana e determina-se a nova solução:

$$\theta^{(h+1)} = \theta^{(h)} + \Delta\theta^{(h)} \quad (\text{a.29})$$

$$\mathbf{V}^{(h+1)} = \mathbf{V}^{(h)} + \Delta\mathbf{V}^{(h)} \quad (\text{a.30})$$

onde, $\Delta\theta^{(h)}$ e $\Delta\mathbf{V}^{(h)}$ são obtidos da solução da equação (a.14). Posteriormente, incrementa-se o contador do número de iterações e retorna-se ao cálculo das potências ativa e reativa, repetindo-se o ciclo descrito.

Na formulação básica do problema, a cada barra do sistema são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas: V_k , θ_k , P_k e Q_k .

Dependendo de quais variáveis nodais sejam classificadas como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

$PQ \rightarrow$ são dados P_k e Q_k , e calcula-se V_k e θ_k .

$PV \rightarrow$ são dados P_k e V_k , e calcula-se θ_k e Q_k .

$V\theta \rightarrow$ são dados V_k e θ_k , e calcula-se P_k e Q_k .

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração (incluindo-se os compensadores síncronos). A barra $V\theta$, ou barra de referência, tem uma dupla função: como o próprio nome indica, fornece a referência angular do sistema (a referência de magnitude de tensão é o próprio nó terra); além disso, é utilizada para fechar o

balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas na transmissão que não são conhecidas antes da solução final do problema (daí a necessidade de se dispor de uma barra do sistema na qual não são especificadas as potências ativa e reativa).

APÊNDICE B -

DADOS DOS SISTEMAS DE PEQUENO PORTE

B.1 - Sistema 10 barras

```
TITU
Sistema Tese 10 Barras - Impedancia 0.01
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE 100. DASE 100. TEPA 0.001 EXST .4 TETP .5 TBPA 5.
TLPP 1. TEPR 0.001 QLST .4 TLPR 1. TLPQ 2. TSBZ .01
TSBA 5. ASTP .05 VSTP .1 TLVC .1 TLTC .1 TSFR .01
ZMAX 500. TLPV .5 VDVM 150. VDVN 50. TUDC .01 TADC .01
PGER 30. TPST .1 VFLD 70. ZMIN .01 HIST 470 LFIT 10
ACIT 30 LFCV 1 DCIT 10 VSIT 10 LPIT 20 LFLP 5
PDIT 1 LCRT 24 LPRT 60
9999
DBAR
(No) O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( Pl)( Ql)( Sh)(A(Vf)
1 2 Maq 1 30. -10. 26. 1
2 1 Maq 2 90. -30. 78. 1
30 Barra PQ 1 1000 120. 0. 1
10 Barra Ter 1 1
20 Barra Ter 2 1
101 2 Maq 10 25. -10. 26. 2
102 1 Maq 20 85. -30. 78. 2
130 Barra PQ 10 1000 110. 0. 2
110 Barra Ter 10 2
120 Barra Ter 10 2
9999
DLIN
(De) O (Pa)NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)( Bc)(Cn)(Ce)Ns
1 10 1 20.
2 20 1 7.
10 20 1 7.
10 30 1 9.
101 110 1 20.
102 120 1 7.
110 120 1 7.
110 130 1 9.
30 130 1 0.01
( 30 130 1 1000.
9999
FIM
```

