

**FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO**  
**BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DEFINIÇÃO DE CURVAS PV PELO FLUXO DE CARGA  
CONTINUADO PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM ELOS DE  
CORRENTE CONTÍNUA**

Relatório científico referente ao período de 1 de março a 31 de julho de 2021.

Processo FAPESP: 2020/15051-3

**Beneficiário:** Joaquim Minarelli Gaspar

**Responsável:** Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage

São Carlos  
2021



# Assinaturas

Este é o relatório parcial referente ao acompanhamento das atividades relacionadas à realização do projeto de pesquisa intitulado “Definição de Curvas PV pelo Fluxo de Carga Continuado para Sistemas de Transmissão com Elos de Corrente Contínua”, cujo número do processo FAPESP é 2020/15051-3.

Cientes das informações prestadas, agradecemos e ficamos à inteira disposição para esclarecimentos de eventuais dúvidas.

São Carlos, 10 de agosto de 2021.

---

Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage  
Orientador

---

Joaquim Minarelli Gaspar  
Bolsista IC



# Resumo

Este projeto de pesquisa tem como objetivo a definição dos pontos de equilíbrio estáveis que definem as curvas PV de sistemas de transmissão energia elétrica com elos CC. O principal objetivo é, portanto, verificar a influência dos diferentes modos de controle dos elos CC na determinação do máximo carregamento desses Sistemas de Energia Elétrica (SEEs). Esta pesquisa fundamenta-se metodologicamente na determinação do ponto de máximo carregamento de sistemas de transmissão de energia elétrica com elos CC via fluxo de carga continuado. Para isso serão obtidos dados teóricos a partir de levantamentos bibliográficos que explicitarão os conceitos associados à resolução do problema de máximo carregamento pelo fluxo de carga continuado e a modelagem dos diferentes modos de controle dos elos CC. Resultados numéricos serão obtidos para sistemas-teste IEEE modificados pela inclusão de elos CC comumente referenciados na literatura correlata.

**Palavras chave:** fluxo de carga, fluxo de carga continuado, elos CC, modos de controle de elos CC.



# Listas de Figuras

3.1	Círculo ramos de transmissão genéricos (linhas de transmissão, transformadores em-fase e transformadores defasadores) conectando as barras $k$ e $m$ .	31
3.2	Curva $PV$ de um sistema com $BSN$	37
3.3	Curva $PV$ de um sistema com $BDIL$ e $BSN$	37
3.4	Curva $PV$ de um sistema com $BEIL$	38
3.5	Curva $PV$ de um sistema com $BDIL$ e $BEIL$	39
3.6	Elo de Corrente Contínua ( <i>link CC</i> )	42
3.7	Conversor $CA - CC$	43
3.8	Tensões de <i>fase – neutro</i> e <i>fase – fase</i> para o conversor $CA - CC$	45
3.9	Tensões de <i>fase – neutro</i> e <i>fase – fase</i> para o conversor $CA - CC$ com $\alpha \neq 0^\circ$	46
3.10	Efeito do ângulo de comutação $\mu$ no período de condução dos tiristores	47
3.11	Efeito do ângulo de comutação $\mu$ no período de condução de $T1$ , $T2$ e $T3$	48
3.12	Tensões de <i>fase – neutro</i> e <i>fase – fase</i> para o conversor $CA - CC$ com $\alpha \neq 0^\circ$ e $L_c \neq 0$	48
3.13	Círculo equivalente durante o período de comutação dos tiristores $T1$ e $T3$	49
3.14	Tensão na carga durante o período de comutação dos tiristores $T1$ e $T3$	51
3.15	Círculo equivalente do retificador	52
3.16	Curva de tensão para o inversor	53
3.17	Comparação entre os ângulos do retificador e inversor	54
3.18	Círculo equivalente do inversor	55
3.19	Círculo equivalente do Elo de Corrente Contínua	55
3.20	Perfil Tensão - Corrente do 1º modo de controle do <i>link CC</i>	58
3.21	Perfil Tensão - Corrente do 2º modo de controle do <i>link CC</i>	60
3.22	Perfil Tensão com Ambiguidade	61
3.23	Perfil Tensão com o modo de controle $\beta$ constante	62
4.1	Curvas $PV$ para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 5 barras sem limites de geração de potência reativa	66

4.2	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 5 barras . . . . .	67
4.3	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	68
4.4	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	70
4.5	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras sem limites de geração de potência reativa . . . . .	72
4.6	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras . . . . .	73
4.7	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	74
4.8	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	75
4.9	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras com vetores de direção de aumento . . . . .	77
4.10	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras com vetores de direção de aumento . . . . .	78
4.11	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 14 barras sem limites de geração de potência reativa . . . . .	80
4.12	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 14 barras . . . . .	81
4.13	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	82
4.14	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	84
4.15	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras sem limites de geração de potência reativa . . . . .	86
4.16	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 30 barras . . . . .	87
4.17	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	89
4.18	Curvas <i>PV</i> das barras de geração para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	90
4.19	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	92
4.20	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 41 barras sem limites de geração de potência reativa . . . . .	94

4.21	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 41 barras . . . . .	95
4.22	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29 . . . . .	100
4.23	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 57 . . . . .	101
4.24	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 57 barras . . . . .	102
4.25	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29 . . . . .	105
4.26	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 57 . . . . .	105
4.27	Curvas <i>PV</i> das barras de geração para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa . . . . .	106
4.28	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 57 barras . . . . .	107
4.29	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29 . . . . .	113
4.30	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 59 . . . . .	114
4.31	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 60 a 89 . . . . .	114
4.32	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 90 a 118 . . . . .	115
4.33	Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 118 barras . . . . .	116
4.34	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29 . . . . .	122
4.35	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 59 . . . . .	122
4.36	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 60 a 89 . . . . .	123
4.37	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 90 a 118 . . . . .	123
4.38	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras de geração com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 66 . . .	124
4.39	Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras de geração com limites de geração de potência reativa - Barras 69 a 116 . .	124

4.40 Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 118 barras . . . . .	125
4.41 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (1) . . . . .	138
4.42 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (2) . . . . .	138
4.43 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (3) . . . . .	139
4.44 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (4) . . . . .	139
4.45 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (5) . . . . .	140
4.46 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (6) . . . . .	140
4.47 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (7) . . . . .	141
4.48 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (8) . . . . .	141
4.49 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (9) . . . . .	142
4.50 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (10) . . . . .	142
4.51 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (1) . . . . .	154
4.52 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (2) . . . . .	154
4.53 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (3) . . . . .	155
4.54 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (4) . . . . .	155
4.55 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (5) . . . . .	156
4.56 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (6) . . . . .	156
4.57 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (7) . . . . .	157
4.58 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (8) . . . . .	157

4.59 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (9) . . . . .	158
4.60 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (10) . . . . .	158
4.61 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis das barras de geração do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (1) . . . . .	159
4.62 Curvas <i>PV</i> para os pontos de equilíbrio estáveis das barras de geração do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (2) . . . . .	159
A.1 Diagrama unifilar do sistema de 5 barras . . . . .	173
A.2 Diagrama unifilar do sistema de 6 barras . . . . .	174
A.3 Diagrama unifilar do sistema de 14 barras . . . . .	176
A.4 Diagrama unifilar do sistema de 30 barras . . . . .	178
A.5 Diagrama unifilar do sistema de 41 barras . . . . .	181
A.6 Diagrama unifilar do sistema de 118 barras . . . . .	189
A.7 Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 1 . . . . .	198
A.8 Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 2 . . . . .	199
A.9 Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 3 . . . . .	200



# Listas de Tabelas

1.1	Cronograma de atividades . . . . .	21
4.1	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) sem limites de geração de potência reativa - Sistema 5 barras . . . . .	66
4.2	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4,94$ ) - Sistema de 5 barras . . . . .	68
4.3	Estado do sistema no ponto $\sigma = 2,47$ - Sistema de 5 barras . . . . .	69
4.4	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,40$ ) - Sistema de 5 barras . . . . .	70
4.5	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) sem limites de geração de potência reativa - Sistema 6 barras . . . . .	71
4.6	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,31$ ) - Sistema de 6 barras . . . . .	73
4.7	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,3311$ ) - Sistema de 6 barras . . . . .	75
4.8	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,66885$ ) - Sistema de 6 barras . . . . .	77
4.9	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 14 barras . . . . .	79
4.10	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4,0$ ) - Sistema de 14 barras . . . . .	81
4.11	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,78$ ) - Sistema de 14 barras . . . . .	83
4.12	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 30 barras . . . . .	85
4.13	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,95$ ) - Sistema de 30 barras . . . . .	88
4.14	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,54$ ) - Sistema de 30 barras . . . . .	91
4.15	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 41 barras . . . . .	93
4.16	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,15$ ) - Sistema de 41 barras . . . . .	96

4.17	Limites de geração de potência reativa para o sistema de 41 barras . . . . .	97
4.18	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 57 barras . . . . .	98
4.19	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,58$ ) - Sistema de 57 barras . . . . .	102
4.20	Limites de geração de potência reativa para o sistema de 57 barras . . . . .	104
4.21	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,49$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 57 barras . . . . .	107
4.22	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 118 barras . . . . .	110
4.23	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,87$ ) - Sistema de 118 barras . . . . .	116
4.24	Limites de geração de potência reativa para o sistema de 118 barras . . . . .	120
4.25	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,79$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 118 barras . . . . .	125
4.26	Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 300 barras . . . . .	129
4.27	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,36$ ) - Sistema de 300 barras . . . . .	143
4.28	Limites de geração de potência reativa para o sistema de 300 barras . . . . .	151
4.29	Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 0,98$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 300 barras . . . . .	160
A.1	Dados das barras - Sistema 5 barras . . . . .	173
A.2	Dados das linhas - Sistema 5 barras . . . . .	174
A.3	Dados das barras - Sistema 6 barras . . . . .	175
A.4	Dados das linhas - Sistema 6 barras . . . . .	175
A.5	Dados das barras - Sistema 14 barras . . . . .	176
A.6	Dados das linhas - Sistema 14 barras . . . . .	177
A.7	Dados das barras - Sistema 30 barras . . . . .	179
A.8	Dados das linhas - Sistema 30 barras . . . . .	180
A.9	Dados das barras - Sistema 41 barras . . . . .	182
A.10	Dados das linhas - Sistema 41 barras . . . . .	183
A.11	Dados das barras - Sistema 57 barras . . . . .	184
A.12	Dados das linhas - Sistema 57 barras . . . . .	186
A.13	Dados das barras - Sistema 57 barras . . . . .	189
A.14	Dados das linhas - Sistema 57 barras . . . . .	192
A.15	Dados das barras - Sistema 300 barras . . . . .	200
A.16	Dados das linhas - Sistema 300 barras . . . . .	208

# Conteúdo

<b>1 Considerações Iniciais</b>	<b>19</b>
1.1 Atividades Realizadas . . . . .	19
1.2 Artigo SpliTech 2021 . . . . .	21
1.3 Objetivos . . . . .	22
<b>2 Introdução</b>	<b>23</b>
2.1 Motivação . . . . .	24
2.2 Levantamento Bibliográfico . . . . .	25
<b>3 Metodologia</b>	<b>27</b>
3.1 Fluxo de Carga . . . . .	27
3.1.1 Formulação básica do problema de Fluxo de Carga . . . . .	27
3.1.2 Formulação do problema de Fluxo de Carga com barra slack distribuída . . . . .	30
3.1.3 Expressões gerais para o Fluxo de Carga . . . . .	31
3.1.4 Resolução do Problema de Fluxo de Carga - Formulação Básica . .	33
3.1.5 Resolução do Problema de Fluxo de Carga - Formulação com Barra Slack Distribuída . . . . .	34
3.2 Fluxo de Carga Continuado . . . . .	35
3.2.1 Análise de Bifurcações . . . . .	36
3.2.2 Equacionamento do Problema de Fluxo de Carga Continuado . . .	39
3.2.3 Resolução do Problema de Fluxo de Carga Continuado . . . . .	40
3.3 Elo de Corrente Contínua . . . . .	42
3.3.1 Modelagem matemática do Elo de Corrente Contínua . . . . .	42
3.3.2 Operação do retificador . . . . .	52
3.3.3 Operação do inversor . . . . .	53
3.3.4 Expressões gerais para o Elo de Corrente Contínua . . . . .	55
3.3.5 Controle do Elo de Corrente Contínua . . . . .	57
3.3.6 Equacionamento dos modos de controle do Elo de Corrente Contínua	62

3.3.7 Resolução do Problema de Fluxo de Carga para sistemas com Elo de Corrente Contínua . . . . .	64
<b>4 Resultados Preliminares</b>	<b>65</b>
4.1 Sistema de 5 barras . . . . .	65
4.1.1 Sistema de 5 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	65
4.1.2 Sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	68
4.2 Sistema de 6 barras . . . . .	71
4.2.1 Sistema de 6 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	71
4.2.2 Sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	73
4.2.3 Simulação do sistema de 6 barras pelo FCC com parâmetros de direção de aumento . . . . .	76
4.3 Sistema de 14 barras . . . . .	78
4.3.1 Sistema de 14 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	79
4.3.2 Sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	82
4.4 Sistema de 30 barras . . . . .	84
4.4.1 Sistema de 30 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	84
4.4.2 Sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	88
4.5 Sistema 41 barras (CIGRE-32) . . . . .	92
4.5.1 Sistema de 41 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	92
4.5.2 Sistema de 41 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	97
4.6 Sistema de 57 barras . . . . .	98
4.6.1 Sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	98
4.6.2 Sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	104
4.7 Sistema de 118 barras . . . . .	109

4.7.1	Sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	109
4.7.2	Sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	120
4.8	Sistema de 300 barras . . . . .	129
4.8.1	Sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	129
4.8.2	Sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração . . . . .	151
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>169</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>171</b>
<b>A Dados dos Sistemas</b>		<b>173</b>
A.0.1	Dados do sistema de 5 barras . . . . .	173
A.0.2	Dados do sistema de 6 barras . . . . .	174
A.0.3	Dados do sistema de 14 barras . . . . .	175
A.0.4	Dados do sistema de 30 barras . . . . .	177
A.0.5	Dados do sistema de 41 barras (CIGRE-32) . . . . .	181
A.0.6	Dados do sistema de 57 barras . . . . .	184
A.0.7	Dados do sistema de 118 barras . . . . .	188
A.0.8	Dados do sistema de 300 barras . . . . .	198
<b>B Artigo SpliTech 2021</b>		<b>221</b>



# **Capítulo 1**

## **Considerações Iniciais**

O presente relatório compõe o primeiro dos dois relatórios de acompanhamento do projeto de pesquisa intitulado “Definição de curvas PV pelo fluxo de carga continuado para sistemas de transmissão com elos CC”, e refere-se aos resultados parciais obtidos durante o período de 1 de março de 2021 a 31 de julho de 2021.

Neste capítulo serão detalhadas as atividades realizadas durante o referido período, destacando-se a submissão e aceitação de um artigo para congresso internacional relacionado a parte das atividades deste projeto de pesquisa.

### **1.1 Atividades Realizadas**

Durante o referido período foram realizadas as seguintes atividades:

#### **1. Levantamento bibliográfico:**

Neste período foi realizado o levantamento bibliográfico sobre problemas que envolvem a determinação do máximo carregamento de sistemas de energia elétrica, com aplicações na alocação de geração e carga ativas, de forma estável e segura, relacionada ao problema de leilão de energia elétrica. Além disso, novas bibliografias relacionadas a bifurcações em sistemas de equações algébricas não lineares foram estudadas para a melhor compreensão dessa característica dos modelos de sistemas de energia elétrica.

#### **2. Implementação dos algoritmos para a resolução do problema de Fluxo de Carga e Fluxo de Carga Continuado:**

Os algoritmos para a resolução de problema de Fluxo de Carga e de Fluxo de Carga Continuado foram implementados em MATLAB. O cálculo do Fluxo de Carga é baseado no modelo genérico de um sistema de transmissão de energia elétrica, considerando linhas de transmissão, transformadores em-fase, transformadores defasadores

e bancos de capacitores/reactores conectados às barras do sistema. São considerados também os limites de geração de potência reativa nas barras de geração. Já o Fluxo de Carga Continuado é resolvido de forma parametrizada em relação ao fator de carregamento do sistema, cujo valor máximo é determinado de forma iterativa por sucessivas resoluções do problema de Fluxo de Carga.

3. Realização de testes computacionais e análise dos resultados obtidos:

Oito diferentes sistemas de transmissão comumente referenciados na literatura correlata foram utilizados nos testes dos algoritmos implementados, sendo eles sistemas de 5, 6, 14, 30, 41, 57, 118 e 300 barras. Durante os testes foram considerados diferentes limites de geração de potência reativa para as barras de geração de forma a observar a interferência desses limites nas características das curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis dos sistemas.

4. Elaboração e submissão de um artigo para o *6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies 2021* (SpliTech 2021):

Além das atividades previstas no projeto de pesquisa originalmente submetido à FAPESP, também foi elaborado um artigo para o *SpliTech 2021* em conjunto com pesquisadores da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Este artigo foi aceito, será publicado nos anais do congresso e disponibilizado na plataforma IEEEExplore. O referido artigo foi anexado ao Apêndice B e será detalhado na Seção 1.2.

8. Divulgação dos resultados do projeto de pesquisa pela elaboração de relatórios à FAPESP, submissão de artigos para reuniões científicas e periódicos indexados.

As atividades deste projeto de pesquisa cujas execuções são previstas para os próximos meses serão apresentadas no relatório final a ser submetido em março de 2022. São elas:

5. Adaptação do modelo genérico do sistema de energia elétrica e dos algoritmos do Fluxo de Carga e, consequentemente, Fluxo de Carga Continuado com a inclusão de elos de corrente contínua e seus modos de controle.
6. Realização de testes computacionais e análise dos resultados obtidos utilizando sistemas de transmissão de energia elétrica com elos de corrente contínua referenciados na literatura correlata.
7. Interação com centro de excelência em pesquisa no exterior:

Devido à pandemia da COVID-19, a possibilidade de estágio em pesquisa no exterior junto ao *Environmental Research & Innovation (ERIN)* do *Luxembourg Institute of*

*Science and Technology* (LIST) em Esch-sur-Alzette, Luxemburgo, foi temporariamente suspensa. Dessa forma, caso a pandemia esteja sob controle até novembro de 2021, será pleiteada a Bolsa de Estágio em Pesquisa no Exterior (BEPE) junto à FAPESP.

8. Divulgação dos resultados do projeto de pesquisa pela elaboração de relatórios à FAPESP, submissão de artigos para reuniões científicas e periódicos indexados.

O cronograma apresentado na Tabela 1.1 constitui-se pelas atividades realizadas durante o referido período e pelas atividades previstas para os próximos meses a serem apresentadas no relatório final.

Tabela 1.1: Cronograma de atividades

Atividade	2021										2022		
	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.
1	•	•	•										
2	•	•	•	•									
3				•	•								
4		•	•	•									
5						•	•	•					
6								•	•				
7									•	•			
8		•	•	•	•					•	•	•	•

Na Tabela 1.1, cada • corresponde a 4 semanas de dedicação à atividade.

## 1.2 Artigo SpliTech 2021

Durante os meses de abril a junho de 2021, em parceria com os pesquisadores Ricardo A. L. Rabelo, Rafael M. Barros e Enza R. de Sampaio Ferreira do Departamento de Computação da Universidade Federal do Piauí (UFPI), foi elaborado um artigo para o *6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies 2021* (SpliTech 2021).

O artigo intitulado *A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow* descreve uma abordagem em dois estágios para resolver o problema de Fluxo de Potência Ótimo com restrições de estabilidade/segurança de tensão. Essa abordagem consiste em, de maneira alternada, resolver o problema do leilão de energia elétrica por um PSO (*Particle Swarm Optimization*) e verificar se as soluções obtidas estão dentro das margens de estabilidade/segurança de tensão pelo Fluxo de Carga Continuado.

### 1.3 Objetivos

Este projeto de pesquisa tem como objetivo a definição dos pontos de equilíbrio estáveis que definem as curvas PV de sistemas de transmissão energia elétrica com elos CC. O principal objetivo é, portanto, verificar a influência dos diferentes modos de controle dos elos CC na determinação do máximo carregamento desses Sistemas de Energia Elétrica.

# Capítulo 2

## Introdução

Devido ao crescente aumento do carregamento nos Sistemas de Energia Elétrica (SEEs), aliado à falta de investimentos na expansão e manutenção do setor, a operação desses sistemas, mais especificamente do sistema de transmissão, tem sido feita cada vez mais próxima aos seus limites controle, dificultando, com isso, o pleno atendimento da demanda por energia elétrica. Restrições ecológicas e/ou econômicas associadas à tendência de maximização do uso de recursos e dispositivos de controle dos SEEs também contribuem, de forma decisiva, na consolidação deste cenário. Com o advento de um ambiente desregulamentado, a malha de transmissão, interconectada e extremamente complexa, passou a ser utilizada para fins os quais esta não foi originalmente projetada. Além disso, a reestruturação institucional e regulamentar do setor elétrico brasileiro e de vários outros países, marcada pela mudança de um modelo monopolista e verticalmente integrado para um modelo competitivo e desverticalizado, resultou no surgimento de dificuldades no controle e monitoramento dos sistemas de transmissão devido à existência de contratos bilaterais entre a geração e a distribuição.