B.2 - Sistema 18 barras

```
TITU
Sistema Tese 10 Barras Duplicado X = 0.01%
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE 100. DASE 100. TEPA .001 EXST .4 TETP .5 TBPA 5.
TLPP 1. TEPR .001 QLST .4 TLPR 1. TLPQ 2. TSBZ .01
TSBA 5. ASTP .05 VSTP .1 TLVC .1 TLTC .1 TSFR .1E-7
ZMAX 500. TLPV .5 VDVM 150. VDVN 50. TUDC .01 TADC .01
PGER 30. TPST .1 VFLD 70. ZMIN .01 HIST 470 LFIT 10
ACIT 30 LFCV 1 DCIT 10 VSIT 10 LPIT 20 LFLP 5
PDIT 1 LCRT 24 LPRT 60 CSTP 5. ASDC 1.
ICIT 30 DMAX 5 FDIV 2. ICMN .05 VART 5. TSTP 33
```

```

ICMV      .5 APAS      90. CPAR      70. VAVT      2. VAVF      5. VMVF      15.
99999
DBAR
(Num)OETGb( nome )G1( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc ) ( P1)( Q1)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)
1 L2 Maq 1 1000 0. 30.8.957 -10. 26. 11000
2 L1 Maq 2 10003.86 90.17.27 -30. 78. 11000
10 L Barra Ter 10 984-3.5 11000
20 L Barra Ter 20 990.212 11000
30 L Barra PQ 30 979-9.9 240. 0. 11000
101 L1 Maq 101 1000-1.1 25.8.237 -10. 26. 21000
102 L1 Maq 201 1000 2.9 85.16.01 -30. 78. 21000
110 L Barra Ter110 985 -4. 21000
120 L Barra Ter120 991-.54 21000
130 L Barra PQ 130 979-9.9 220. 0. 21000
201 L2 Maq 201 1000 0. 30.8.957 -10. 26. 31000
202 L1 Maq 202 10003.86 90.17.27 -30. 78. 31000
210 L Barra Ter210 984-3.5 31000
220 L Barra Ter220 990.212 31000
301 L1 Maq 301 1000-1.1 25.8.237 -10. 26. 41000
302 L1 Maq 302 1000 2.9 85.16.01 -30. 78. 41000
310 L Barra Ter310 985 -4. 41000
320 L Barra Ter320 991-.54 41000
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc ) (Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)
1 10 1 20.
2 20 1 7.
10 20 1 7.
10 30 1 9.
30 130 1 .01
101 110 1 20.
102 120 1 7.
110 120 1 7.
110 130 1 9.
201 210 1 20.
202 220 1 7.
210 30 1 9.
210 220 1 7.
301 310 1 20.
302 320 1 7.
310 130 1 9.
310 320 1 7.
99999
FIM

```

B.3 - Sistema IEEE 14 barras

```

TITU
**** Sistema teste de 14 maquinas - IEEE ****
DCTE
BASE 100.00 DASE 6264 TEPA 0.1000 EXST 0.4000 TETP 5.0000 TBPA 5.0000
TLPP 1.0000 TEPR 0.1000 QLST 0.4000 TLPR 1.0000 TSBZ 0.0100
TSBA 5.0000 ASTP 0.0500 VSTP 5.0000 TLVC 0.1000 TLTC 0.1000 TSFR 0.0100
ZMAX 500.00 VDVM 150.00 VDVN 01.0000 TUDC 0.0100 TADC 0.0100
PGER 30.0000 TPST 500.00 LFIT 10 ACIT 30 LFCV 3
DCIT 10 VSIT 10 LPIT 50 LFLP 10 LCRT 32
9999
(
(=====
( DADOS DE BARRAS CA
(=====
DBAR
(No)+O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( P1)( Q1)( Sh)(A)
1 2 BARRA-1 01060 0 -999999999 .0 .0 01
2 1 BARRA-2 01045 40.00 -40.0 50.0 21.70 12.7 01
3 1 BARRA-3 01010 0.0 0.0 0.0 40.0 94.20 19.0 01
4 0 BARRA-4 01000 47.80 -3.9 01
5 0 BARRA-5 01000 7.60 1.60 01
6 1 BARRA-6 01070 0.0 0.0 -6.0 24.0 11.20 7.50 01
7 0 BARRA-7 01000 0.0 0.0 01
8 1 BARRA-8 01090 0.0 0.0 -6.0 24.0 0.0 0.0 01
9 0 BARRA-9 01000 29.50 16.6 19.001
10 0 BARRA-10 01000 9.00 5.80 01
11 0 BARRA-11 01000 3.50 1.80 01
12 0 BARRA-12 01000 6.10 1.60 01
13 0 BARRA-13 01000 13.50 5.80 01
14 0 BARRA-14 01000 14.90 5.00 01
9999
(
(=====