Como consequência direta do aumento do carregamento, os SEEs passaram a operar em uma região na qual um pequeno acréscimo de carga gera um sensível aumento das perdas reativas nas linhas de transmissão. Nesses sistemas, mesmo aqueles que operam com tensões muito próximas de 1 p.u., pequenas variações nas magnitudes das tensões pouco afetarão os suportes de reativos dos elementos shunt do tipo capacitivo, inclusive os de linha. Por outro lado, pequenas variações na diferença de tensão entre os extremos de uma linha de transmissão, associadas às grandes diferenças angulares, podem causar alterações substanciais nas “perdas” série de potência reativa. Na tentativa de se manter um perfil adequado de tensão, a progressiva exaustão das reservas de reativos, provenientes das barras com controle da magnitude de tensão pela injeção de reativos por geradores e condensadores síncronos, tem como consequência a perda de controle da tensão por parte dos geradores. Isso resulta em uma queda contínua da tensão que, por sua vez, causa um sensível aumento da diferença angular entre os extremos da linha de transmissão, a

fim de se manter a transmissão de potência ativa. O aumento dessa diferença angular, somado à queda de tensão e a consequente redução compulsória do suporte de reativos por parte dos shunts do tipo capacitivo, causa um novo aumento nas perdas reativas das linhas de transmissão que leva o sistema a operar próximo a uma região na qual o controle de tensão não é mais possível (ALVES et al., 2000).

Essa queda gradual e viciosa das magnitudes de tensão é o estágio inicial do colapso de tensão. Em situações de um decaimento muito rápido da tensão para um pequeno aumento de carga em sistemas carregados, as ações dos controles ou dos operadores pouco ou nada podem fazer para evitá-lo.

Embora o colapso de tensão seja um fenômeno essencialmente dinâmico, sua análise tem sido intensamente realizada através de métodos de análise estática. Isso porque análises dinâmicas no domínio do tempo, além de demandar um alto custo computacional, não fornecem informações quanto à sensibilidade ou ao grau de estabilidade de um sistema elétrico. Essas limitações acabam por inviabilizar o uso da abordagem dinâmica tanto para o monitoramento em tempo-real quanto para a análise de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de grande porte (ALVES et al., 2000).

Pela abordagem estática, a determinação do máximo carregamento de um SEE consiste em um resultado imediato da utilização de ferramentas analíticas capazes de predizer os limites de transferência de potência de um SEE. A variação de carga entre um dado ponto de operação e o ponto de máximo carregamento, para um padrão específico de acréscimo de carga, corresponde à margem de carregamento de um sistema.

O objetivo das empresas concessionárias de energia elétrica é tornarem-se cada vez mais eficientes. Essa eficiência, porém, somente será atingida a partir de inovações e aperfeiçoamentos nos modelos e programas computacionais utilizados como ferramentas de auxílio à tomada de decisões na operação de seus sistemas. Para os SEEs de grande porte como o Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil, no qual empreendimentos de grande porte para a geração de grandes blocos de energia são implementados cada vez mais distantes dos principais centros consumidores, a transmissão em Corrente Contínua (CC) surge como a alternativa mais técnica e economicamente viável, e inovações e aperfeiçoamentos nos modelos e programas computacionais para a análise desses sistemas demandam maior atenção.

## 2.1 Motivação

A criação da entidade Itaipu Binacional, em 1974, com início das obras de construção da usina hidrelétrica de Itaipu no Rio Paraná no ano seguinte, bem como questões que dizem respeito às diferentes formas de transmissão de energia elétrica passaram a ser um recorrente tópico de estudos para os pesquisadores da área (BERNARDES,

2020). Isso se deveu, principalmente, porque a energia produzida no setor de 50 Hz de Itaipu (destinada ao Paraguai) não podia ser injetada diretamente no sistema brasileiro (cuja frequência nominal é 60 Hz) (ITAIPU, 2020).

Em 1984 começou a operar em Itaipu o primeiro sistema de transmissão de energia elétrica com elo CC brasileiro. Esse sistema é formado por duas linhas de transmissão com tensões de  $\pm 600\text{kV}$  e extensão de aproximadamente 810 km, interligando as subestações de Foz do Iguaçu (FURNAS), no Paraná, e Ibiúna (FURNAS), em São Paulo (ITAIPU, 2020). No entanto, o debate a respeito de qual a forma mais técnica e economicamente viável de se transmitir grandes blocos de energia elétrica por grandes distâncias até um centro consumidor não é atual e se originou na ocasião da construção do complexo de Niagara Falls, nos Estados Unidos, no ano de 1876 (MONTICELLI; GARCIA, 1999).

Àquela época não se sabia se a transmissão de energia elétrica por grandes distâncias deveria ser feita em CC ou Corrente Alternada (CA) e, caso a escolha fosse transmissão em CA, quais seriam a frequência, número de fases e magnitude de tensão mais adequadas. Com contribuições importantes de expoentes físicos no estudo de sistemas de transmissão de energia elétrica como Thomas Alva Edson, Oliver Shallenberger, Nikola Tesla e outros, chegou-se à conclusão que para se flexibilizar o planejamento e a operação de sistemas interligados de grande porte subsistemas em CC seriam usados de maneira auxiliar (e complementar) aos sistemas CA, resultando em SEEs constituídos basicamente por uma rede interligada em CA com elos CC (MONTICELLI; GARCIA, 1999), assim como ocorre no SIN com os elos CC de Itaipu no Rio Paraná, do complexo hidrelétrico Jirau e Santo Antônio no Rio Madeira e de Belo Monte no Rio Xingu.

Dada a importância e a relevância desses subsistemas em CC, é apresentado a seguir um breve levantamento bibliográfico acerca de modelos e metodologias de determinação dos pontos de equilíbrio estáveis de SEEs em CA com elos CC.

## 2.2 Levantamento Bibliográfico

O cálculo dos pontos de equilíbrio estáveis de um Sistema de Energia Elétrica (SEE) pode ser realizado por meio da resolução do problema de fluxo de carga, que consiste na resolução das equações algébricas não lineares que definem o modelo estático do sistema por métodos iterativos, dentre os quais destacam-se os métodos de Gauss-Seidel (STEVENSON, 1974), de Newton-Raphson (TINNEY; HART, 1967), de Newton desacoplado (STOTT, 1972) e o desacoplado rápido (STOTT; ALSAC, 1974).

O cálculo do ponto de máximo carregamento de SEEs para um determinado padrão de acréscimo de geração e carga é de fundamental importância para o planejamento da operação desses sistemas e define um “limitante inferior” para os pontos de equilíbrio estáveis. A metodologia mais comumente empregada para o cálculo do ponto de máximo

de carregamento consiste em sucessivas resoluções do problema de fluxo de carga em função de um fator de carregamento  $\sigma$  (parâmetro) para um dado padrão de acréscimo de geração e carga (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). Se um ponto de equilíbrio estável é encontrado,  $\sigma$  é acrescido e obtém-se um ponto de equilíbrio estável em função de um maior carregamento do SEE. Esse procedimento continua iterativamente até que um novo ponto de equilíbrio estável do SEE não possa ser determinado dentro de um acréscimo mínimo de  $\sigma$ . O ponto de máximo carregamento consiste na fusão dos pontos de equilíbrio estável e instável do sistema algébrico não linear que modela o SEE e, a partir do qual, a solução do problema fluxo de carga deixa de existir para maiores valores de  $\sigma$ . Esse ponto é matematicamente representado por uma bifurcação, que comumente se distingue em dois tipos: Bifurcação Sela-Nó (BSN) e Bifurcação Induzida por Limite (BIL) (AVALOS et al., 2008; JORDAN; SMITH; SMITH, 2007).

Progressos consideráveis têm sido realizados no cálculo do ponto de máximo carregamento de SEEs. Entre algumas das metodologias existentes destacam-se os métodos os métodos de continuação (IBA et al., 1991); (CANIZARES; ALVARADO, 1993); (SEYDEL, 2009), diretos (CANIZARES; ALVARADO, 1993); (SEYDEL, 2009); (CAÑIZARES, 1995) e os métodos de otimização (CUTSEM, 1991); (IRISARRI et al., 1997). Um importante estudo referente à técnica de otimização é encontrado em (IRISARRI et al., 1997), onde o método de pontos interiores é aplicado em uma abordagem não linear do primal-dual em suas versões pura e preditor-corretor. Quanto aos modelos propostos, destaca-se o uso, em métodos de otimização, de restrições de complementaridade que modelam a perda do controle da magnitude de tensão pela injeção de reativos por geradores e condensadores síncronos à medida que um de seus limites de geração de potência reativa é atingido (ROSEHART; ROMAN; SCHELLENBERG, 2005). Esses avanços, tanto nas metodologias quanto nos modelos empregados, têm permitido a determinação do ponto de máximo carregamento de forma eficiente e cada vez mais confiável.

A resolução do problema de fluxo de carga para SEEs com elos CC é amplamente discutida em (ARRILLAGA; ARNOLD, 1990); (KUNDUR, 2007)), usando o método de Newton-Raphson (TINNEY; HART, 1967) e algumas variações desse. Em (KUNDUR, 2007) também é descrito detalhadamente os modos de controle do elos CC e como deve ser modificado o método de Newton-Raphson (TINNEY; HART, 1967) para a inclusão desse controle por ajustes alternados.

Em (FILHO, 2000) é apresentada uma modelagem para a incorporação dos modos de controle de elos CC diretamente no sistema de equações algébricas que modelam o SEE. Em (FILHO et al., 2004), esse mesmo modelo é aplicado à análise de um SEE com um elo CC infinito.

# Capítulo 3

## Metodologia

Neste capítulo são apresentadas a modelagem do problema de fluxo de carga, fluxo de carga continuado e a modelagem do elo de corrente contínua, incluindo os seus modos de operação.

### 3.1 Fluxo de Carga

O problema do Fluxo de Carga (FC) consiste em determinar o estado da rede de transmissão de energia elétrica (magnitude e o ângulo de fase da tensão em cada barra da rede). Com o estado do sistema conhecido, é possível determinar todas as outras grandezas de interesse do sistema, tais como a geração de potência ativa e reativa nas barras de geração e as perdas de potência nas linhas de transmissão. Dessa forma, determina-se todas as grandezas que caracterizam o comportamento do sistema em regime permanente (MONTICELLI, 1983).

Esse problema é normalmente representado por um conjunto de equações e inequações algébricas, visto que a modelagem do sistema é estática. Esse sistema de equações e inequações correspondem, respectivamente, as leis de Kirchhoff e ao conjunto de restrições operacionais/segurança do sistema.

#### 3.1.1 Formulação básica do problema de Fluxo de Carga

Na formulação básica do problema de FC, apenas duas grandezas são conhecidas em cada barra. Dependendo de quais grandezas são conhecidas, as barras são classificadas como um dos três tipos:

1. Barra  $V\theta$ , barra de referência angular ou *slack*:

- $V$  e  $\theta$  são conhecidos;

- $P$  e  $Q$  são variáveis do sistema (calculadas de forma a fechar o balanço de potência do sistema).

2. Barra  $PV$  ou barra de geração:

- $P$  e  $V$  são conhecidos;
- $Q$  e  $\theta$  são variáveis do sistema.

3. Barra  $PQ$  ou barra de carga:

- $P$  e  $Q$  são conhecidos;
- $V$  e  $\theta$  são variáveis do sistema.

A barra  $V\theta$ , na formulação básica do problema de FC, apresenta duas funções: fornece a referência angular para todas as outras barras do sistema (normalmente defini-se o ângulo da barra *slack* como sendo  $0^\circ$ ) e fecha o balanço de potência do sistema levando em conta as perdas na transmissão (MONTICELLI, 1983).

Nos bancos de dados que caracterizam os sistemas de transmissão de energia elétrica, a notação para diferenciar os 3 tipos de barras é dada da seguinte forma: barra *slack* ( $V\theta$ ) é denominada do tipo 3; barras de geração ( $PV$ ) são denominadas do tipo 2 e as barras de carga ( $PQ$ ) são denominadas do tipo 0 (JR et al., 1973).

Visto que cada barra do sistema apresenta dois parâmetros e duas variáveis associadas, para que o sistema de equações algébricas não-lineares se torne possível e determinado, cada barra deve apresentar duas equações. Para a formulação básica do problema de FC, essas são representadas pelas equações de injeção de potência ativa e reativa nas barras do sistema. Através da Primeira Lei de Kirchhoff, é possível igualar a injeção de potência ativa e reativa em uma barra com a soma dos fluxos de potência que entram e deixam a barra (MONTICELLI, 1983). Isso é matematicamente expresso por:

$$P_{Gk} - P_{Lk} = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}), \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.1)$$

$$Q_{Gk} + Q_k^{sh}(V_k, b_k^{sh}) - Q_{Lk} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}), \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.2)$$

em que:

- $k \in \mathcal{K}$ , onde  $\mathcal{K}$  é o conjunto de todas as barras do sistema;
- $\Omega_k$  é o conjunto de todas as barras do sistema adjacentes a barra  $k$ ;

- $V_k$  e  $V_m$  são, respectivamente, a tensão na barra  $k$  e a tensão na barra  $m$ ;
- $\theta_k$  e  $\theta_m$  são, respectivamente, os ângulos das barras  $k$  e  $m$  em relação à barra *slack*;
- $P_{Gk}$  é a geração de potência ativa na barra  $k$ ;
- $P_{Lk}$  é a potência ativa consumida na barra  $k$ ;
- $Q_{Gk}$  é a geração de potência reativa na barra  $k$ ;
- $Q_{Lk}$  é a potência reativa consumida na barra  $k$ ;
- $Q_k^{sh}$  é a injeção de potência reativa na barra  $k$  devido a uma susceptância shunt associada a essa barra. Seu valor é dado a partir da equação (3.3), em que  $b_k^{sh}$  é a susceptância *shunt* associada a barra  $k$  (MONTICELLI, 1983);

$$Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2 \quad (3.3)$$

- $P_{km}$  é o fluxo de potência ativa no ramo  $k-m$ ;
- $Q_{km}$  é o fluxo de potência reativa no ramo  $k-m$ ;
- caso exista um transformador em-fase no ramo  $k-m$ ,  $t_{km}$  é o *tap* desse transformador;
- caso exista um transformador defasador no ramo  $k-m$ ,  $\phi_{km}$  é a componente defasadora desse transformador.

As equações (3.1) e (3.2) são denominadas equação de balanço de potência ativa e reativa, respectivamente.

Além das equações de igualdade que representam o balanço de potência nas barras do sistema, há também as inequações que representam as restrições operacionais/segurança do sistema. O conjunto de restrições operacionais é representado por:

- Restrição de magnitude da tensão nodal:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max}, \forall V_k \in \mathcal{C} \quad (3.4)$$

em que  $V_k^{min}$  e  $V_k^{max}$  são, respectivamente, o limite inferior e superior de tensão na barra  $k$  e  $\mathcal{C}$  é o conjunto de todas as barras de carga do sistema.

- Restrição de geração de potência reativa na barra k:

$$Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max}, \forall Q_k \in \mathcal{G} \quad (3.5)$$

em que  $Q_k^{\min}$  e  $Q_k^{\max}$  são, respectivamente, o limite inferior e superior de geração de potência reativa na barra k e  $\mathcal{G}$  é o conjunto de todas as barras de geração do sistema.

- Restrição da magnitude dos *taps*:

$$t_{km}^{\min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{\max}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.6)$$

em que  $t_{km}^{\min}$  e  $t_{km}^{\max}$  são, respectivamente, o limite inferior e superior da magnitude do *tap* no ramo k-m e  $\mathcal{T}$  é o conjunto de todos os *taps* controláveis do sistema.

Por fim, com o objetivo de simplificar a notação, utiliza-se  $P_k = P_{Gk} - P_{Lk}$  e  $Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}$  para referir-se a injeção (geração menos carga) de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra k.

### 3.1.2 Formulação do problema de Fluxo de Carga com barra slack distribuída

Na formulação básica do problema de FC, a barra *slack* fecha o balanço de potência ativa do sistema e supre, sozinha, as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão. Em sistemas reais, a alocação de perdas ativas na transmissão é geralmente distribuída entre os geradores, cada um com seu fator de participação na alocação das perdas. Dessa forma, acrescenta-se uma variável associada ao sistema elétrico, denominada  $K_G$ .

Assim, a barra de referência angular deixa de ser uma barra  $V\theta$  e passa a ser uma barra do tipo  $PV\theta$ , em que P agora é um parâmetro da barra *slack*, definido inicialmente de forma a fechar o balanço de potência entre geração e demanda (desconsiderando perdas ativas na transmissão).

Portanto, a equação de balanço de potência ativa representada por (3.1) na formulação básica é substituída por (3.17):

$$P_{Gk}(1 + K_G) - P_{Lk} = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}), \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.7)$$

A equação de balanço de potência reativa não é alterada na formulação do problema de FC com barra *slack* distribuída.

### 3.1.3 Expressões gerais para o Fluxo de Carga

As expressões gerais do fluxo de potência ativa e reativa em um ramo k-m de um sistema de transmissão de energia elétrica são encontradas a partir do modelo genérico de um circuito de transmissão (Figura 3.1), através da análise desse sistema pelas leis de Kirchhoff.

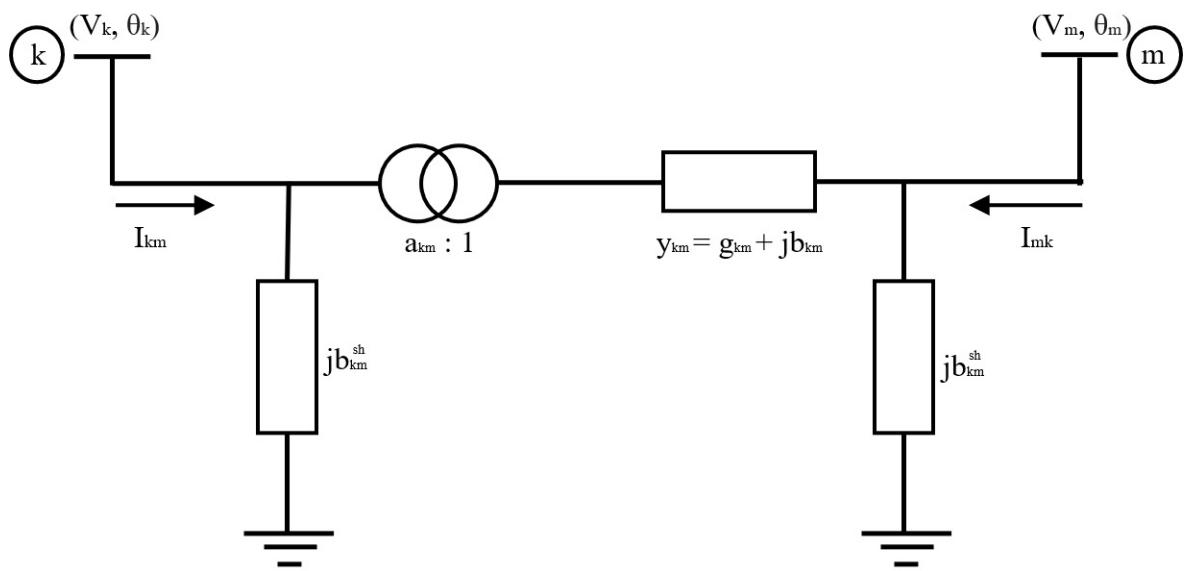


Figura 3.1: Circuito ramos de transmissão genéricos (linhas de transmissão, transformadores em-fase e transformadores defasadores) conectando as barras  $k$  e  $m$ .

A Figura 3.1 ilustra um ramo k-m de um sistema de transmissão genérico que, dependendo dos valores dos parâmetros  $y_{km}$  (admitância de linha),  $a_{km}$  (*tap* do transformador) e  $b_{km}^{sh}$  (susceptância de linha), pode representar uma linha de transmissão, um transformador em fase e um transformador defasador puro (MONTICELLI, 1983).

Note que, para quando o circuito da Figura 3.1 representa um transformador, sua expressão é dada pela equação (3.8), em que  $t_{km}$  representa a componente em-fase do transformador e  $\phi_{km}$  representa a componente defasadora.

$$a_{km} = t_{km}e^{j\phi_{km}} \quad (3.8)$$

A distinção entre os tipos de conexão presente entre as barras  $k$  e  $m$  do ramo de transmissão ocorre segundo os seguintes preceitos:

- Para uma linha de transmissão,  $t_{km} = 1$  e  $\phi_{km} = 0$ ;
- Para um transformador em fase,  $b_{km}^{sh} = 0$  e  $\phi_{km} = 0$ ;
- Para um transformador defasador puro,  $b_{km}^{sh} = 0$  e  $t_{km} = 1$ .

Em (MONTICELLI, 1983), as equações do fluxo de potência são encontradas tanto de forma algébrica quanto em sua forma matricial. Entretanto, o tap do transformador é considerado como sendo  $1 : a_{km}$ , ao contrário do que é fornecido nos bancos de dados (JR et al., 1973). Além disso, trabalhar com as equações na forma matricial pode não ser vantajoso caso o *tap* dos transformadores seja uma variável de controle do sistema, visto que as equações na forma matricial (fornecidas em (MONTICELLI, 1983)) incluem os *taps* de forma implícita nas equações de balanço de potência e demandam a constante atualização da matriz admintância nodal do sistema.

Por fim, as equações demonstradas em (MONTICELLI, 1983) não diferenciam a barra  $k$  como sendo a barra conectada diretamente ao transformador (denominada “barra do *tap*”) ou como sendo conectada à admitância  $y_{km}$  (denominada “barra da impedância”), como feito em (LAGE, 2013).

O conjunto de equações que caracterizam o fluxo de potência ativa e reativa em um ramo  $k-m$  é representado pelas equações 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, em que 3.9 e 3.10 representam as equações do fluxo de potência caso a barra  $k$  seja a barra do transformador, e 3.11 e 3.12 caso a barra  $k$  seja a barra da impedância. Além disso,  $g_{km}$  corresponde a parte real da admitância de linha e  $b_{km}$  a parte complexa da admitância de linha (LAGE, 2013). Por fim, a notação  $\theta_{km}$  é uma simplificação para a subtração dos termos  $\theta_k$  e  $\theta_m$ .

$$P_{km} = g_{km} \frac{1}{t_{km}^2} V_k^2 - \frac{1}{t_{km}} V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} - \phi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} - \phi_{km})] \quad (3.9)$$

$$Q_{km} = - \left( b_{km} \frac{1}{t_{km}^2} + b_{km}^{sh} \right) V_k^2 + \frac{1}{t_{km}} V_k V_m [b_{km} \cos(\theta_{km} - \phi_{km}) - g_{km} \sin(\theta_{km} - \phi_{km})] \quad (3.10)$$

$$P_{km} = g_{km} V_k^2 - \frac{1}{t_{km}} V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km})] \quad (3.11)$$

$$Q_{km} = -b_{km} V_k^2 + \frac{1}{t_{km}} V_k V_m [b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - g_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km})] \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Resolução do Problema de Fluxo de Carga - Formulação Básica

Foi visto que, com o estado do sistema ( $V$  e  $\theta$  de todas as barras), é possível encontrar todas as outras grandezas de interesse (MONTICELLI, 1983). Dessa forma, o sistema de equações não-lineares representados por (3.1) e (3.2) são separados em dois subsistemas: o primeiro apenas para encontrar o estado do sistema, e o segundo para encontrar as restantes grandezas de interesse.

Os dois subsistemas são representados da seguinte maneira:

- Subsistema 1:

No primeiro subproblema, são fornecidos os valores de injeção (geração menos carga) de potência ativa e reativa para todas as barras do tipo  $PQ$  e a injeção de potência ativa para todas as barras do tipo  $PV$ . Seja  $n_{PQ}$  o número de barras do tipo  $PQ$  e  $n_{PV}$  o número de barras do tipo  $PV$ . Dessa forma, a dimensão do primeiro subsistema, de acordo com as equações (3.1) e (3.2) será  $2n_{PQ} + n_{PV}$  em que as incógnitas são os ângulos  $\theta$  das barras  $PQ$  e  $PV$  e as magnitudes de tensão das barras  $PQ$ .

O primeiro subsistema pode ser matematicamente expresso por:

$$P_k - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{K}' \quad (3.13)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{L} \quad (3.14)$$

em que  $\mathcal{K}'$  é o conjunto de todas as barras do sistema exceto a barra *slack* e  $\mathcal{L}$  é o conjunto de todas as barras  $PQ$  do sistema.

- Subsistema 2:

Após encontrado o estado do sistema (Subsistema 1), as únicas variáveis que ainda não foram determinadas são a injeção de potência ativa e reativa na barra *slack* e as injeções de potência reativa nas barras do tipo  $PV$ . Dessa forma, a dimensão do segundo subsistema é  $2n_{V\theta} + n_{PV}$ , em que  $n_{V\theta}$  é o número de barras do tipo  $V\theta$  no sistema (normalmente tem-sé  $n_{V\theta} = 1$ ).

O segundo subsistema pode ser matematicamente expresso por:

$$P_k - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{V}\theta \quad (3.15)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{G} \quad (3.16)$$

em que  $\mathcal{V}\theta$  é o conjunto de todas as barras do tipo  $V\theta$  do sistema e  $\mathcal{G}$  é o conjunto de todas as barras de geração do sistema ( $V\theta$  e  $PV$ ).

Note que as variáveis do primeiro subsistema são encontradas de forma implícita, o que não ocorre no segundo subsistema. Dessa forma, para encontrar o estado do sistema é necessário fazer o uso de métodos iterativos, tais como o método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983), (TINNEY; HART, 1967) e o desacoplado rápido (STOTT, 1972). Como tais métodos são numéricos, a resolução do subsistema 1 é alcançada quando o erro das equações de balanço for menor do que a tolerância desejada.

### 3.1.5 Resolução do Problema de Fluxo de Carga - Formulação com Barra Slack Distribuída

A resolução do problema de FC com barra *slack* distribuída também é dividida em dois subsistemas. Entretanto, como há a adição de uma nova variável ( $K_G$ ), além da mudança da equação de balanço de potência ativa (3.17), ambos subsistemas são alterados, sendo representados da seguinte maneira:

- Subsistema 1:

No primeiro subproblema, são fornecidos os valores de injeção (geração menos carga) de potência ativa para todas as barras do sistema (visto que a barra *slack* se tornou uma barra do tipo  $PV\theta$ ) e a injeção de potência reativa para todas as barras do tipo  $PQ$ . Seja  $n_B$  o número de barras do sistema. Dessa forma, a dimensão do primeiro subsistema, de acordo com as equações, é  $n_B + n_{PQ}$ .

O primeiro subsistema pode ser matematicamente expresso por:

$$P_{Gk}(1 + K_G) - P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.17)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{L} \quad (3.18)$$

Note que as equações que representam o balanço de potência reativa não foram alteradas (equações 3.2 e 3.18). Além disso, o primeiro subsistema determina tanto o estado do sistema quanto o valor da variável  $K_G$ , que é encontrada a partir da inserção da equação de balanço de potência ativa na barra *slack*.

- Subsistema 2:

Após encontrado o estado do sistema (Subsistema 1), as únicas variáveis que ainda não foram determinadas são as injeções de potência reativa nas barras de geração. Dessa forma, a dimensão desse subsistema é  $n_{V\theta} + n_{PV}$ , e é representado matematicamente por:

$$Q_k + Q_k^{sh} - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \forall k \in \mathcal{G} \quad (3.19)$$

Da mesma forma que na resolução do problema básico de FC, o Subsistema 1 do problema de FC com barra *slack* distribuída apresenta as variáveis implícitas nas equações de balanço, o que exige a resolução desse subproblema por um método numérico, em que a solução é alcançada quando o erro das equações de balanço for menor do que a tolerância desejada.

## 3.2 Fluxo de Carga Continuado

O Fluxo de Carga Continuado (FCC) é um algoritmo baseado em sucessivas soluções do sistema de equações do FC, reformulado para incluir o parâmetro de carregamento  $\sigma$ . Com o acréscimo de uma nova variável, as equações do FC são resolvidas de forma parametrizada em função do aumento do parâmetro de carregamento ( $\sigma$ ) (AJJA-RAPU; CHRISTY, 1992). O conjunto de curvas obtido através do FCC é denominado curva PV, visto que caracteriza o comportamento da tensão das barras do sistema conforme há uma variação na injeção de potência.

Dessa forma, é possível encontrar o ponto de máximo carregamento ( $\sigma_c$ ), o que caracteriza o ponto de colapso de tensão. Nesse ponto, as soluções de alta e baixa tensão apresentam o mesmo conjunto de valores, o que é representado matematicamente por

uma bifurcação. A partir desse ponto, o conjunto de equações do FC não apresenta mais soluções.

A vantagem de se utilizar o FCC em relação a métodos diretos (métodos de otimização) como forma de encontrar o ponto de máximo carregamento é obter informações adicionais à respeito das variáveis do sistema conforme são obtidas as soluções do FCC, que podem ser utilizadas para a predição do ponto de colapso do sistema. Tais informações abrangem a influência dos limites operacionais do sistema nos pontos de equilíbrio estáveis das soluções do FC, e o tipo de bifurcação que ocasionou o colapso do sistema.

### 3.2.1 Análise de Bifurcações

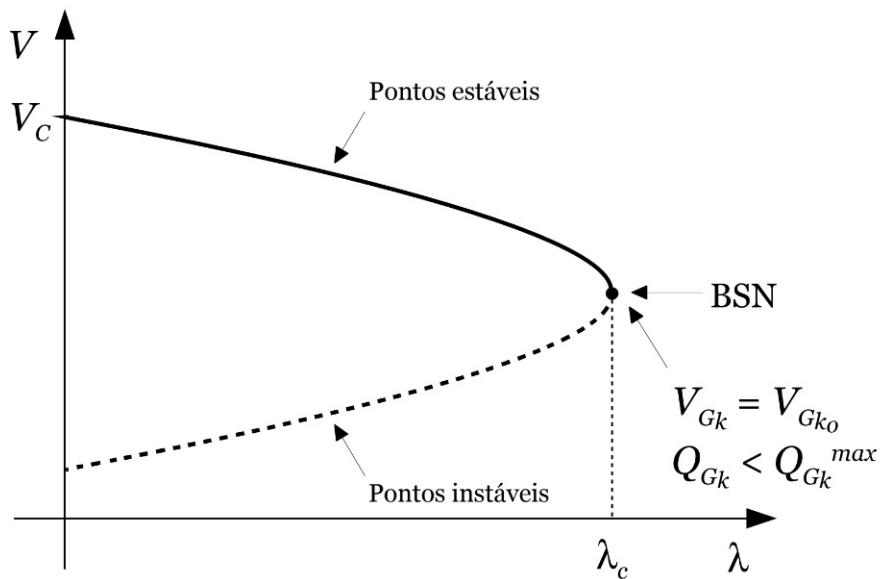
A teoria das bifurcações fornece informações quantitativas e qualitativas referente às mudanças de comportamento do conjunto de solução de uma equação ou sistemas de equações conforme um parâmetro  $\sigma$  (denominado parâmetro de bifurcação) é variado. As mudanças no comportamento do conjunto de solução do sistema de equações é normalmente contínua. Dessa forma, quando há uma mudança descontínua de comportamento, esse ponto é caracterizado como um ponto de bifurcação (JORDAN; SMITH; SMITH, 2007).

Em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), como o parâmetro  $\sigma$  varia de maneira discreta, as bifurcações podem ser determinadas a partir de uma mudança na estrutura da matriz Jacobiana associada ao conjunto de equações de balanço do sistema ou com o desaparecimento de soluções para esse conjunto de equações (caracterizando o ponto de máximo carregamento  $\sigma^c$ ). Tais bifurcações podem ser caracterizadas em duas principais categorias:

- Bifurcação sela-nó (*BSN*):

Esse tipo de bifurcação ocorre quando dois pontos de equilíbrio do sistema se “fundem” para um determinado valor do parâmetro  $\sigma$  (denominado  $\sigma^c$ ). Matematicamente, um ponto em que ocorre a *BSN* é caracterizado pela singularidade da matriz Jacobiana associada ao sistema (CAÑIZARES, 1995). A partir desse ponto, o sistema não apresentará mais solução para valores de  $\sigma$  superiores  $\sigma^c$ .

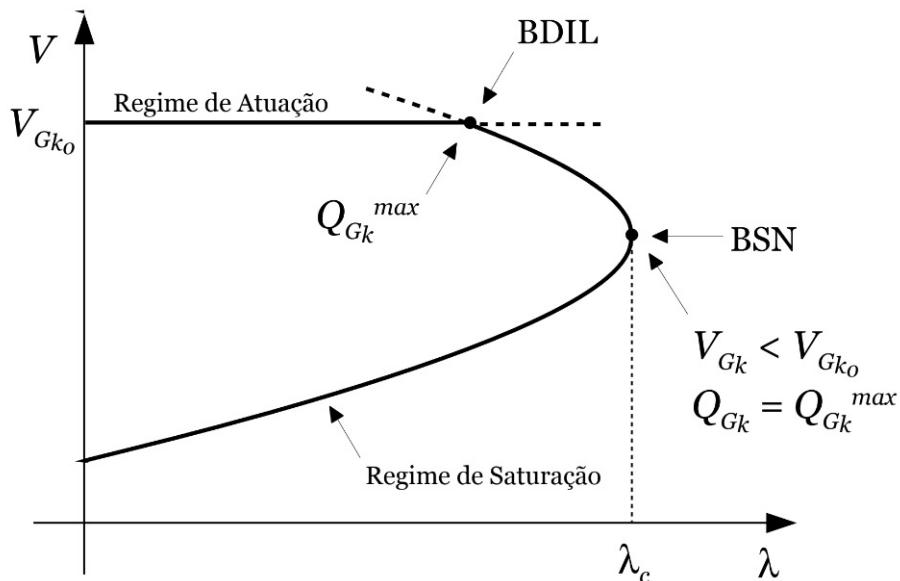
Em SEP, essa bifurcação caracteriza o ponto de colapso do sistema, visto que ele atingiu seu ponto de máximo carregamento. A Figura 3.2 representa as curvas PV de um sistema em que ocorre uma *BSN*. Note que os pontos que representam as soluções de alta e baixa tensão se “fundem”. Além disso, esse ponto representa uma solução que está dentro dos limites operacionais do sistema, visto que os limites de geração de potência reativa ainda não foram atingidos ( $Q_{Gk} < Q_{Gk}^{max}$ ).

Figura 3.2: Curva  $PV$  de um sistema com  $BSN$ 

- Bifurcação Induzida por Limites ( $BIL$ ):

As BIL são bifurcações que ocorrem quando alguma variável do sistema atinge o seu limite (inferior ou superior), ocasionando uma mudança no sistema de equações e, consequentemente, na estrutura da matriz Jacobiana. As BIL se dividem em dois grupos: as dinâmicas (BDIL) e as estáticas (BEIL).

No caso das BDIL, o sistema continua apresentando uma solução mesmo para um valor de  $\sigma$  superior ao que ocasionou a bifurcação, como é ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Curva  $PV$  de um sistema com  $BDIL$  e  $BSN$

Note que, na Figura 3.3, para um determinado valor do parâmetro de carregamento, a barra  $k$  atingiu o seu limite máximo de geração de potência reativa ( $Q_{Gk}^{max}$ ), ocasionando a diminuição da magnitude de tensão da barra  $k$  pela insuficiência de suporte de reativos (MONTICELLI, 1983). Entretanto, apesar de uma das barras ter atingido o seu limite operacional, o sistema ainda apresenta soluções estáveis para um valor de carregamento superior ao que ocasionou a BDIL. Por fim, o sistema representado pela Figura 3.3 entrou em colapso devido a uma BSN.

Já a BEIL é similar a BSN pois, em ambas, os pontos de equilíbrio estáveis de dois conjuntos diferentes de soluções se “fundem” para um determinado valor do parâmetro  $\sigma^c$ , deixando de existir solução para valores de  $\sigma$  superiores a  $\sigma^c$  (no caso de SEP, os valores que se fundem são as soluções de alta e baixa tensão). Dessa forma, as BDIL são associadas a mudanças “dinâmicas” do sistema, enquanto as BSN e BEIL estão associadas ao ponto de máximo carregamento do SEP.

Além disso, a BEIL surgem de maneira similar as BDIL: quando alguma variável do problema atinge seu limite (superior ou inferior) para um determinado valor de  $\sigma$  (Figura 3.4).

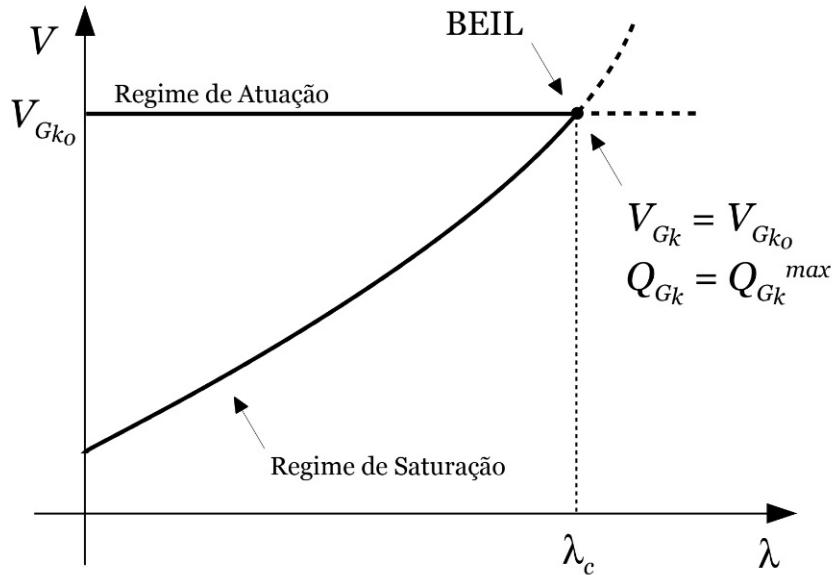


Figura 3.4: Curva  $PV$  de um sistema com *BEIL*

É importante notar que as bifurcações do tipo BDIL e BEIL alteram a estrutura da matriz Jacobiana associada ao sistema mas não as tornam singular. Assim, caso um sistema tenha seu ponto de máximo carregamento caracterizado por uma BEIL, diferentemente da BSN, esse ponto não apresentará uma matriz Jacobiana com determinante nulo.

Por fim, há também o caso em que um sistema apresenta tanto a BDIL quanto a BEIL. Nesses casos, algumas variáveis atingem o seu limite operacional mas não ocasionam o colapso do sistema, e alguma atinge o limite e caracteriza o ponto de máximo carregamento (Figura 3.5).

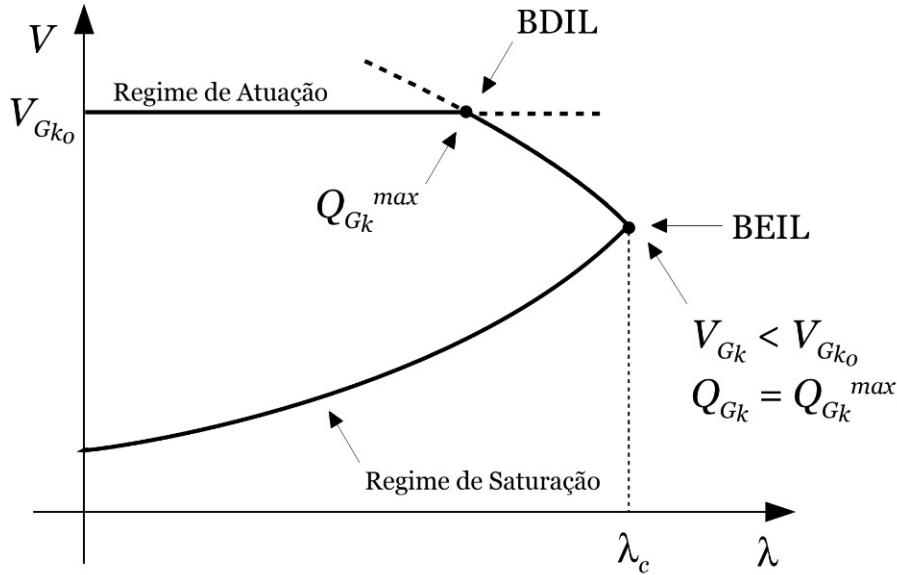


Figura 3.5: Curva  $PV$  de um sistema com *BDIL* e *BEIL*

### 3.2.2 Equacionamento do Problema de Fluxo de Carga Contínuo

Com a adição do parâmetro de carregamento  $\sigma$ , as equações de balanço de potência ativa e reativa do problema de FC podem ser reescritas, considerando a abordagem com a barra *slack* distribuída, como (3.20) e (3.21), respectivamente, sujeitas as restrições de desigualdades (3.4), (3.5) e (3.6).

$$P_{Gk}(\sigma + K_G) - P_{Lk}(\sigma) - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.20)$$

$$Q_{Gk} + Q_k^{sh} - Q_{Lk}(\sigma) - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m, t_{km}, \phi_{km}) = 0, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.21)$$

Note que, nas equações 3.20 e 3.21, o parâmetro de carregamento  $\sigma$  corresponde ao porcentual de carregamento adicionado ao sistema. Se  $\sigma = 2$ , por exemplo, a carga do sistema aumentou 100%. De maneira análoga, se  $\sigma = 1$ , o sistema não está carregado. Denomina-se esse caso especial como caso base.

Além disso, nas equações 3.20 e 3.21, as componentes associadas ao parâmetro de carregamento  $\sigma$  variam todas na mesma proporção, visto que  $\sigma$  é um parâmetro associado ao sistema. Em alguns problemas envolvendo mercado de energia elétrica (leilões de energia elétrica, por exemplo), é necessário que a potência gerada e consumida aumente de maneira diferente em cada barra do sistema, e não de maneira linear. Dessa forma, é possível reescrever as equações de balanço do problema de FCC incluindo os parâmetros de “direção de aumento”, que indicam como será a proporção de carregamento entre as barras do sistema.