```

```

( DADOS DE CIRCUITOS CA
(=====
DLIN
(De)+O (Pa)NcEP ( R% )( X% )(MVAR)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)( Bc)(Cn)(Ce)
1 2 1.93805.917 5.2800
1 5 5.403022.3044.9200
2 3 4.699019.7974.3800
2 4 5.811017.6323.7400
2 5 5.695017.3883.4000
3 4 6.701017.1033.4600
4 5 1.33504.211 1.2800
13 14 17.09334.802
6 11 9.498019.890
6 12 12.29125.581
6 13 6.615013.027
7 8 17.615
7 9 11.001
9 10 3.18108.4500
9 14 12.71127.038
10 11 8.205019.207
12 13 22.09219.988
4 9 55.618 0.669
5 6 25.202 0.632
4 7 20.912 0.678
9999
FIM

```

B.4 - Sistema *New England* 39 barras

```

TITU
Sistema Teste - New England
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE 100. DASE 100. TEPA .1 EXST .4 TETP .5 TBPA 5.
TLPP 1. TEPR .1 QLST .4 TLPR 1. TLPQ 2. TSBZ .01
TSBA 5. ASTP .05 VSTP .1 TLVC .5 TLTC .1 TSFR .01
ZMAX 500. TLPV .5 VDVN 150. VDVN 50. TUDC .01 TADC .01
PGER 30. TPST .1 VFID 70. ZMIN .01 HIST 470 LFIT 10
ACIT 90 LFCV 1 DCIT 10 VSIT 10 LPIT 20 LFLP 5
PDIT 1 LCRT 24 LPRT 60
9999
DBAR
(No) O TB( nome )(G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( P1)( Q1)( Sh)(A(Vf)
1 BARRA-001 01048-9.5 11000
2 BARRA-002 01049-6.9 11000
3 BARRA-003 01031-9.8 322. 2.4 11000
4 BARRA-004 01004-11. 500. 184. 11000
5 BARRA-005 01005-9.4 11000
6 BARRA-006 01007-8.7 11000
7 BARRA-007 00997-11. 233.8 84. 11000
8 BARRA-008 00996-11. 522. 176. 11000
9 BARRA-009 01028-11. 11000
10 BARRA-010 01017-6.3 11000
11 BARRA-011 01013-7.1 11000
12 BARRA-012 01000-7.1 8.5 88. 11000
13 BARRA-013 01014 -7. 11000
14 BARRA-014 01012-8.7 11000
15 BARRA-015 01016-9.1 320. 153. 11000
16 BARRA-016 01032-7.7 329.4 32.3 11000
17 BARRA-017 01034-8.7 11000
18 BARRA-018 01031-9.5 158. 30. 11000
19 BARRA-019 01050 -3. 11000
20 BARRA-020 00991-4.5 680. 103. 11000
21 BARRA-021 01032-5.3 274. 115. 11000
22 BARRA-022 01050-.82 11000
23 BARRA-023 01045 -1. 247.5 84.6 11000
24 BARRA-024 01038-7.6 308.6-92.2 11000
25 BARRA-025 01058-5.5 224. 47.2 11000
26 BARRA-026 01052-6.8 139. 17. 11000
27 BARRA-027 01038-8.8 281. 75.5 11000
28 BARRA-028 01051-3.3 206. 27.6 11000
29 BARRA-029 01050-.54 283.5 26.9 11000
30 1 BARRA-030 01048-4.5 250.146.3-999999999 11000
31 1 BARRA-031 00982.115573.2207.1-999999999 9.2 4.6 11000
32 1 BARRA-032 009831.73 650.205.3-999999999 11000
33 1 BARRA-033 009972.17 632.108.6-999999999 11000
34 1 BARRA-034 01012.734 508.166.5-999999999 11000
35 1 BARRA-035 010494.14 650.209.3-999999999 11000
36 1 BARRA-036 010646.83 560.102.1-999999999 11000
37 1 BARRA-037 010281.24 540..4102-999999999 11000