As equações de balanço do problema de FCC podem ser reescritas como (3.22) e (3.23), a fim de incluir os parâmetros de direção de aumento.

$$\Delta P_k(P_S, P_D, \sigma, K_G, \theta, V) = (\sigma + K_G)(P_{Gk} + P_{Sk}) - \sigma(P_{Lk} + P_{Dk}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} P_{km}(\theta, V), \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.22)$$

$$\Delta Q_k(P_D, \sigma, Q_G, \theta, V) = Q_{Gk} - \sigma(Q_{Lk} + K_{Lk}P_{Dk}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} Q_{km}(\theta, V), \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.23)$$

Em (3.22) e (3.23), os parâmetros  $P_{Sk}$  e  $P_{Dk}$  são ambos vetores de dimensão  $n_B$  e representam as direções de aumento de geração e carga, respectivamente. Além disso, na equação 3.23, o parâmetro  $K_{Lk}$  é responsável por modelar o aumento de carga com fator de potência constante, e é calculado por:

$$K_{Lk} = \tan \left( \cos^{-1} \frac{P_{Lk}}{\sqrt{P_{Lk}^2 + Q_{Lk}^2}} \right) \quad (3.24)$$

### 3.2.3 Resolução do Problema de Fluxo de Carga Continuado

O problema de FCC é resolvido de maneira parametrizada de acordo com a variação do parâmetro de carregamento  $\sigma$ . O algoritmo de resolução desse problema é descrito como:

1. Adote  $\sigma^0 = 1$  e resolva o FC (caso base  $n = 0$ );
2. Atualize o valor de  $\sigma^{n+1} = \sigma^n + \epsilon$ , sendo  $\epsilon$  o seu passo de carregamento;
3. Resolva o FC para  $\sigma^{n+1}$ . Se o FC apresentar solução, tome  $\sigma^n = \sigma^{n+1}$  e volte para 2.
4. Se o FC não apresentar solução, vá para 4;

4. Diminua o valor do passo de carregamento  $\epsilon$  e volte para 2. Se a precisão de  $\sigma$  já estiver dentro da tolerância desejada, o problema de FCC foi resolvido e o ponto de máximo carregamento foi encontrado ( $\sigma^c$ ).

### 3.3 Elo de Corrente Contínua

O elo de corrente contínua (ou *link CC*) pode ser apropriadamente representado pelo circuito ilustrado na Figura 3.6, em que os subscritos  $r$  e  $i$  representam, respectivamente, retificador e inversor. Já o subscrito  $d$  é utilizado para diferenciar a magnitude de tensão do lado *CA* e *CC* do sistema (sendo  $d$  utilizado para referenciar o lado *CC*) (KUNDUR, 2007), (FILHO, 2000).

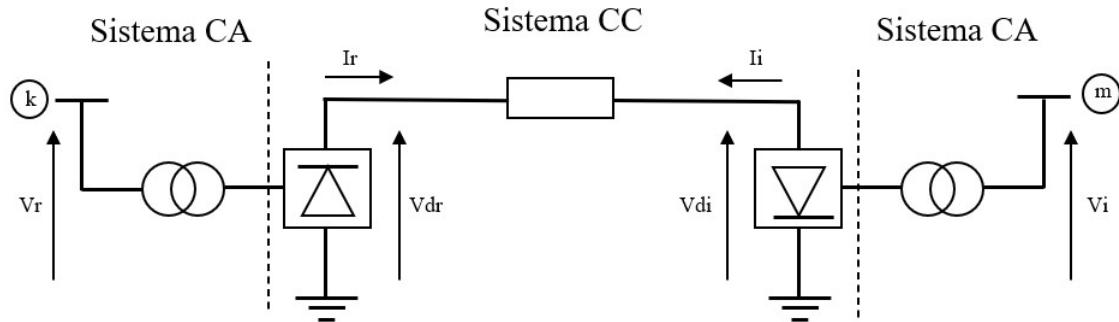


Figura 3.6: Elo de Corrente Contínua (*link CC*)

A representação e modelagem do *link CC* será feita baseada nas seguintes suposições:

- Indutância do lado *CC* é muito elevada ( $L_d \rightarrow \infty$ ), implicando na não existência de ondulação (*ripple nulo*) nas correntes *CC* ( $I_r$  e  $I_i$ );
- Todos os componentes são ideais. Os tiristores utilizados nos conversores *CA – CC* e *CC – CA* apresentam resistência nula (não há queda de tensão quando estão no período de condução), não saturam e não apresentam falha na comutação;
- As características dos sistemas *AC* são ideais, apresentando frequência constante e uma onda perfeitamente senoidal em ambos os lados do elo *CC* (retificador e inversor). Além disso, o sistema não sofre com a propagação de harmônicas devido ao processo de comutação.

#### 3.3.1 Modelagem matemática do Elo de Corrente Contínua

O módulo básico de um conversor trifásico equilibrado *CA – CC* pode ser convenientemente ilustrado pelo modelo equivalente da Figura 3.7.

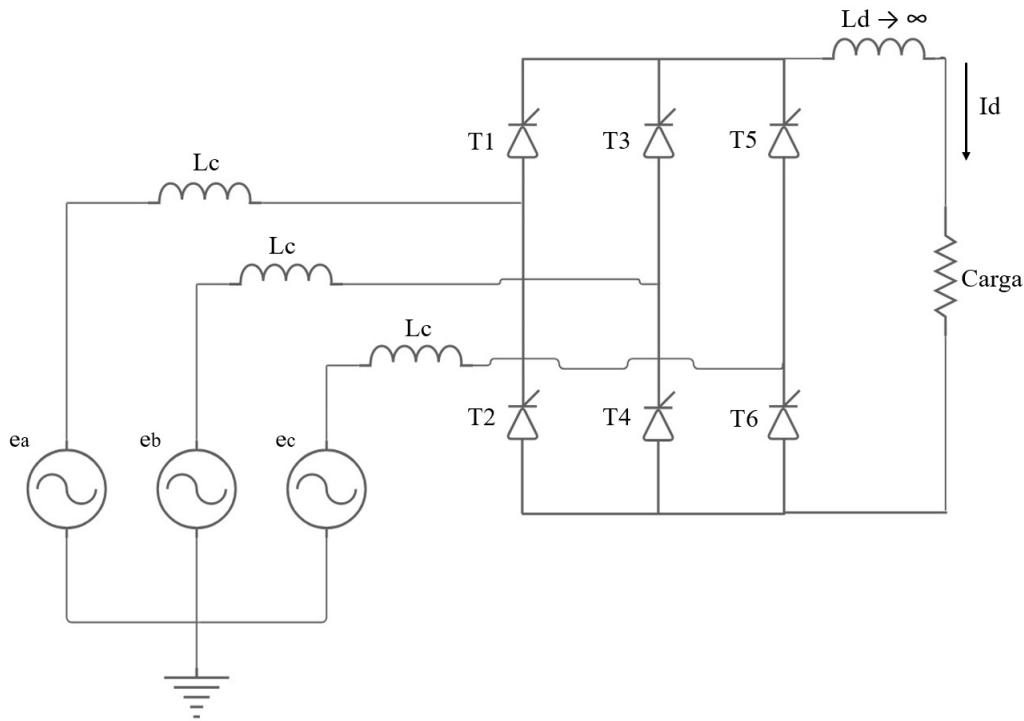


Figura 3.7: Conversor CA – CC

Na Figura 3.7, as tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são tons cossenoidais de magnitude  $E_m$ , defasadas entre si  $120^\circ$ . Os componentes  $T1, T2, \dots, T6$  são tiristores que possuem todos o mesmo ângulo de disparo, denotado por  $\alpha$ , que corresponde ao atraso para a condução dos componentes. O tempo de atraso é dado pela fração  $\frac{\alpha}{\omega}$ , em que  $\omega$  é a frequência angular do sistema.

Por fim, devido a indutância do lado CA ( $L_c$ ), quando há a troca de condução por parte dos tiristores, a corrente de fase não consegue mudar instantaneamente, requerendo um tempo finito chamado de tempo de comutação ou *overlap time*. O ângulo correspondente a esse fenômeno é denominado ângulo de comutação e é representado por  $\mu$ .

A partir desse modelo, as seguintes relações de tensão são encontradas (KUNDUR, 2007):

- Tensões instantâneas *fase – neutro*:

$$e_a = E_m \cos(\omega t + 60^\circ) \quad (3.25)$$

$$e_b = E_m \cos(\omega t - 60^\circ) \quad (3.26)$$

$$e_c = E_m \cos(\omega t - 180^\circ) \quad (3.27)$$

- Tensões instantâneas *fase – fase*:

$$e_{ac} = e_a - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30^\circ) \quad (3.28)$$

$$e_{ba} = e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (3.29)$$

$$e_{cb} = e_c - e_b = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150^\circ) \quad (3.30)$$

A análise do conversor *CA – CC* pode ser dividida em três casos: ângulo de disparo dos tiristores ( $\alpha$ ) nulo e indutância  $L_c$  nula, ângulo de disparo dos tiristores ( $\alpha$ ) não-nulo e indutância  $L_c$  nula e o caso em que tanto  $\alpha$  quanto  $L_c$  são não-nulos.

### 1º caso: Ângulo de disparo nulo e indutância do lado CA nula

A partir da Figura 3.7, é possível observar que os catodos dos tiristores 1, 3 e 5 estão conectados. Assim, se a tensão *fase – neutro*  $e_a$  é mais positiva que as outras duas tensões ( $e_b$  e  $e_c$ ), o tiristor 1 irá conduzir e, consequentemente, os tiristores 3 e 5 agirão como circuitos abertos.

De maneira análoga ocorre a análise dos tiristores 2, 4 e 6, que possuem os anodos conectados. Dessa forma, o tiristor 2 conduzirá quando a tensão  $e_c$  for mais negativa que  $e_a$  e  $e_b$ , e assim por diante.

A partir das equações 3.25, 3.26 e 3.27, é possível mapear o seguinte perfil de condução dos tiristores:

- $T1$  conduz quando  $-120^\circ \leq \omega t \leq 0^\circ$ , visto que  $e_a > e_b$  e  $e_a > e_c$ ;
- $T2$  conduz quando  $-60^\circ \leq \omega t \leq 60^\circ$ , visto que  $e_c < e_a$  e  $e_c < e_b$ ;
- $T3$  conduz quando  $0^\circ \leq \omega t \leq 120^\circ$ , visto que  $e_b > e_a$  e  $e_b > e_c$ ;
- $T4$  conduz quando  $60^\circ \leq \omega t \leq 180^\circ$ , visto que  $e_a < e_c$  e  $e_a < e_b$ ;
- $T5$  conduz quando  $120^\circ \leq \omega t \leq 240^\circ$ , visto que  $e_c > e_b$  e  $e_c > e_a$ ;
- $T6$  conduz quando  $180^\circ \leq \omega t \leq 300^\circ$ , visto que  $e_b < e_c$  e  $e_b < e_a$ .

Como o circuito da Figura 3.7 apresenta 6 intervalos diferentes em que pares de tiristores conduzem dentro do período de  $2\pi$ , esse conversor é chamado também de conversor de 6 pulsos.

A característica das curvas de tensão para o conversor *CA – CC* é ilustrada na Figura 3.8 (KUNDUR, 2007).

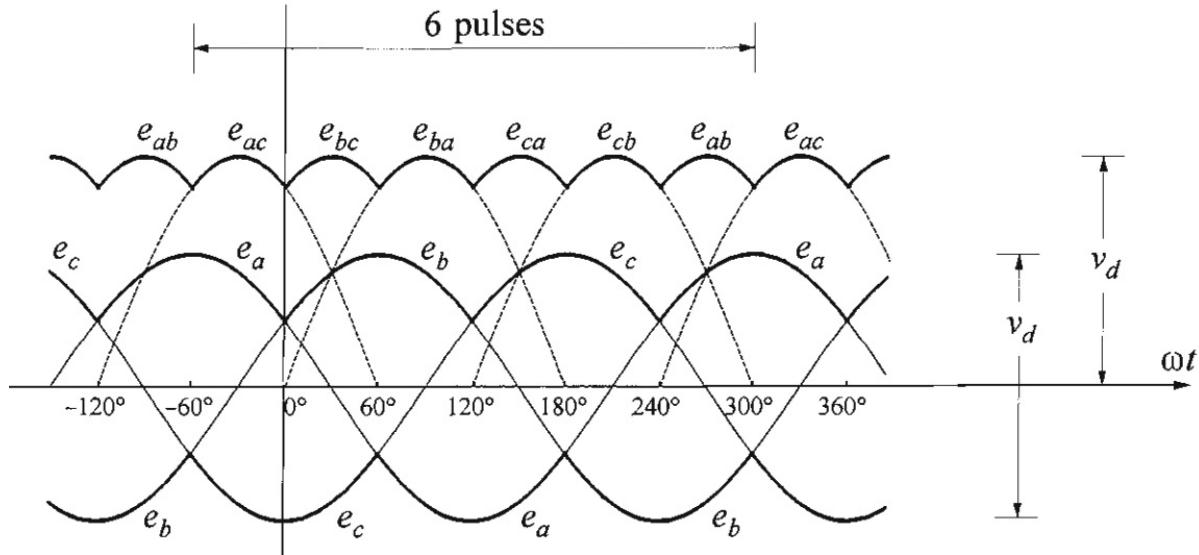


Figura 3.8: Tensões de *fase – neutro* e *fase – fase* para o conversor *CA – CC*

Note que a tensão instantânea na carga ( $V_d$ ) é composta por 6 segmentos com um período de  $60^\circ$  de tensões do tipo *fase – fase*. Dessa forma, a tensão média ( $\bar{V}_d$ ) pode ser encontrada integrando qualquer um dos 6 segmentos de tensão instantânea no intervalo de  $60^\circ$  (KUNDUR, 2007).

$$\bar{V}_d = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^{0^\circ} e_{ac} d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^{0^\circ} \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30^\circ) d\omega t$$

$$\bar{V}_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \quad (3.31)$$

Em termos das tensões *RMS* de *fase – neutro* ( $E_{FN}$ ) e *fase – fase* ( $E_{FF}$ ), a expressão (3.31) pode ser reescrita como (3.32) e (3.33), respectivamente.

$$\bar{V}_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{FN} \quad (3.32)$$

$$\overline{V_d} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{FF} \quad (3.33)$$

### 2º caso: Ângulo de disparo não-nulo e indutância do lado CA nula

Com a adição de um ângulo de disparo nos tiristores, a troca de condução entre os componentes será atrasada pelo fator  $\alpha$ . Por exemplo, o tiristor 4 que começava a conduzir em  $\omega t = 60^\circ$  começará o seu período de condução em  $\omega t = 60^\circ + \alpha$ , e assim por diante (KUNDUR, 2007).

A adição de um ângulo de disparo não-nulo altera a forma das curvas que caracterizam a tensão para o conversor *CA – CC*. A nova forma das curvas é ilustrada de acordo com a Figura 3.9 (KUNDUR, 2007).

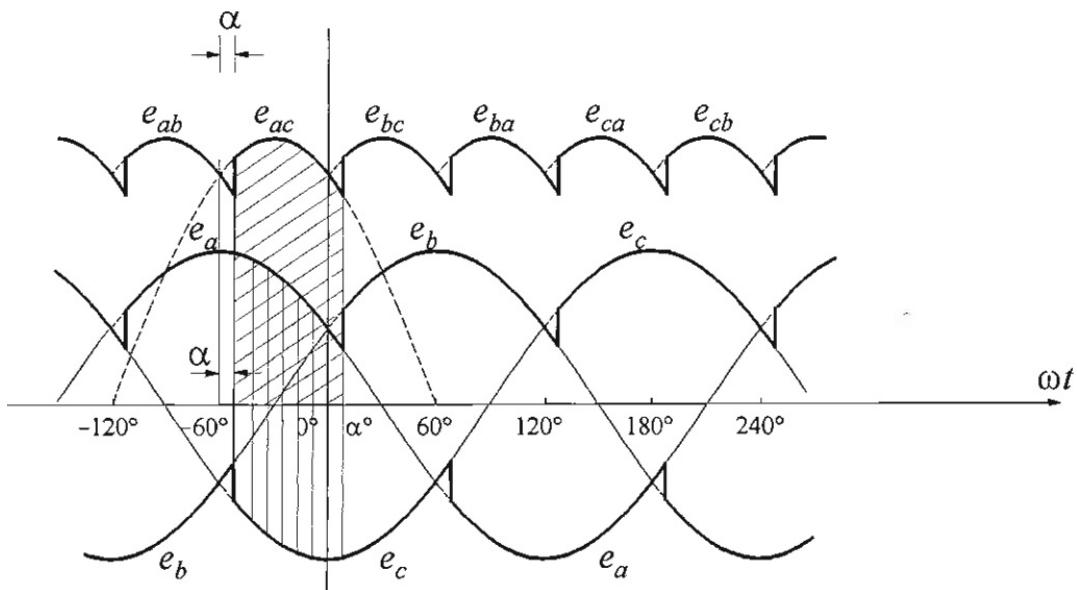


Figura 3.9: Tensões de *fase – neutro* e *fase – fase* para o conversor *CA – CC* com  $\alpha \neq 0^\circ$

Note, comparando a Figura 3.8 com a 3.9, que o ângulo de disparo  $\alpha$  deve ficar contido no intervalor  $[0^\circ, 180^\circ]$ , visto que se  $\alpha$  exceder esse limite, o tiristor falha em ativar. Além disso, se  $\alpha > 90^\circ$ , o conversor deixa de atuar como retificador e passa a atuar como inversor (KUNDUR, 2007).

A nova tensão média para o conversor com  $\alpha \neq 0^\circ$  ( $\overline{V_{d\alpha}}$ ) pode ser encontrada de maneira análoga a  $\overline{V_d}$ , alterando apenas o intervalo de integração:

$$\overline{V_{d\alpha}} = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ+\alpha}^{\alpha} e_{ac} d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ+\alpha}^{\alpha} \sqrt{3}E_m \cos(\omega t + 30^\circ) d\omega t$$

$$\overline{V_{d\alpha}} = \overline{V_d} \cos(\alpha) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos(\alpha) \quad (3.34)$$

Portanto, o efeito matemático da introdução do ângulo de disparo não-nulo é diminuir a tensão média  $CC$  pelo fator  $\cos(\alpha)$  (3.34) (KUNDUR, 2007).

### 3º caso: Ângulo de disparo não-nulo e indutância do lado CA não-nula

Em operação normal (sem a indutância  $L_c$  ou fora do período de comutação), apenas dois tiristores conduzem a cada período de  $60^\circ$  (Figura 3.10a) (KUNDUR, 2007). Entretanto, durante o tempo de comutação (*overlap time*), três tiristores conduzem ao mesmo tempo durante o período angular  $\mu$  (Figura 3.10b) (KUNDUR, 2007). Dessa forma, uma nova comutação ocorre a cada  $60^\circ$  e dura pelo período angular  $\mu$ .

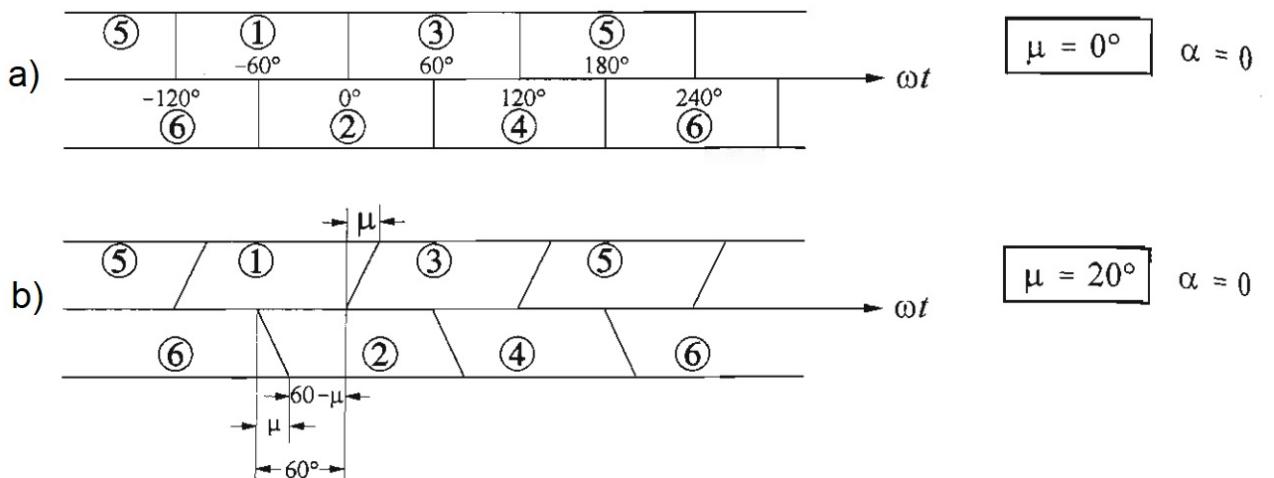


Figura 3.10: Efeito do ângulo de comutação  $\mu$  no período de condução dos tiristores

A adição do ângulo de disparo  $\alpha$  apenas desloca o conjunto  $\omega t$  pelo fator  $\alpha$ . Dessa forma, o período de condução dos tiristores ilustrado pela Figura 3.10a é substituído pela curva da Figura 3.11a (KUNDUR, 2007). Note que, durante o período de comutação  $\mu$ , a corrente na carga  $I_d$  requer um tempo finito para comutar entre a corrente que transita por  $T1$  e  $T3$ . Assim, durante esse período  $\mu$ , os transistores  $T1$ ,  $T2$  e  $T3$  conduzem simultaneamente (Figura 3.11b) (KUNDUR, 2007).

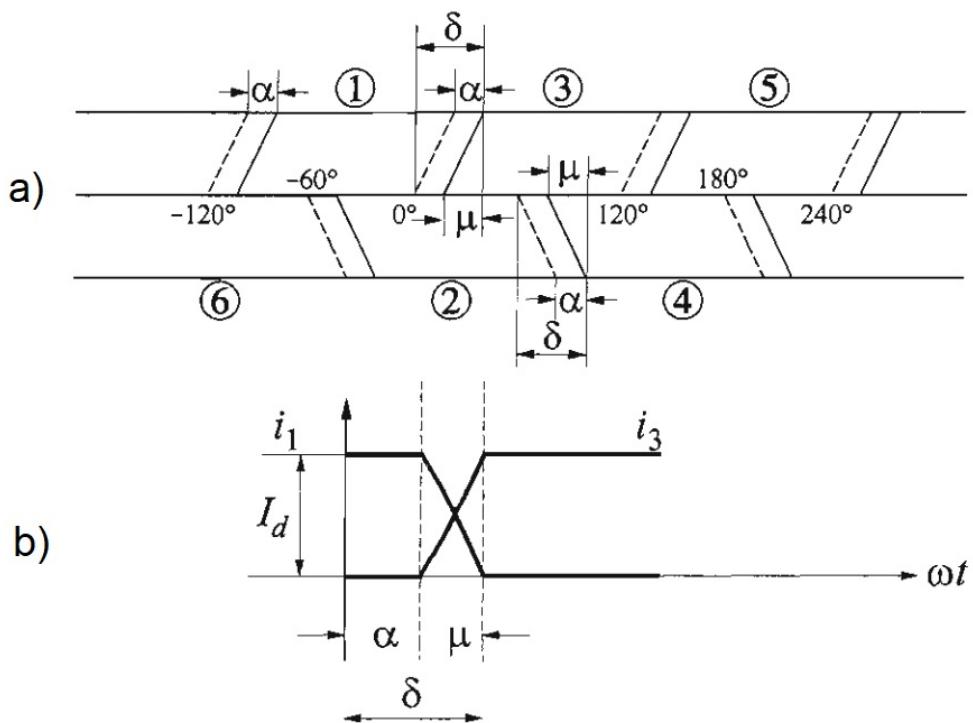


Figura 3.11: Efeito do ângulo de comutação  $\mu$  no período de condução de  $T_1, T_2$  e  $T_3$

Dessa forma, a comutação começa em  $\omega t = \alpha$  (atraso devido ao ângulo de disparo) e termina em  $\omega t = \alpha + \mu = \delta$ , em que  $\delta$  é chamado ângulo de extinção.

A adição da indutância não-nula  $L_c$  altera a forma das curvas que caracterizam a tensão para o conversor  $CA - CC$ . A nova forma das curvas é ilustrada na Figura 3.12 (KUNDUR, 2007).

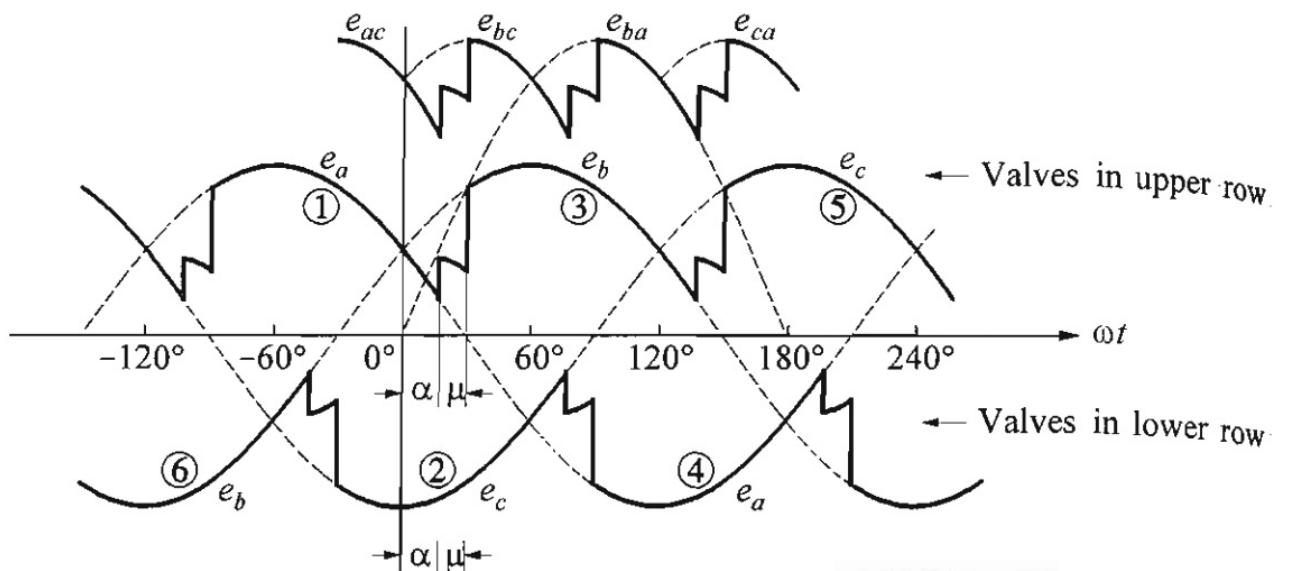


Figura 3.12: Tensões de fase - neutro e fase - fase para o conversor  $CA - CC$  com  $\alpha \neq 0^\circ$  e  $L_c \neq 0$

A partir da Figura 3.12 é possível notar que a adição do ângulo de comutação  $\mu$  diminui a tensão média na carga. Para explicitar o efeito matemático dessa adição, será feita a análise do circuito equivalente (Figura 3.13) (KUNDUR, 2007) do período de comutação entre os tiristores  $T1$  e  $T3$  através das leis de Kirchhoff.

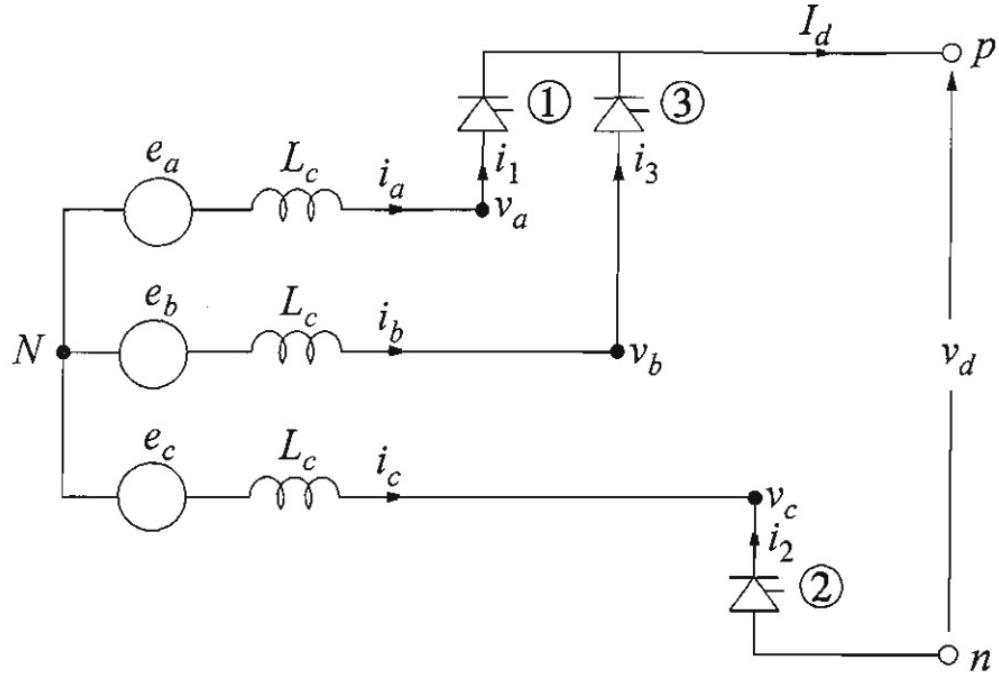


Figura 3.13: Circuito equivalente durante o período de comutação dos tiristores  $T1$  e  $T3$

- Corrente na carga devido ao ângulo de comutação

Durante o período de comutação  $[\alpha, \delta]$ , sabe-se que os tiristores  $T1$ ,  $T2$  e  $T3$  conduzem simultaneamente. Dessa forma, a tensão na carga pode ser expressa por (3.35).

$$e_{ba} = e_b - e_a = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (3.35)$$

Substituindo a relação (3.29) em (3.35) obtém-se:

$$e_b - e_a = \sqrt{3}E_m \cos(\omega t - 90^\circ) = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (3.36)$$

Como  $i_1 = I_d - i_3$ , a seguinte relação é válida:

$$\frac{di_1}{dt} = 0 - \frac{di_3}{dt} \quad (3.37)$$

Substituindo (3.37) em (3.36) obtém-se:

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c} \operatorname{sen}(\omega t) \quad (3.38)$$

Para resolver a *EDO* da equação 3.38, integra-se os dois lados da equação no tempo. Dessa forma, o limite inferior de integração corresponde ao início da comutação ( $t = \frac{\alpha}{\omega}$ ) e, por ora, o limite superior será dado por um instante genérico no tempo.

$$\int_0^{i_3} di_3 = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^t \operatorname{sen}(\omega t) dt \quad (3.39)$$

Por fim, a corrente  $i_3$  é escrita de forma explícita como:

$$i_3 = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (3.40)$$

Note que  $t \in [\frac{\alpha}{\omega}, \frac{\delta}{\omega}]$ . Além disso, no final da comutação,  $i_3 = I_d$ . Dessa forma, a corrente na carga ( $I_d$ ) pode ser escrita de maneira explícita de acordo com (3.41).

$$I_d = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.41)$$

- Tensão na carga devido ao ângulo de comutação

Durante o período de comutação, sabe-se que  $v_a = v_b$  (Figura 3.13). Dessa forma, têm-se:

$$v_a = v_b = e_b - L_c \frac{di_3}{dt} \quad (3.42)$$

Substituindo (3.36) em (3.42) encontra-se:

$$v_a = v_b = \frac{e_a + e_b}{2} \quad (3.43)$$

Dessa forma, ao invés da tensão na carga retornar para o valor da fonte ( $e_b$ ) após  $\omega t = \alpha$ , ela apresenta uma queda exponencial de tensão no intervalo  $\omega t \in [\alpha, \delta]$ , ilustrada na Figura 3.13 é explicitada pela expressão (3.43).

Portanto, para achar a queda de tensão média na carga é necessário subtrair a área  $A_\mu$ , ilustrada na Figura 3.14 (KUNDUR, 2007), da área  $A_0$ .

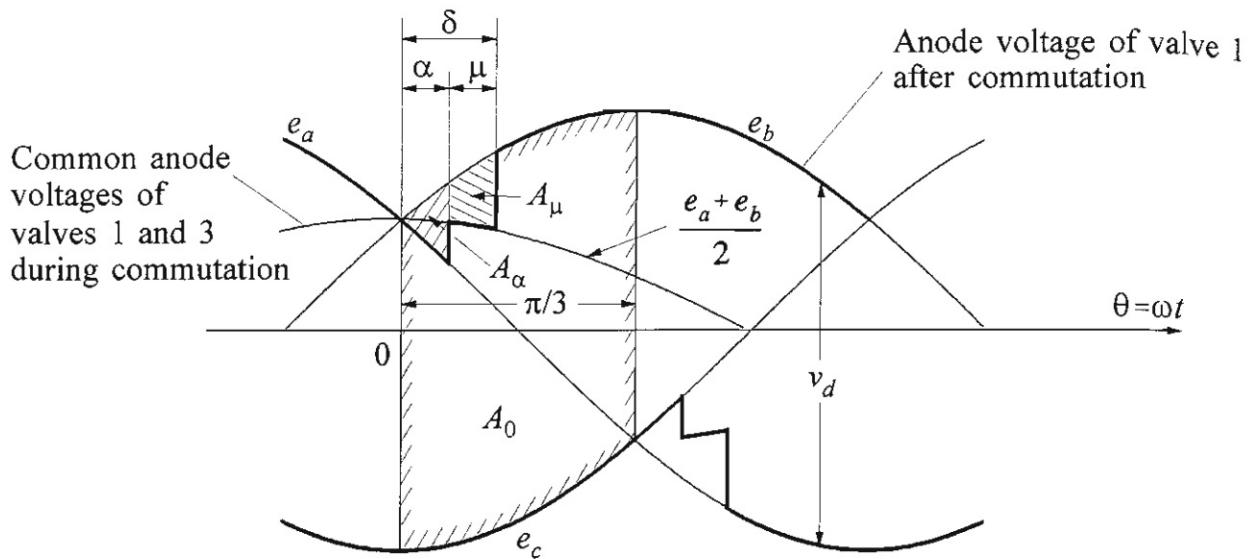


Figura 3.14: Tensão na carga durante o período de comutação dos tiristores  $T1$  e  $T3$

Integrando a tensão na carga durante o intervalo  $\omega t \in [\alpha, \delta]$  obtém-se:

$$A_\mu = \int_{\alpha}^{\delta} \left( e_b - \frac{e_a + e_b}{2} \right) d\omega t = \frac{\sqrt{3}E_m}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.44)$$

Como o processo de comutação se repete a cada período de  $60^\circ$ , a queda de tensão média ( $\overline{\Delta V_d}$ ) é:

$$\overline{\Delta V_d} = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{3}E_m}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) = \frac{\overline{V_d}}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.45)$$

em que  $\overline{V_d}$  é ilustrado pela equação 3.31.

Substituindo (3.41) em (3.45), obtém-se:

$$\overline{\Delta V_d} = \frac{3}{\pi} I_d \omega L_c \quad (3.46)$$

Por fim, a tensão média na carga ( $\overline{V_o}$ ) é obtida subtraindo  $\overline{\Delta V_d}$  da tensão média  $\overline{V_{d\alpha}}$ , representada na equação (3.34):

$$\overline{V_o} = \overline{V_d} \cos(\alpha) - \overline{\Delta V_d} = \overline{V_d} \cos(\alpha) - R_c I_d \quad (3.47)$$

em que  $R_c$  é dado pela expressão (3.48). Nesse caso,  $R_c$ , apesar de não ser uma resistência real e não consumir potência, é denominado "resistência equivalente de comutação" (KUNDUR, 2007).

$$R_c = \frac{3}{\pi} \omega L_c = \frac{3}{\pi} X_c \quad (3.48)$$

### 3.3.2 Operação do retificador

De acordo com a relação (3.47), o circuito equivalente do retificador ilustrado na Figura 3.7 pode ser convenientemente substituído pela simplificação ilustrada na Figura 3.15 (KUNDUR, 2007). Nessa figura, o índice  $r$  indica que tais grandezas se referem ao retificador.

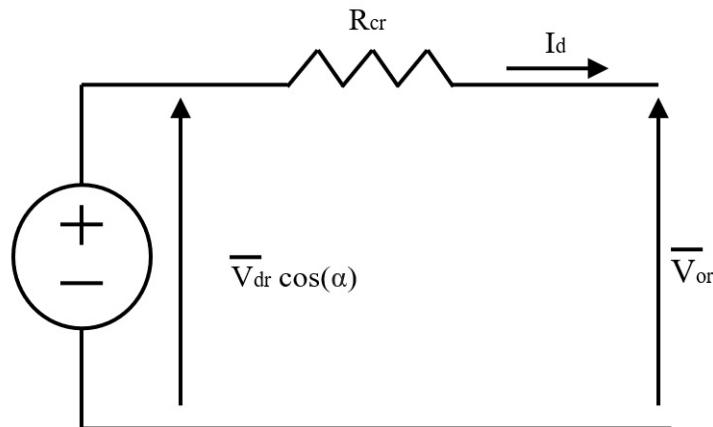


Figura 3.15: Circuito equivalente do retificador

### 3.3.3 Operação do inversor

De acordo com a equação (3.34), se o ângulo de comutação é nulo e  $\alpha > 90^\circ$ , então tensão média é negativa. Com a adição do ângulo de comutação, através da relação (3.47) obtém-se:

$$\overline{V_o} = \overline{V_d} \cos(\alpha) - \frac{\overline{V_d}}{2} (\cos\alpha - \cos\delta)$$

$$\overline{V_o} = \frac{\overline{V_d}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (3.49)$$

Dessa forma,  $\overline{V_o}$  muda de sinal para  $\alpha$  tal que a relação  $\cos\alpha + \cos\delta = 0$  é atendida. A partir da relação (3.49) e considerando que  $\delta = \alpha + \mu$ , obtém-se que o ângulo de disparo crítico ( $\alpha_c$ ) para para que ocorra a inversão de sinal é:

$$\alpha_c = \frac{\pi - \mu}{2} = 90^\circ - \frac{\mu}{2} \quad (3.50)$$

A curva que caracteriza a operação do inversor pode ser observada na Figura 3.16 (KUNDUR, 2007).

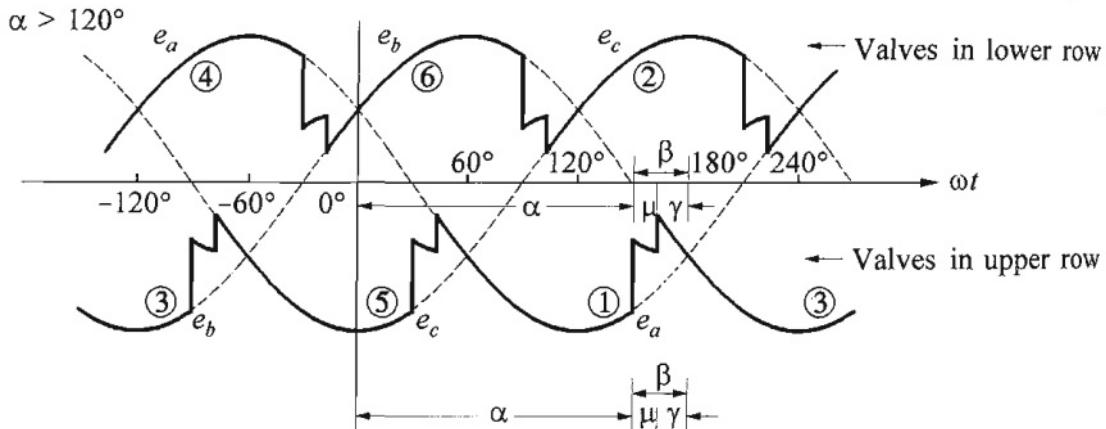


Figura 3.16: Curva de tensão para o inversor

O inversor também apresenta ângulos de disparo e extinção. Entretanto, esses valores são muito grandes (entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ). Dessa forma, torna-se conveniente a utilização de uma nomenclatura especial referente à operação do inversor, descrita a seguir:

- Ângulo de avanço de disparo:  $\beta = \pi - \alpha$
- Ângulo de avanço de extinção:  $\gamma = \pi - \delta$

- Ângulo de comutação do inversor:  $\mu = \delta - \alpha = \beta - \gamma$

A Figura 3.17 (KUNDUR, 2007) ilustra a relação dos ângulos do retificador e inversor referentes a comutação entre os tiristores  $T_1$  e  $T_3$ .

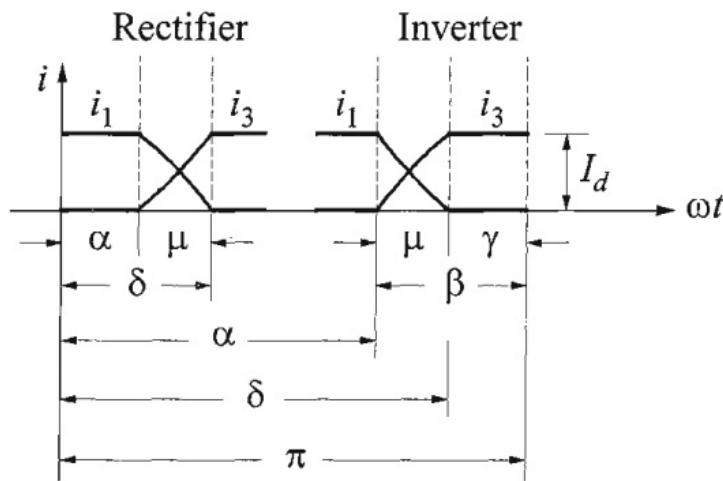


Figura 3.17: Comparaçāo entre os ângulos do retificador e inversor

Visto que  $\cos\alpha = -\cos\beta$  e  $\cos\delta = -\cos\gamma$ , a relação (3.47) pode ser reescrita em termos de  $\beta$  e  $\gamma$  como (3.51) e (3.52), respectivamente (KUNDUR, 2007).

$$\overline{V_o} = \overline{V_d} \cos(\beta) + R_c I_d \quad (3.51)$$

$$\overline{V_o} = \overline{V_d} \cos(\gamma) - R_c I_d \quad (3.52)$$

O circuito equivalente do inversor pode ser convenientemente representado em termos de  $\beta$  e  $\gamma$  pelas figuras 3.18a e 3.18b (KUNDUR, 2007), respectivamente. Note que, em 3.18b, a resistência equivalente de comutação foi propositalmente inserida com o sinal invertido a fim de simplificar a análise. Além disso, o índice  $i$  refere-se a inversor.