```

```

38 1 BARRA-038 010276.52 830.23.02-999999999 11000
39 2 BARRA-039 01030-11.1000.87.43-999999999 1104. 250. 11000
9999
DLIN
(De) O (Pa)NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)( Bc)(Cn)(Ce)Ns
1 2 1 .35 4.11 69.87
1 39 1 .1 2.5 75.
2 3 1 .13 1.51 25.72
2 25 1 .7 .86 14.6
2 30 1 1.81 1.025
3 4 1 .13 2.13 22.14
3 18 1 .11 1.33 21.38
4 5 1 .08 1.28 13.42
4 14 1 .08 1.29 13.82
5 6 1 .02 .26 4.34
5 8 1 .08 1.12 14.76
6 7 1 .06 .92 11.3
6 11 1 .07 .82 13.89
6 31 1 2.5 1.07
7 8 1 .04 .46 7.8
8 9 1 .23 3.63 38.04
9 39 1 .1 2.5 120.
10 11 1 .04 .43 7.29
10 13 1 .04 .43 7.29
10 32 1 2. 1.07
12 11 1 .16 4.35 1.006
12 13 1 .16 4.35 1.006
13 14 1 .09 1.01 17.23
14 15 1 .18 2.17 36.6
15 16 1 .09 .94 17.1
16 17 1 .07 .89 13.42
16 19 1 .16 1.95 30.4
16 21 1 .08 1.35 25.48
16 24 1 .03 .59 6.8
17 18 1 .07 .82 13.19
17 27 1 .13 1.73 32.16
19 20 1 .07 1.38 1.06
19 33 1 .07 1.42 1.07
20 34 1 .09 1.8 1.009
21 22 1 .08 1.4 25.65
22 23 1 .06 .96 18.46
22 35 1 1.43 1.025
23 24 1 .22 3.5 36.1
23 36 1 .05 2.72
25 26 1 .32 3.23 51.3
25 37 1 .06 2.32 1.025
26 27 1 .14 1.47 23.96
26 28 1 .43 4.74 78.02
26 29 1 .57 6.25 102.9
28 29 1 .14 1.51 24.9
29 38 1 .08 1.56 1.025
9999
FIM

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRETAS, N. G., COSTA ALBERTO, L. F., *Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos*. 1 ed. São Carlos, EESC-USP, 2000.
- [2] TARANTO, G. N., MARTINS, N., FALCÃO, D. M., MARTINS, A. C. B., DOS SANTOS, M. G., “Benefits of Applying Secondary Voltage Control Schemes to the Brazilian System”, In: *Proceedings of the XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Florianópolis, Brasil, Setembro 2000.
- [3] TAYLOR, C. W., *Power System Voltage Stability*. 1 ed. New York, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [4] VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C. D., “Voltage Stability Analysis in Transient and Midterm Time Scales”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No. 1, pp. 146-154, February 1996.
- [5] PAUL, J. P. LÉOST, J. Y., TESSERON, J. M., “Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 505-511, May 1987.
- [6] CORSI, S., MARANNINO, P., LOSIGNORE, N., MORESCHINI, G., PICCINI, G., “Coordination between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 686-694, May 1995.
- [7] VU, H., PRUVOT, P., LAUNAY, C., HARMAND, Y., “An Improved Voltage Control on Large-Scale Power System”, *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 11, No. 3, pp. 1295-1303, August 1996.
- [8] TAYLOR, C. W., VENKATASUBRAMANIAN, M. V., CHEN, Y., “Wide-Area Stability and Voltage Control”, *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, PR, May 2000.

- [9] GOMES, C. B., *Implementação de Funções Utilizadas no Controle Coordenado de Tensão num Simulador Rápido*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [10] PAUL, J. P., LÉOST, J. Y., “Improvements of the Secondary Voltage Control in France”, *IFAC Symp. on Power Systems*, Beijing, 1986.
- [11] HONGBIN, S., QINGLAI, G., BOMING, Z., WENCHUAN, W., JIANZHONG, T., “Development and Applications of System-wide Automatic Voltage Control System in China”, *IEEE/PES 2009 General Meeting*, July 26-30, Calgary, Canada.
- [12] BLUMSACK, S., HINES, P., PATEL, M., BARROWS, C., SANCHEZ, E. C., “Defining Power Network Zones from Measures of Electrical Distance”, *IEEE/PES 2009 General Meeting*, July 26-30, Calgary, Canada.
- [13] STOTT, B., *Load Flow for A.C. and Integrated A.C./D.C. Systems*, Ph.D. Dissertation, University of Manchester, 1971.
- [14] STOTT, B., “Review of Load-Flow Calculation Methods”, In: *Proceedings of IEEE*, 62:916-929, July 1974.