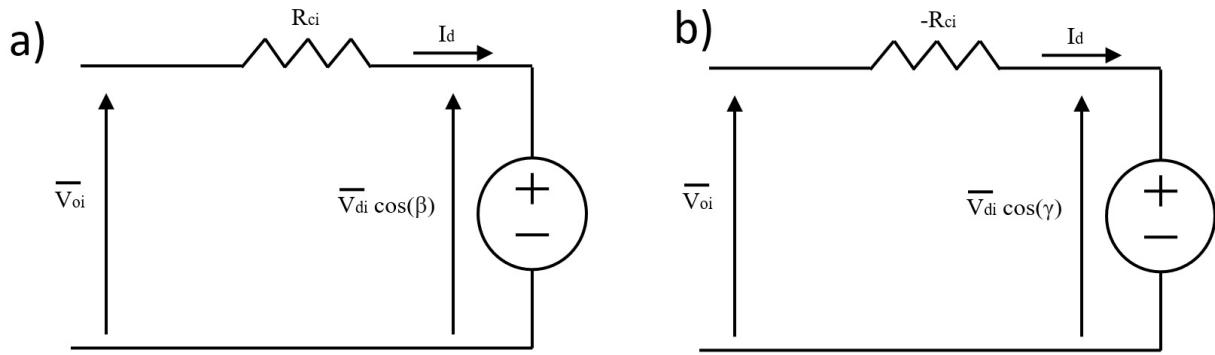


Figura 3.18: Circuito equivalente do inversor

### 3.3.4 Expressões gerais para o Elo de Corrente Contínua

A partir dos circuitos equivalentes do retificador e inversor, ilustrados nas figuras 3.15 e 3.18b, respectivamente, é possível ilustrar o elo de corrente contínua (Figura 3.6) como um circuito equivalente em termo das tensões médias ( $\bar{V}_d$  e  $\bar{V}_o$ ) e das resistências equivalentes de comutação ( $R_{cr}$  e  $R_{ci}$ ). Esse circuito pode ser visto na Figura 3.19 (KUNDUR, 2007), em que  $R_L$  é a carga do sistema.

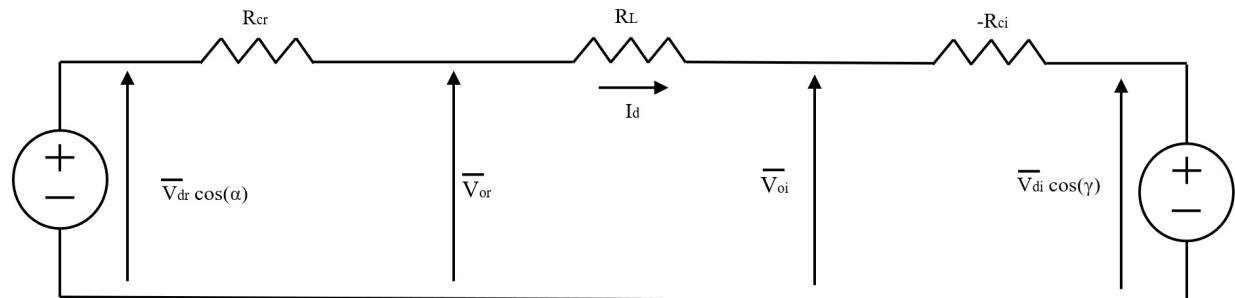


Figura 3.19: Circuito equivalente do Elo de Corrente Contínua

Baseado no circuito equivalente ilustrado na Figura 3.19, as seguintes expressões gerais descrevem o comportamento do *link CC* de acordo com os coeficientes  $r$  e  $i$ , que se referem ao retificador e inversor, respectivamente (KUNDUR, 2007):

$$\bar{V}_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} T_r E_{FFr} \quad (3.53)$$

$$\bar{V}_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} T_i E_{FFi} \quad (3.54)$$

$$\overline{V_{or}} = \overline{V_{dr}} \cos(\alpha_r) - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_d \quad (3.55)$$

$$\overline{V_{oi}} = \overline{V_{di}} \cos(\gamma_i) - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_d \quad (3.56)$$

$$\phi_r \approx \arccos \left( \frac{\overline{V_{or}}}{\overline{V_{dr}}} \right) \quad (3.57)$$

$$\phi_i \approx \arccos \left( \frac{\overline{V_{oi}}}{\overline{V_{di}}} \right) \quad (3.58)$$

$$P_r = \overline{V_{dr}} I_d = P_{ACr} \quad (3.59)$$

$$P_i = \overline{V_{di}} I_d = P_{ACi} \quad (3.60)$$

$$Q_r = P_r \tan(\phi_r) \quad (3.61)$$

$$Q_i = P_i \tan(\phi_i) \quad (3.62)$$

$$\overline{V_{or}} = \overline{V_{oi}} + R_L I_d \quad (3.63)$$

$$I_d = \frac{\overline{V_{dr}} \cos(\alpha_r) - \overline{V_{di}} \cos(\gamma_i)}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (3.64)$$

As expressões (3.53) e (3.54) consideram os transformadores  $T_r$  e  $T_i$  que podem

estar conectados as barras do retificador e inversor, respectivamente. Já as equações (3.57) e (3.58) são expressões aproximadas e se referem a diferença de fase entre a corrente e a tensão alternada ( $\phi_r$  e  $\phi_i$ ) (KUNDUR, 2007).

Por fim, as expressões (3.59) e (3.60) consideram que a potência ativa do lado *CA* é igual a potência *CC*, visto que os componentes são ideais.

### 3.3.5 Controle do Elo de Corrente Contínua

Note que um sistema de transmissão de corrente contínua não funcionaria sem o controle de corrente a partir dos ângulos de disparo e extinção ( $\alpha_r$  e  $\gamma_i$ ), vide equação 3.64. A partir dela é possível notar que, mantendo tanto as resistências quanto os ângulos  $\alpha_r$  e  $\gamma_i$  constantes, caso uma das tensões varie cerca de 25%, a magnitude da corrente corrente pode ser alterada em até 100% (KUNDUR, 2007). Tais variações são inaceitáveis para o bom funcionamento e performance do sistema. Sem esse tipo de controle, a utilização de tal modelo seria impraticável.

Além disso, há algumas outras razões para controlarmos o sistema de transmissão de corrente contínua, dentre elas manter a tensão *CC* próxima ao valor nominal e manter os fatores de potência o mais alto possível (KUNDUR, 2007).

Para que o fator de potência seja alto,  $\alpha_r$  e  $\gamma_i$  devem ser os menores possíveis. Entretanto, estes apresentam limites inferiores que não podem ser violados. Por exemplo,  $\alpha_r$  não pode ser menor que  $5^\circ$ , operando seguramente na faixa  $10^\circ < \alpha_r < 20^\circ$ . A razão para a existência desse limite é garantir que haja tensão suficiente sobre o tiristor antes do disparo; caso contrário, há muita chance de haver uma falha no disparo do tiristor (KUNDUR, 2007).

Já o ângulo de avanço de extinção  $\gamma_i$  deve apresentar sempre um valor mínimo para evitar a falha de comutação entre as correntes de fase. Esse valor é de  $15^\circ$  para sistemas que operam em  $50Hz$  e  $18^\circ$  para sistemas que operam em  $60Hz$  (KUNDUR, 2007).

A tensão *CC* e a corrente contínua ( $I_d$ ) podem ser controladas pelas tensões internas  $\overline{V_{dr}}\cos(\alpha_r)$  e  $\overline{V_{di}}\cos(\gamma_i)$ . Essas, por sua vez, podem ser ajustadas através dos respectivos ângulos de disparo e extinção ( $\alpha_r$  e  $\gamma_i$ ) e através dos *taps* dos transformadores dos conversores (equações 3.53 e 3.54) (KUNDUR, 2007).

O ajuste dos ângulos de disparo e extinção ( $\alpha_r$  e  $\gamma_i$ ) é um método de controle rápido, que dura entre 1 a  $10ms$ . Já o controle da tensão pela mudança na magnitude dos *taps* dos transformadores é um método lento, cuja duração varia entre 5 a 6 segundos. Dessa forma, a mudança nos *taps* dos transformadores é utilizada apenas para manter  $\alpha_r$  e  $\gamma_i$  em suas respectivas faixas de operação (KUNDUR, 2007).

Para satisfazer todos os requisitos apresentados, o elo de corrente contínua apre-

senta 3 modos de operação, que são distintos entre si pela forma com que é feito o controle da corrente contínua  $I_d$ . Além disso, em cada modo de controle, uma responsabilidade específica é designada a cada terminal do *link CC* (retificador e inversor).

- 1º modo de controle - Normal: retificador em *CC* e inversor em *CEA*

No modo de operação *normal*, o terminal do retificador será responsável pelo controle da corrente  $I_d$  (modo *CC*), e o inversor operará em modo *CEA* (*constant extinction angle*), mantendo o ângulo de avanço de extinção  $\gamma_i$  constante, fazendo com que haja assim uma margem de comutação segura e não ocorra falhas na comutação (KUNDUR, 2007).

A Figura 3.20 (KUNDUR, 2007) ilustra o perfil da operação do 1º modo de controle do elo de corrente contínua. Nela, o retificador mantém a corrente  $I_d$  constante (representado pelo segmento *AB*). Já o inversor realiza o controle da tensão mantendo  $\gamma_i$  constante (segmento *CD*). Note que o segmento *CD* apresenta um coeficiente angular negativo. Isso ocorre pois a abscissa  $V_d$  é medida no retificador, fazendo com que a queda de tensão na carga  $R_L$  seja incluída no valor do coeficiente angular da reta.

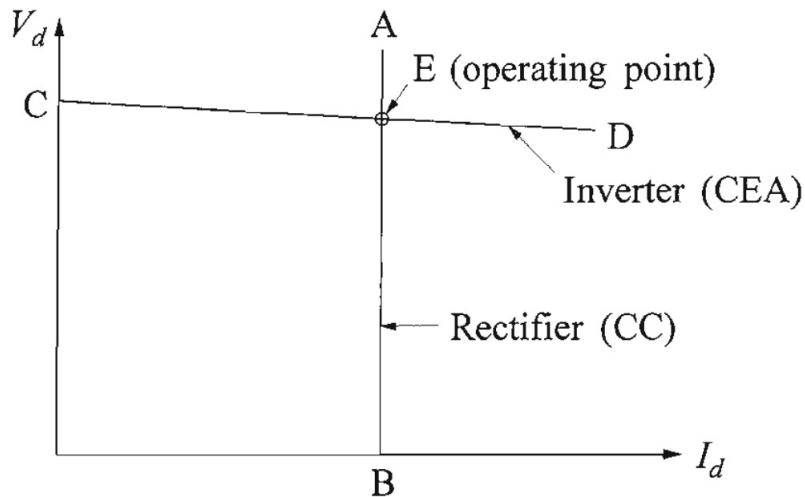


Figura 3.20: Perfil Tensão - Corrente do 1º modo de controle do *link CC*

Note que, pela equação 3.64, o segmento *AB*, característico do retificador, pode ser transladado horizontalmente alterando o ângulo de disparo  $\alpha_r$ , desde que  $\gamma_i$  seja constante. Assim, se a corrente medida for menor que a corrente desejada ( $I_{ord}$ ),  $\alpha_r$  pode mudar para se obter  $I_d = I_{ord}$  (KUNDUR, 2007).

Já o segmento *CD*, característico do inversor, pode ser transladado verticalmente (no modo de operação normal) através da mudança do *tap* do transformador do inversor (visto que  $\gamma_i$  é constante), o que alteraria a magnitude da tensão  $\overline{V_{di}}$ . Com

a modificação na magnitude da tensão  $\overline{V_{di}}$ , o valor de  $I_d$  também sofre uma mudança (equação 3.64), o que é instantaneamente corrigido com a alteração do valor de  $\alpha_r$ .

O único elemento que ainda não foi utilizado nesse método de controle é o *tap* do transformador do retificador ( $T_r$ ). Sua função é manter  $\overline{V_{dr}}$  tal que  $\alpha_r$  não saia da sua faixa de operação normal ( $10^\circ < \alpha_r < 20^\circ$ ), o que é possível através da equação 3.53 (KUNDUR, 2007).

Em suma, o modo de controle normal apresenta as seguintes características (KUNDUR, 2007):

- Ângulo de disparo do retificador ( $\alpha_r$ ) ajustado para manter  $I_d$  constante ( $I_d = I_{ord}$ );
  - Ângulo de avanço de extinção do inversor ( $\gamma_i$ ) constante ( $15^\circ$  para sistemas que operam em  $50Hz$  e  $18^\circ$  para sistemas que operam em  $60Hz$ );
  - *Tap* do transformador do retificador ( $T_r$ ) ajustado para garantir que  $\alpha_r$  esteja no intervalo  $10^\circ < \alpha_r < 20^\circ$ ;
  - *Tap* do transformador do inversor ( $T_i$ ) ajustado para controlar  $\overline{V_{di}}$ .
- 2º modo de controle - Tensão reduzida: retificador em *CIA* e inversor em *CC*

No modo de operação normal, o retificador mantém a corrente  $I_d$  constante através do ajuste do ângulo de disparo  $\alpha_r$ . Entretanto,  $\alpha_r$  não pode ser menor que o valor  $\alpha_{min} = 5^\circ$ . A partir do momento em que  $\alpha_{min}$  é atingido, não é mais possível aumentar a tensão do retificador e, consequentemente, controlar a corrente. Dessa forma, o retificador entra no modo *CIA* (*Constant Ignition Angle*) (KUNDUR, 2007).

O perfil de operação do 2º modo de controle é ilustrado na Figura 3.21 (KUNDUR, 2007). Agora, o retificador apresenta duas curvas de operação: o segmento *AB* que descreve a sua operação no modo de controle normal, e o segmento *FA*, que corresponde ao modo de controle *CIA*.

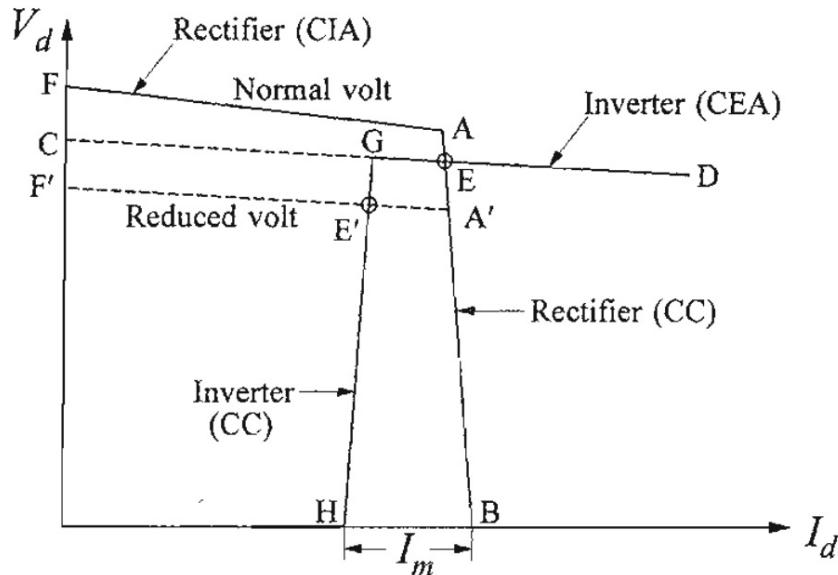


Figura 3.21: Perfil Tensão - Corrente do 2º modo de controle do *link CC*

Observe que, na Figura 3.21, mesmo o retificador no modo *CIA* (representado pelo segmento *FA*), a característica do inversor no modo *CEA* (representada pelo segmento *CD*) ainda cruza com o segmento *AB*. Entretanto, pode haver o caso em que a tensão do retificador reduza muito (pois esse terminal não possui mais a capacidade de controla-lá), fazendo com que o perfil do retificador no modo *CIA* passe a ser caracterizado pelos segmentos *F'A'B*. Dessa forma, a curva que caracteriza a operação do inversor não intersecta mais com a curva do retificador.

Por essa razão, quando  $\alpha_{min}$  é atingido, o inversor sai do modo *CEA* e entra no modo de controle de corrente *CC*, que é utilizado em uma tensão menor que o controlador de corrente do retificador (por isso esse modo é denominado “modo de tensão reduzida”), fazendo com que as características do retificador e inversor cruzem no ponto *E'* (Figura 3.21). Isso ocorre com a variação do  $\gamma_i$ , fazendo com que o inversor controle a corrente  $I_d$  e o retificador controle indiretamente a tensão, visto que  $\alpha_r = \alpha_{min}$ .

Além disso, note que na Figura 3.21 existe uma diferença entre a corrente  $I_{ord}$  e a corrente fixada pelo inversor. Essa diferença é denominada “margem de corrente”, denotada por  $I_m$ , e representa de 10 a 15% do valor de  $I_{ord}$ . A existência dessa margem se faz necessária para que as duas curvas características das correntes não se cruzem devido a algum erro no sistema (seja ele uma falha elétrica ou de medição).

Em suma, o modo de controle de tensão reduzida apresenta as seguintes características (KUNDUR, 2007):

- Ângulo de disparo do retificador fixado em  $\alpha_r = \alpha_{min}$ ;

- Ângulo de disparo do inversor ajustado para ter-se  $I_d = I_{ord} - I_m$ ;
  - $Tap$  do transformador do retificador ( $T_r$ ) ajustado para maximizar a tensão  $\overline{V}_{or}$ ;
  - $Tap$  do transformador do inversor ( $T_i$ ) ajustado para garantir  $\gamma_i > \gamma_{min}$ .
- 3º Modo de controle -  $\beta$  constante: retificador em *CIA* e inversor em  $\beta$  constante

Normalmente os modos de controle 1 e 2 são suficientes para descrever a operação do elo de corrente contínua. Entretanto, há alguns casos em que é necessário considerar a transição entre os dois primeiros modos de controle. Isso ocorre quando as características do modo de controle *CIA* do retificador e do *CEA* do inversor não estão muito bem definidas em torno do ponto de transição entre os dois modos de controle. A Figura 3.22 (KUNDUR, 2007) ilustra o caso em que a característica dos dois segmentos se cruzam em dois pontos ( $A'$  e  $A''$ ), criando uma ambiguidade.

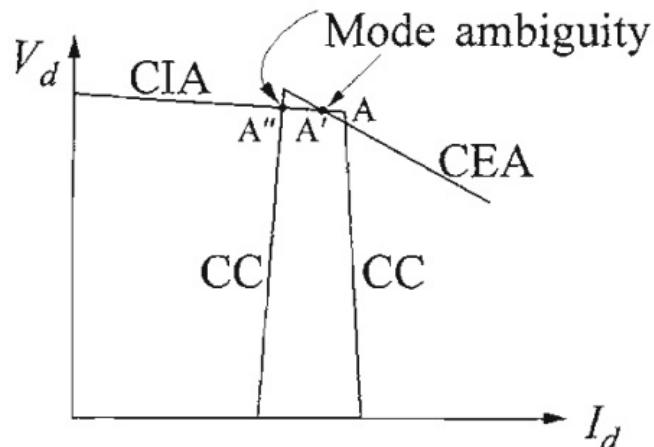


Figura 3.22: Perfil Tensão com Ambiguidade

Para evitar esse problema, o inversor começa a operar no modo  $\beta$  constante, fazendo com que a transição entre o 1º e o 2º modo de controle seja feita a partir de um segmento de reta com coeficiente angular positivo ( $\beta$ ), de modo que as características dos dois primeiros modos de controle apresentem apenas um ponto em comum.

A Figura 3.23 (KUNDUR, 2007) ilustra a nova transição entre os dois primeiros modos de controle. Note que agora a transição é caracterizada pelo segmento de reta com coeficiente angular positivo  $JK$ , e não mais pelos segmentos  $JFK$ , como visto anteriormente.

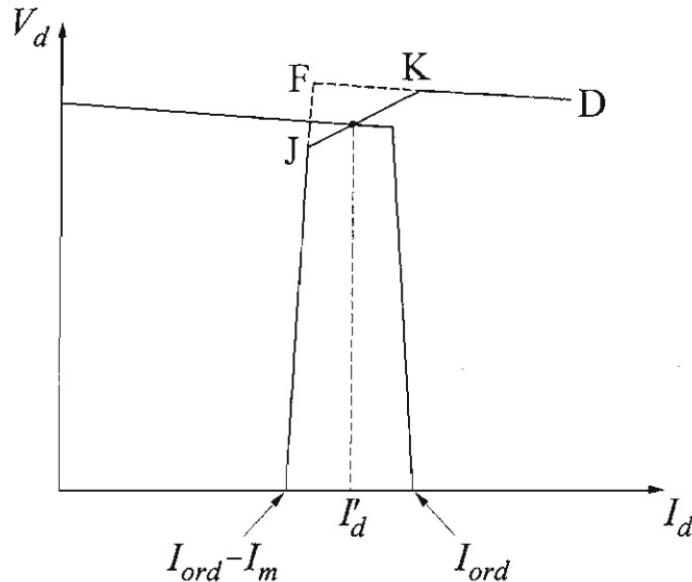


Figura 3.23: Perfil Tensão com o modo de controle  $\beta$  constante

Em suma, o modo de controle  $\beta$  constante apresenta as seguintes características (KUNDUR, 2007):

- Ângulo de disparo do retificador constante  $\alpha_r = \alpha_{min}$ ;
- Ângulo de avanço de disparo  $\beta$  constante;
- $I_d = I'_d$  tal que  $I_{ord} > I'_d > (I_{ord} - I_m)$ .

### 3.3.6 Equacionamento dos modos de controle do Elo de Corrente Contínua

Cada modo de controle apresente um conjunto de parâmetros associados as características do sistema e aos seus limites operacionais e variáveis que se relacionam através das equações que descrevem o *link CC*.

O processo de busca dos valores das variáveis associadas ao elo de corrente contínua se diferencia entre os três modos de controle apresentados. Para encontrar esses valores, é feita a presunção de que todas as grandezas do sistema *CA* já foram encontradas pelo método do fluxo de carga. Dessa forma, o equacionamento de cada modo de controle é descrito da seguinte maneira (KUNDUR, 2007):

- Equacionamento do 1º modo de controle

No começo do processo de resolução do sistema com o 1º modo de controle, declara-se  $I_d$  e  $\gamma_i$  como constantes e em seu valor esperado ( $I_{ord}$  e  $\gamma_{min}$ ). Assim, considerando o valor de  $E_{FFi}$  obtido pelo fluxo de carga no sistema *CA*, é possível

resolver as equações (3.54), (3.56), (3.58), (3.60) e (3.62), encontrando os valores de  $\overline{V_{di}}$ ,  $\overline{V_{oi}}$ ,  $\phi_i$ ,  $P_i$  e  $Q_i$ .

A partir das relações (3.53), (3.55) e (3.63), é possível explicitar o valor de  $\alpha_r$  (equação 3.65) em função das tensões internas do link *CC* e da tensão *CA*  $E_{FFr}$ , que é fornecida pelo sistema *CA* através da resolução do fluxo de carga.

$$\alpha_r = \arccos \left( \frac{\overline{V_{or}}}{\overline{V_{dr}}} + \frac{X_{cr} I_{ord}}{\sqrt{2} E_{FFr} T_r} \right) \quad (3.65)$$

Note que, em (3.65),  $T_r$  deve ser ajustado para manter  $\alpha_r$  em sua faixa de operação.

- Equacionamento do 2º modo de controle

No começo do processo de resolução do sistema com o 2º modo de controle, declara-se  $I_d$  e  $\alpha_r$  como constantes e em seu valor desejado ( $I_d = I_{ord} - I_m$  e  $\alpha_r = \alpha_{min}$ ). Assim, é possível resolver as equações (3.53), (3.55), (3.57), (3.59) e (3.61), encontrando os valores de  $\overline{V_{dr}}$ ,  $\overline{V_{or}}$ ,  $\phi_r$ ,  $P_r$  e  $Q_r$ .

A partir das relações (3.54), (3.56) e (3.63), é possível explicitar o valor de  $\gamma_i$  (equação 3.66) em função das tensões internas do link *CC* e da tensão *CA*  $E_{FFi}$ .

$$\gamma_i = \arccos \left( \frac{\overline{V_{oi}}}{\overline{V_{di}}} + \frac{X_{ci}(I_{ord} - I_m)}{\sqrt{2} E_{FFi} T_i} \right) \quad (3.66)$$

Por fim,  $T_i$  deve ser ajustado para garantir que  $\gamma_i > \gamma_{min}$ .

- Equacionamento do 3º modo de controle

No começo do processo de resolução do sistema com o 3º modo de controle, declara-se o parâmetro  $\beta$  como constante. Dessa forma, é possível encontrar as tensões  $\overline{V_{dr}}$  e  $\overline{V_{di}}$  através das relações (3.53), (3.54).

Rearranjando os termos da relação (3.63), é possível explicitar o termo  $I'_d$  de acordo com a equação (3.67).

$$I'_d = \frac{\overline{V_{dr}} \cos(\alpha_{min}) - \overline{V_{di}} \cos(\beta)}{R_L + \frac{3}{\pi} X_{cr} + \frac{3}{\pi} X_{ci}} \quad (3.67)$$

Com o valor de  $I'_d$  calculado, é possível encontrar  $\overline{V_{or}}$  a partir da relação (3.55), substituindo  $I_d = I'_d$ . Já  $\overline{V_{oi}}$  deve ser escrito em termos de  $\beta$  (e não mais de  $\gamma_i$ ), conforme a relação (3.68).

$$\overline{V_{oi}} = \overline{V_{di}} \cos(\beta) + \frac{3}{\pi} I'_d X_{ci} \quad (3.68)$$

Com os valores de  $\overline{V_{dr}}$ ,  $\overline{V_{di}}$ ,  $\overline{V_{or}}$ ,  $\overline{V_{oi}}$  e  $I'_d$  conhecidos, é possível encontrar  $\phi_r$ ,  $\phi_i$ ,  $P_r$ ,  $P_i$ ,  $Q_r$  e  $Q_i$  conforme as relações (3.57), (3.58), (3.59), (3.60), (3.61) e (3.62).

Note que, como o controle de corrente pelo ajuste dos *taps* dos transformadores é lento quando comparado à mudança nos ângulos de disparo e extinção, ele não se aplica ao 3º modo de controle, visto que esse é utilizado apenas na transição entre o 1º e o 2º modo.

### 3.3.7 Resolução do Problema de Fluxo de Carga para sistemas com Elo de Corrente Contínua

O problema de FC para sistemas com *link CC* é feito de forma iterativa, resolvendo de maneira alternada as equações *CA* e *CC*. O algoritmo de resolução do problema é descrito como (KUNDUR, 2007):

1. Resolva o FC para a parte *CA*, determinando o estado do sistema (consequentemente, encontrando os valores de  $E_{FFr}$  e  $E_{FFi}$ );
2. Resolva o sistema de equações do *link CC* pelo 1º modo de controle. Se  $\alpha_r > \alpha_{min}$ , a condição do modo de controle 1 foi satisfeita, vá para 5. Se  $\alpha_r < \alpha_{min}$ , vá para 3;
3. Resolva o sistema de equações do *link CC* pelo 2º modo de controle. Se  $\gamma_i > \gamma_{min}$ , a condição do modo de controle 2 foi satisfeita, vá para 5. Se  $\gamma_i < \gamma_{min}$ , vá para 4;
4. Resolva o sistema de equações do *link CC* pelo 3º modo de controle. Vá para 5;
5. Os valores de  $P_r$ ,  $P_i$ ,  $Q_r$  e  $Q_i$  foram obtidos. Se o erro deles for maior que a tolerância, volte para 1. Se não, o processo terminou e a solução está completa

# Capítulo 4

## Resultados Preliminares

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos através da aplicação do FCC para os sistemas de 5, 6, 14, 30, 41, 57, 118 e 300 barras. Todos os resultados foram obtidos através da formulação do problema de FC com barra *slack* distribuída utilizando o modelo apresentado pelas equações (3.20) e (3.21). Se as equações (3.22) e (3.23) forem utilizadas, haverá um destaque citando que o modelo de carregamento foi alterado para considerar os parâmetros direções de aumento.

Os dados das barras e linhas de todos os sistemas estudados, juntamente com o seu diagrama unifilar estão disponíveis no Apêndice A.

Por fim, o problema de FC foi resolvido através do método de resolução de sistemas de equações algébricas não-lineares de Newton-Raphson, considerando um erro de  $10^{-5}$ . Todos os resultados numéricos foram obtidos através do software MATLAB.

### 4.1 Sistema de 5 barras

O sistema de 5 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 1 barra de geração;
- 3 barras de carga;
- 7 linhas de transmissão.

#### 4.1.1 Sistema de 5 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ), sem considerar limites de geração de potência reativa nas barras 1 e 2, pode ser observada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) sem limites de geração de potência reativa - Sistema 5 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	129.6111	91.2453	0	0	0
2	2	1	-2.0158	41.4756	-62.1294	20	10	0
3	0	0.98726	-4.6033	0	0	45	15	0
4	0	0.98414	-4.9212	0	0	40	5	0
5	0	0.9717	-5.7227	0	0	60	10	0
$K_G = 0.0369$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 6.0867								

Resolvendo o FCC para o sistema de 5 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.1).

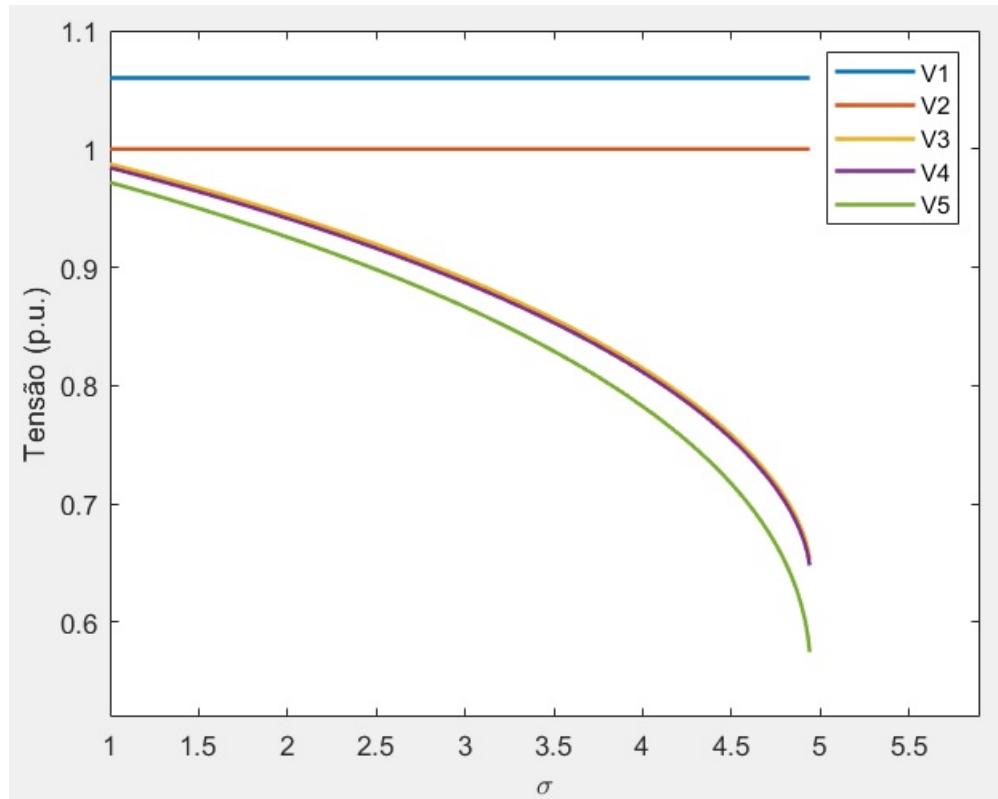


Figura 4.1: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 5 barras sem limites de geração de potência reativa

Note que, como o sistema não apresenta limites operacionais (não há limite de magnitude de tensão nem limite de geração de potência reativa nas barras de geração), há apenas um ponto de bifurcação em que ocorre uma  $BSN$ . Esse ponto ocorre em  $\sigma = 4,94$ , caracterizando o máximo carregamento do sistema.

Além disso, as curvas  $PV$  ilustradas na Figura 4.1 variam de maneira contínua

em relação ao parâmetro  $\sigma$ . Isso ocorre pois, como o sistema não sofre com a interferência de limites operacionais, a estrutura da matriz Jacobiana associada ao sistema se mantém a mesma durante todo o carregamento. Para  $\sigma = 4,94$  (*BSN*), a matriz Jacobiana se torna singular e o sistema não apresenta mais solução para valores superiores de  $\sigma$ . O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.2. Note que, conforme o sistema vai se aproximando de  $\sigma = 4,94$ , o determinante varia de maneira contínua para o zero, tornando-se singular no ponto de máximo carregamento.

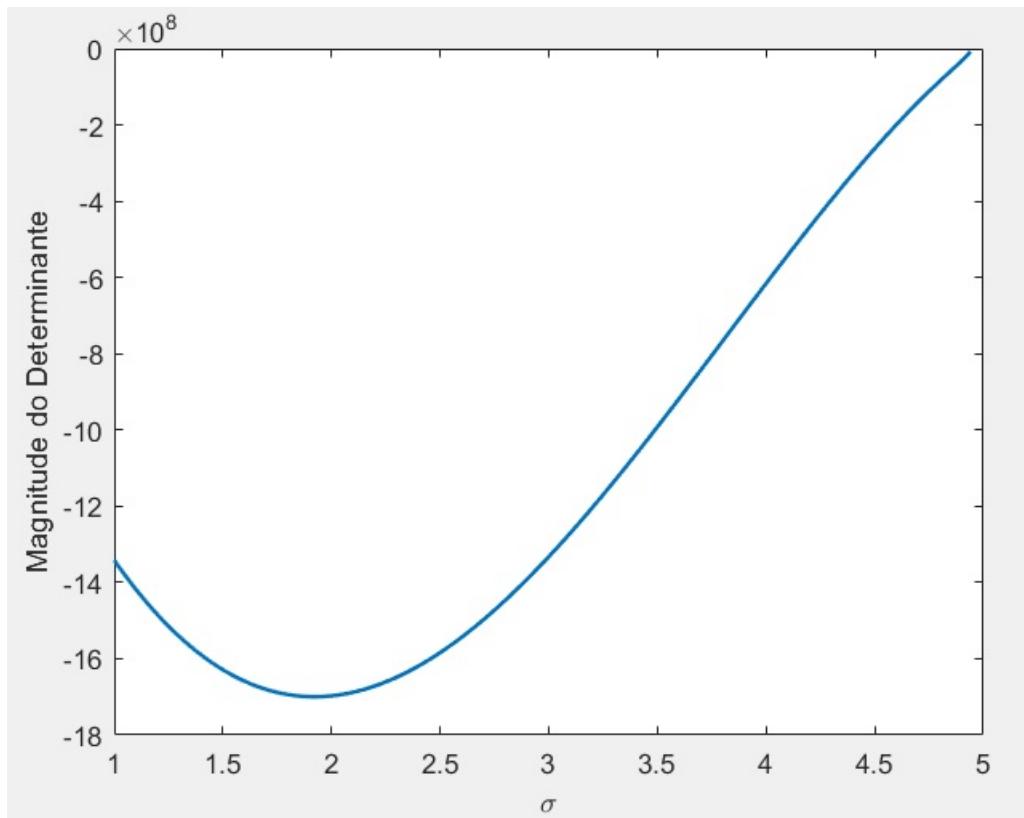


Figura 4.2: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 5 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4,94$ ) pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4,94$ ) - Sistema de 5 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	828.1382	166.1611	0	0	0
2	2	1	-19.6926	265.0042	844.908	98.8	49.4	0
3	0	0.65325	-37.4326	0	0	222.3	74.1	0
4	0	0.64806	-40.9903	0	0	197.6	24.7	0
5	0	0.57481	-51.4586	0	0	296.4	49.4	0
$K_G = 1.6851$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 278.0425								

#### 4.1.2 Sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja um limite de geração de potência reativa para a barra de geração 2. Essa deve se manter no intervalo  $-100Mvar < Q_{G2} < 100Mvar$ . As novas curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC podem ser observadas na Figura 4.3.

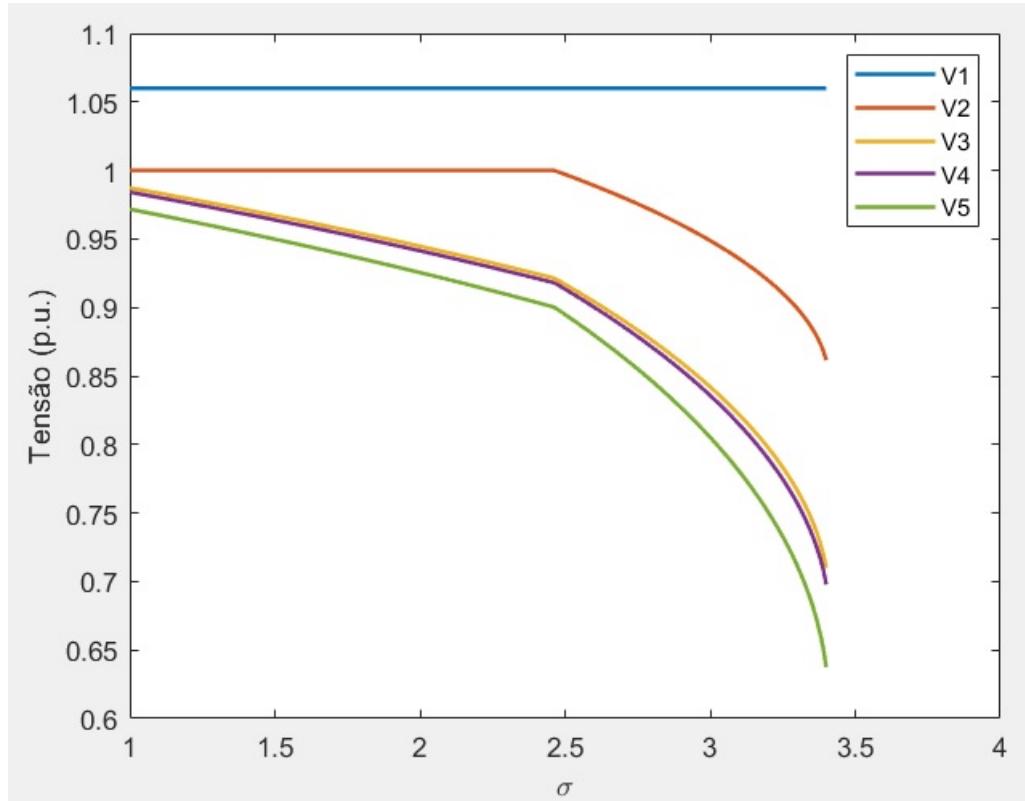


Figura 4.3: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa

Note que, para  $\sigma = 2,47$ , há uma discontinuidade na curva da barra 2. O estado

do sistema nesse ponto ( $\sigma = 2,47$ ) pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Estado do sistema no ponto  $\sigma = 2,47$  - Sistema de 5 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	334.7797	174.6869	0	0	0
2	2	0.99946	-6.9942	107.1295	100	49.4	24.7	0
3	0	0.92048	-13.1972	0	0	111.15	37.05	0
4	0	0.91712	-14.1682	0	0	98.8	12.35	0
5	0	0.89917	-16.6794	0	0	148.2	24.7	0
$K_G = 0.2082$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 34.3592								

De acordo com a Tabela 4.3, em  $\sigma = 2,47$ , a barra 2 atingiu o seu limite superior de geração de potência reativa (100 Mvar), perdendo a capacidade de controlar a tensão da barra pela insuficiência de suporte de reativos. Dessa forma, ela passou a ser considerada como uma barra de carga cuja potência reativa é igual ao limite superior de geração.

Note que, pela Figura 4.3, o sistema continuou apresentando soluções estáveis para  $\sigma > 2,47$ , o que caracteriza esse ponto como uma *BDIL*. Além disso, a estrutura da matriz Jacobiana associada ao sistema mudou devido à mudança no tipo da barra 2: ela era anteriormente uma barra de geração e, para  $\sigma > 2,47$ , é considerada como uma barra de carga.

A descontinuidade observada em  $\sigma = 2,47$  é vista também no perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema (Figura 4.4). Note que, como o ponto  $\sigma = 2,47$  caracteriza uma *BDIL*, o determinante da matriz Jacobiana não é singular, sofrendo apenas um salto devido a descontinuidade ocasionada pela mudança em sua estrutura.

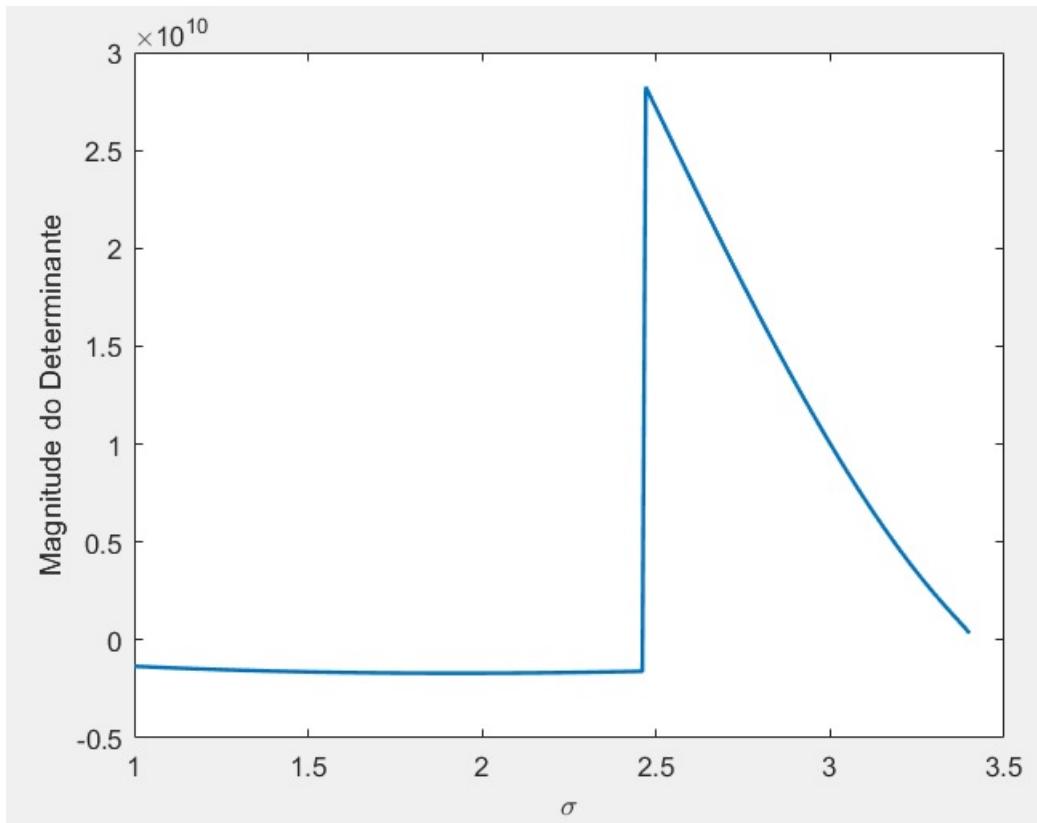


Figura 4.4: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 5 barras com limites de geração de potência reativa

Já em  $\sigma = 3,40$ , o sistema atinge seu ponto de máximo carregamento, ocasionado por uma *BSN* (o que pode ser confirmado pela Figura 4.3, visto que a matriz Jacobiana se torna singular nesse ponto).