- [15] LOPES, T. T., PEREIRA, J. L. R., COSTA, V. M., GOMES, N. S., “Inclusão do Modelo de Controle Secundário de Tensão em um Problema de Fluxo de Potência”, *SNPTEE*, Uberlândia, MG, 2003.
- [16] LAGONOTTE, P., SABONNADIÉRE, J. C., LÉOST, J. Y., PAUL, J. P., “Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 479-486, May 1989.
- [17] CORSI, S., “The Secondary Voltage Regulation in Italy”, *IEEE/PES 2000 Summer Meeting*, Panel Session on Secondary Voltage Control, July 16-20, Seattle, Washington.
- [18] SANCHÁ, J. L., FERNÁNDEZ, J. L., CORTÉS, A., ABARCA, J.T., “Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish

- Transmission System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 630-638, May 1996.
- [19] KUNDUR, P., *Power System Stability and Control*. 1 ed. New York, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [20] VAN CUTSEM, T., VOURNAS C., *Voltage Stability of Electric Power Systems*. 1 ed. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [21] SILVA, R. J. G. C., SILVA, F. M. DUARTE, H. A. L., CHAPARRO, J. C. R., JUSTINO, R., “Modelagem e Ajuste do Controle Conjunto de Tensão de Itaipu 50 Hz e 60 Hz”, *SNPTEE*, Foz do Iguaçu, PR, 1997.
- [22] WU, Q., POPOVIC, D. H., HILL, D. J., PARKER, J. C., “Voltage Security Enhancement via Coordinated Control”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 127-135, February 2001.
- [23] GAMM, A. Z., GOLUB, I. I., BACHRY, A., STYCZYNSKI, Z. A., “Solving Several Problems of Power Systems Using Spectral and Singular Analyses”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, pp. 138-148, February 2005.
- [24] MONTICELLI, A., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 1 ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [25] CARPENTIER, J., “CRIC, A New Active Reactive Decoupling Process in Load Flows, Optimal Power Flows and System Control”, *IFAC Symp. on Power Systems and Power Plants Control*, Beijing, 1986.
- [26] LIN, C. T., “Structural controllability”, *IEEE Automatic Control*, AC-19, no. 19, June 1974.
- [27] BEGOVIC, M. M., PHADKE, A. G., “Dynamic Simulation of Voltage Collapse”, *In: Proceedings of the 1989 PICA Conference*, Seattle, Wa, May 1-5, pp. 336-341.

- [28]BEGOVIĆ, M. M., PHADKE, A. G., “Voltage Stability Assessment through Measurement for a Reduced State Vector”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-5, No. 1, pp. 198-203, February 1990.
- [29]SCHLUETER, R. A., HU, I., CHANG, M. W., LO, J. C., COSTI, A. “Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse”, Paper No. 90 WM 096-8 PWRS, Presented at the 1990 *IEEE Winter Meeting*, Atlanta, GA, Feb. 4-9, 1991.
- [30]SCHLUETER, R. A., “Voltage Collapse Dynamic Security Assessment using Structural Stability Analysis”, *In Proceedings of the 1988 EPRI/CRIEPI Symposium on Dynamics and Control*, May 1989.
- [31]ILIC, M., STANKOVIC, A., *Innovative Power System Control Concepts*, EPRI Final Report, Sept. 9. 1989.
- [32]MILI, L., BALDWIN, T., ADAPA, R., “Phasor Measurement Placement for Voltage Stability Analysis of Power Systems”, *In Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii, pp. 3033-3038, Dec.1990.
- [33]BYERLY, R. T., SHERMAN, D. E., BENNON, R. J., "Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems", *RP744-I Interim Report, EPRI EL-726*, Palo Alto, CA, April 1978.
- [34]BEGOVIĆ, M. M., PHADKE, A. G., “Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 114-123, February 1992.
- [35]SOUZA, L. J., *Adequação das Ações de Controle de Tensão em Sistemas Elétricos Objetivando o Reforço das Condições de Segurança de Tensão*, Tese de D.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [36]PINTO, H.J.C.P., MARTINS, N., VIEIRA Fº, X., BIANCO, A., et al, 1994, “Modal Analysis for Voltage Stability Applications at Base Case and Point of Collapse”, In: *Proceedings of Bulk Power Systems Voltage Phenomena III : Voltage Stability Security and Control*, pp. 215-228,Davos, Switzerland, August.

- [37] FERRAZ, J. C. R., *Fluxo de Potência Continuado e Análise Modal da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- [38] PINTO, H. J. C. P., *Análise Modal Aplicada ao Problema da Estabilidade de Tensão*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- [39] MARTINS, N., LIMA, L. T. G., “Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems”, *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, publication 90 TH 0292-3 PWR, pp. 17-33, 1990.
- [40] BARBOSA, A. A., *Utilização de ferramentas Lineares na Análise e Controle do Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Grande Porte*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- [41] GOMES JUNIOR, S., QUINTÃO, P. E. M., MARTINS, N., “A Comprehensive Tool for Small Signal Analysis of Subsynchronous Resonance”, In: *Proceedings of the IX SEPOPE*, Rio de Janeiro, Brasil, May 2004.
- [42] VARRICCHIO, S. L., GOMES JUNIOR, S., MARTINS, N., et al, “Advanced Tool for Harmonic Analysis of Power Systems”, In: *Proceedings of the IX SEPOPE*, Rio de Janeiro, Brasil, May 2004.
- [43] DA SILVA, L. C. P., *Uma Expansão dos Métodos de Curvas-PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de D.Sc., FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, Março, 2001.
- [44] PASSOS FILHO, J. A., *Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [45] CHEN, C. T., *Linear System Theory and Design*, 3 ed. New York, Oxford University Press Inc., 1999.

- [46] SAUER, P. W., PAI, M. A., *Power System Dynamics and Stability*. 1 ed. New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1998.
- [47] TIRANUCHIT, A., THOMAS, R. J., “A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 87-93, February 1998.
- [48] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P. “Voltage stability using modal analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1542, Nov 1992.
- [49] LÖF, P.-A., SMED, T., ANDERSSON, G., HILL, D. J., “Fast Calculation of a Voltage Stability Index”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 54-64, Feb 1992.
- [50] LÖF, P.-A., ANDERSSON, G., HILL, D. J., “Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 326-335, Feb 1993.
- [51] WILKINSON, J. H., *The Algebraic Eigenvalue Problem*. New York, Oxford Univ. Press, 1965.
- [52] GAMM, A. Z. GOLUB, I. I., “The Problem of Weak Places in Electric Power Systems”, In: *Proceedings of 1995 Internacional Conference on Electrical Power Engineering Power Tech*, Stockholm, pp.542-546.
- [53] PASSOS FILHO, J. A., *Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema do Fluxo de Potência*, Tese de M.Sc., UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2000.
- [54] HENRIQUES, R. M., *Influência de Cargas Tipo Motor de Indução nas Margens de Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [55] PESCHON, J., PIERCY, D. S., TINNEY, W. F., TVEIT, O. J., “Sensitivity in Power Systems”, *IEEE Transactions on Power App. Syst.*, PAS-87:1687-1696, New York, 1968.

- [56]CEPEL, 2009, *Programa de Análise de Redes - ANAREDE Versão 09.05.02 – Manual do Usuário*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [57]Disponível em: <http://www.ons.com.br> .
- [58]IEEE, “IEEE Reliability Test System”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98, 1979.
- [59]TINNEY, W. F., HART, C. E., “Power Flow Solution by Newton’s Method”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-86:1449-1460, November 1967.
- [60]TINNEY, W. F., WALKER, J. W., “Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorizations”, In: *Proceedings of IEEE*, 55:1801-1809, November 1967.