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,40$ ) pode ser observado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,40$ ) - Sistema de 5 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	515.703	475.6185	0	0	0
2	2	0.86161	-10.0236	165.025	100	68	34	0
3	0	0.7099	-23.1961	0	0	153	51	0
4	0	0.69779	-25.4177	0	0	136	17	0
5	0	0.63751	-32.0625	0	0	204	34	0
$K_G = 0.7256$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 119.7280								

Por fim, é possível observar que o ponto de máximo carregamento é menor no caso em que os limites operacionais são considerados ( $\sigma = 3,40$ ) quando comparado ao caso sem limites operacionais ( $\sigma = 4,94$ ). Isso ocorre pois quando há limites nas barras

de geração, a carga continua aumentando enquanto as barras de geração não podem mais suprir a demanda devido aos limites de geração de potência reativa. Tal fenômeno será ilustrado em todos os sistemas testados.

## 4.2 Sistema de 6 barras

O sistema de 6 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 2 barras de geração;
- 3 barras de carga;
- 11 linhas de transmissão.

### 4.2.1 Sistema de 6 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ), sem considerar limites de geração de potência reativa nas barras 1, 2 e 3, pode ser observada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) sem limites de geração de potência reativa - Sistema 6 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.1	0	82.4865	31.5514	0	0	0
2	2	1.1	-0.94046	144.3514	58.9147	0	0	0
3	2	1.1	-2.7121	61.8649	66.92	0	0	0
4	0	1.0397	-3.1858	0	0	90	60	0
5	0	1.0242	-4.8004	0	0	100	70	0
6	0	1.045	-4.7399	0	0	90	60	0
$K_G = 0.0311$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 8.7027								

Resolvendo o FCC para o sistema de 6 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.5).

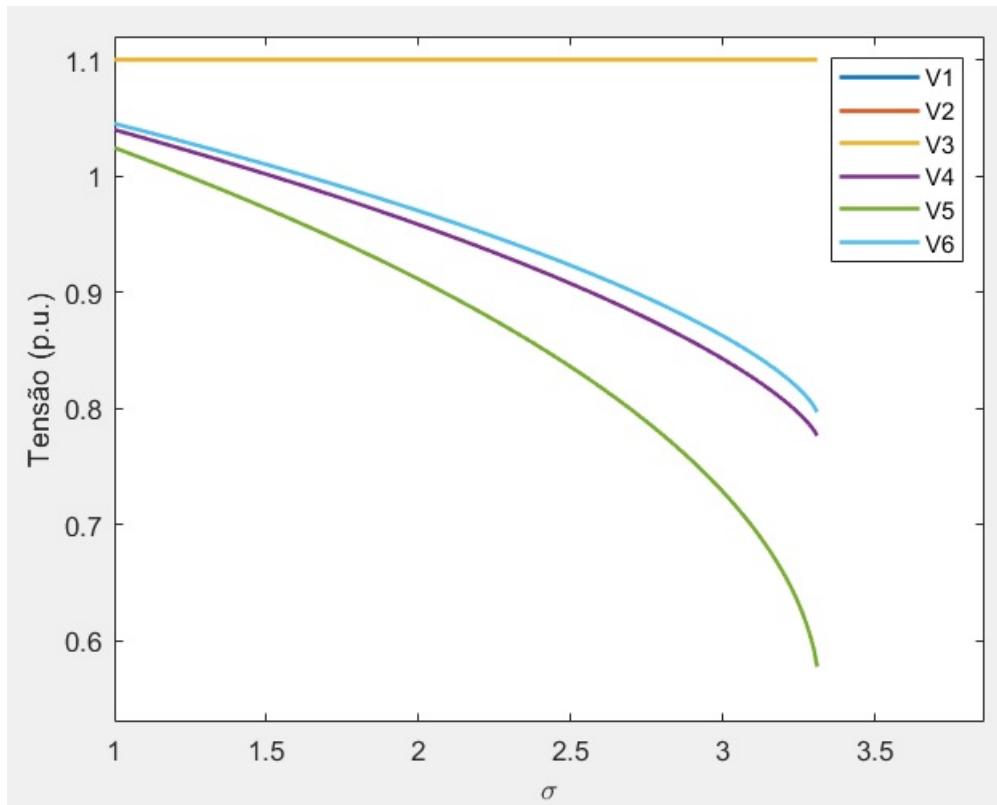


Figura 4.5: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras sem limites de geração de potência reativa

De maneira similar ao sistema de 5 barras, como não há limites operacionais, há apenas um ponto de bifurcação do tipo  $BSN$ . Esse ponto ocorre em  $\sigma = 3,31$ , caracterizando o ponto de máximo carregamento.

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.6. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,31$ ).

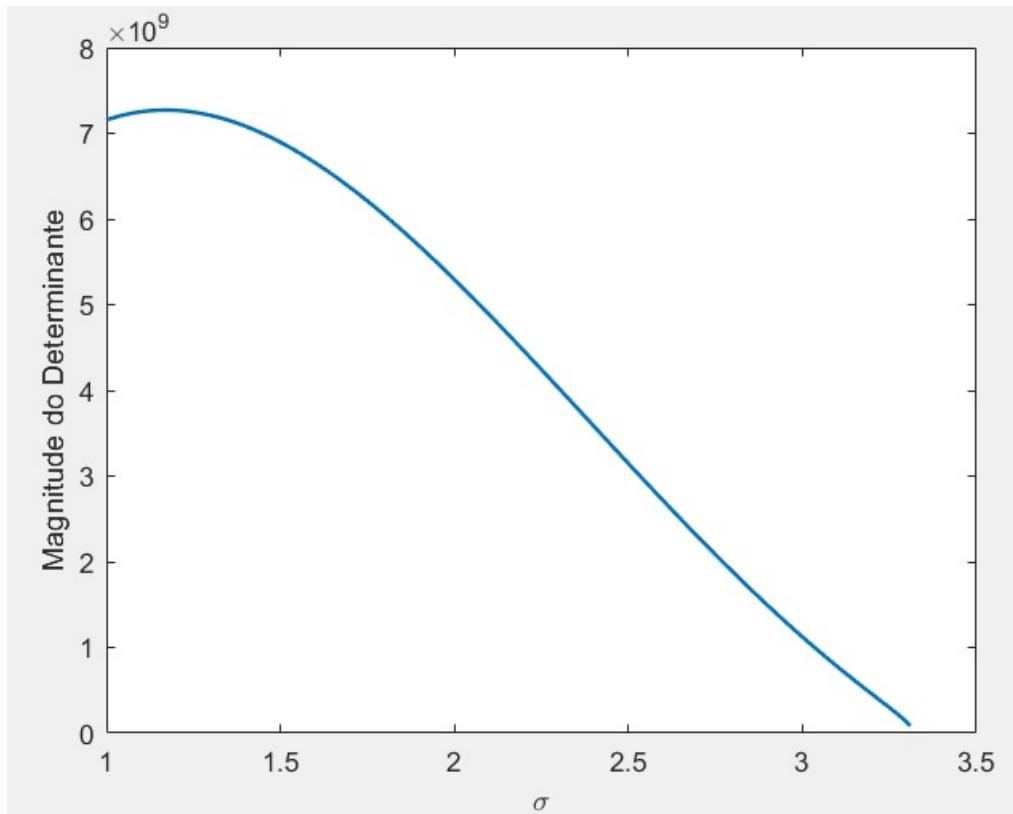


Figura 4.6: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,31$ ) pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 3,31$ ) - Sistema de 6 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.1	0	335.0339	301.2425	0	0	0
2	2	1.1	-5.5668	586.3093	531.303	0	0	0
3	2	1.1	-14.4038	251.2754	484.3285	0	0	0
4	0	0.77651	-14.6533	0	0	297.9	198.6	0
5	0	0.57764	-26.1205	0	0	331	231.7	0
6	0	0.79678	-23.1818	0	0	297.9	198.6	0
$K_G = 0.8779$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 245.8187								

#### 4.2.2 Sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração (1, 2 e 3):

$$-40Mvar < Q_{G1} < 40Mvar$$

$$-90Mvar < Q_{G2} < 90Mvar$$

$$-120Mvar < Q_{G3} < 120Mvar$$

As novas curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC considerando esses limites operacionais podem ser observadas na Figura 4.7.

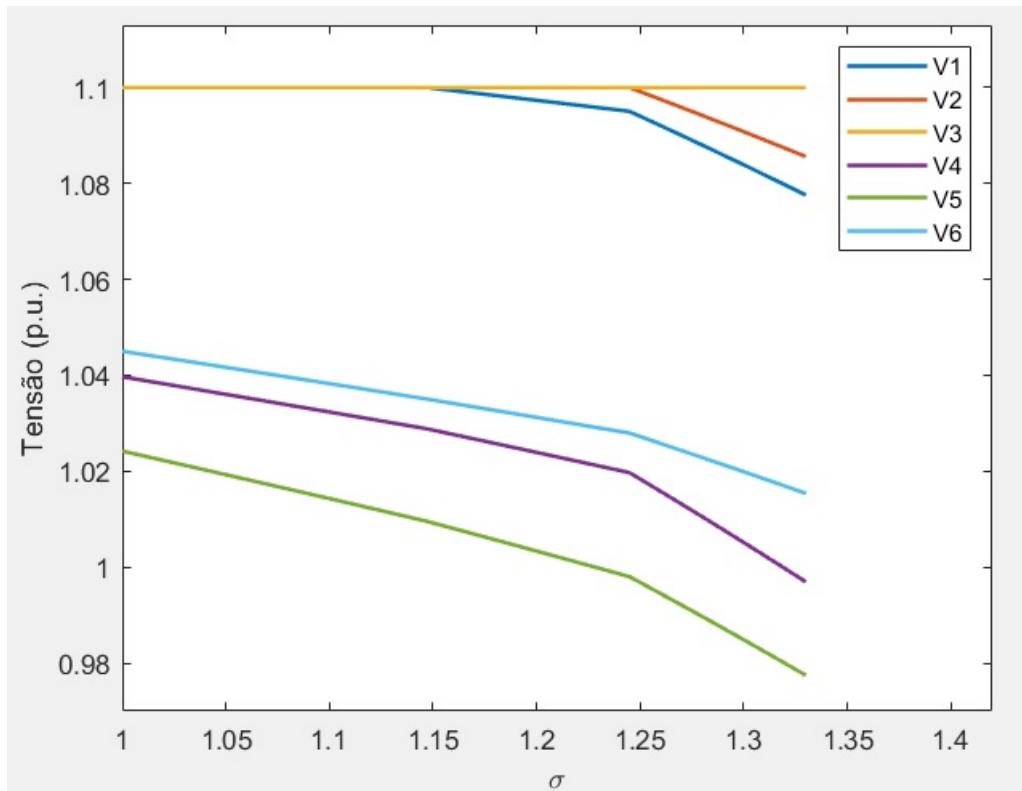


Figura 4.7: Curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa

É possível observar que

Note, na Figura 4.7, que em  $\sigma = 1,15$  e  $\sigma = 1,25$  as barras 1 e 2 atingiram os seus respectivos limites superiores de geração de potência reativa, caracterizando duas *BDIL*. Em  $\sigma = 1,3311$  o sistema atingiu o seu ponto de máximo carregamento, não apresentando mais solução para  $\sigma > 1,3311$ . O estado no sistema do ponto de máximo carregamento pode ser observado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,3311$ ) - Sistema de 6 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.0774	0	111.5144	40	0	0	0
2	2	1.0854	-1.5804	195.1501	90	0	0	0
3	2	1.1	-4.306	83.6358	120	0	0	0
4	0	0.99663	-4.5927	0	0	119.799	79.866	0
5	0	0.97718	-6.9369	0	0	133.11	93.177	0
6	0	1.0152	-6.9952	0	0	119.799	79.866	0
$K_G = 0.0628$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 17.5922								

Na Tabela 4.7 é possível observar que, no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,3311$ ), o limite superior de geração de potência reativa da barra 3 foi atingido (120 Mvar), caracterizando uma *BEIL*. O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema (Figura 4.8) ilustra duas descontinuidades associadas as *BDIL* (em  $\sigma = 1,15$  e  $\sigma = 1,25$ ). Já no ponto de máximo carregamento, diferente do que ocorre com uma *BSN*, a matriz Jacobiana não se tornou singular, o que é característico de uma *BEIL*.

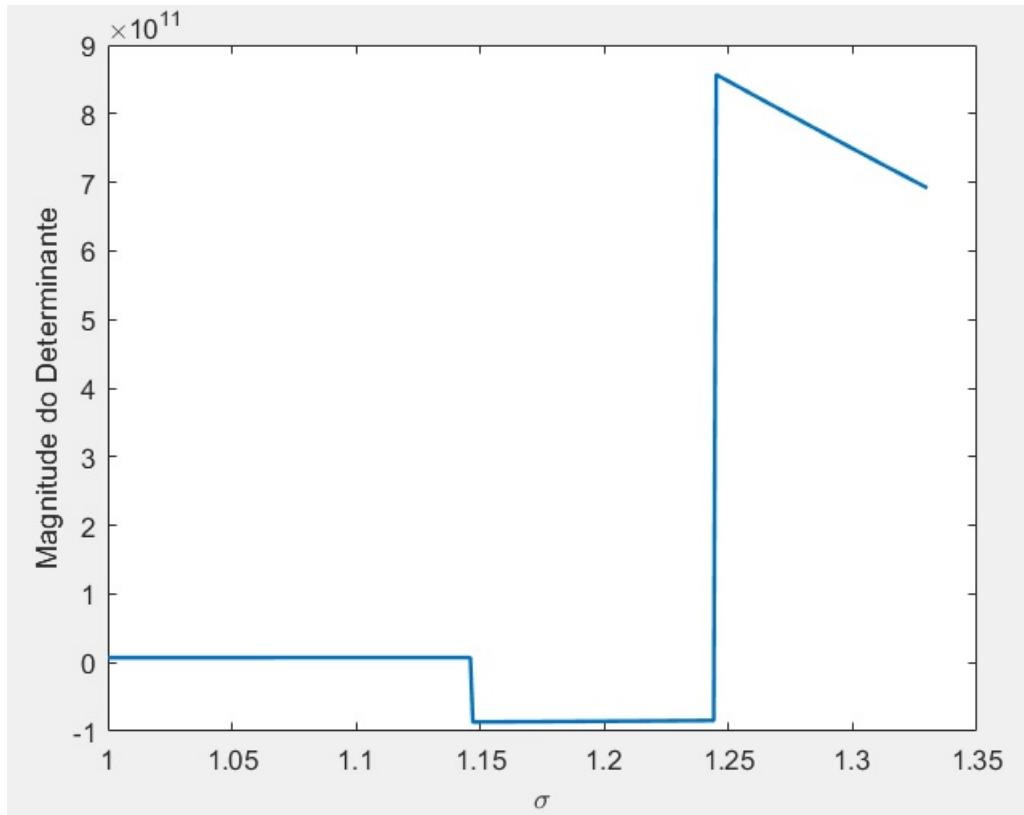


Figura 4.8: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras com limites de geração de potência reativa

### 4.2.3 Simulação do sistema de 6 barras pelo FCC com parâmetros de direção de aumento

A seguinte problemática refere-se aos dados utilizados na escrita do artigo *A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow*, citada no início deste relatório.

Os parâmetros  $P_S$  e  $P_D$ , representados nas equações (3.22) e (3.23) indicam como será o perfil de distribuição de energia entre as barras conforme o sistema é carregado. Tal valor varia de acordo com os lances da energia elétrica em um determinado leilão. Suponha que os vetores  $P_S$  e  $P_D$  sejam os seguintes para o sistema de 6 barras:

$$P_S = \begin{bmatrix} 0 & 25 & 25 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} MW$$

$$P_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 25 & 10 & 8,124 \end{bmatrix} MW$$

Além disso, suponha os seguintes limites operacionais:

$$-150Mvar < Q_{Gk} < 150Mvar, \forall k \in \{1, 2, 3\}$$

$$V_k > 0,9p.u., \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Por fim, a geração de potência ativa da barra *slack* não será definida inicialmente de forma a fechar o balanço de potência ativa, apresentando o valor constante de 90 MW (o valor que fecha o balanço de potência ativa inicialmente é 80 MW).

As curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis considerando os valores de  $P_S$  e  $P_D$  dados, além dos limites operacionais impostos, pode ser observada na Figura 4.9.

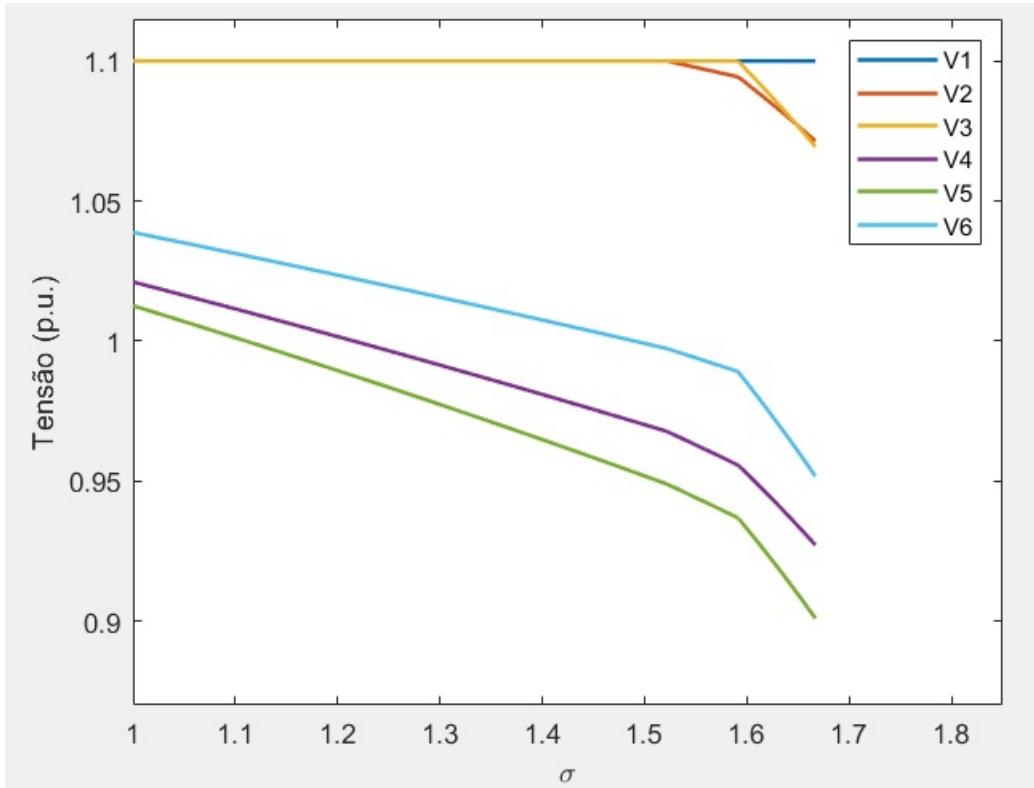


Figura 4.9: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 6 barras com vetores de direção de aumento

Note, na Figura 4.9, que em  $\sigma = 1,523$  e  $\sigma = 1,591$  as barras 2 e 3 atingiram os seus respectivos limites superiores de geração de potência reativa, caracterizando duas *BDIL*. Em  $\sigma = 1,66885$  o sistema atingiu o seu ponto de máximo carregamento, não apresentando mais solução para  $\sigma > 1,66885$ . O estado no sistema no ponto de máximo carregamento pode ser observado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,66885$ ) - Sistema de 6 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.1	0	156.2163	140.1671	0	0	0
2	0	1.0708	-0.79437	286.3966	150	0	0	0
3	0	1.0686	-3.3798	138.859	150	0	0	0
4	0	0.92636	-6.4267	0	0	191.9178	127.9452	0
5	0	0.9000	-8.7959	0	0	183.5735	128.5015	0
6	0	0.95068	-7.9688	0	0	163.7476	109.165	0
$K_G = 0.0669$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 42.2331								

Note, através da Tabela 4.8 e da Figura 4.9, que o sistema atingiu seu ponto de máximo carregamento devido a barra de carga 5, que atingiu o seu limite inferior de magnitude de tensão (0,9 p.u.). Esse ponto caracteriza uma *BEIL*, o que indica a

não presença de singularidade no determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema (Figura 4.10) nesse ponto.

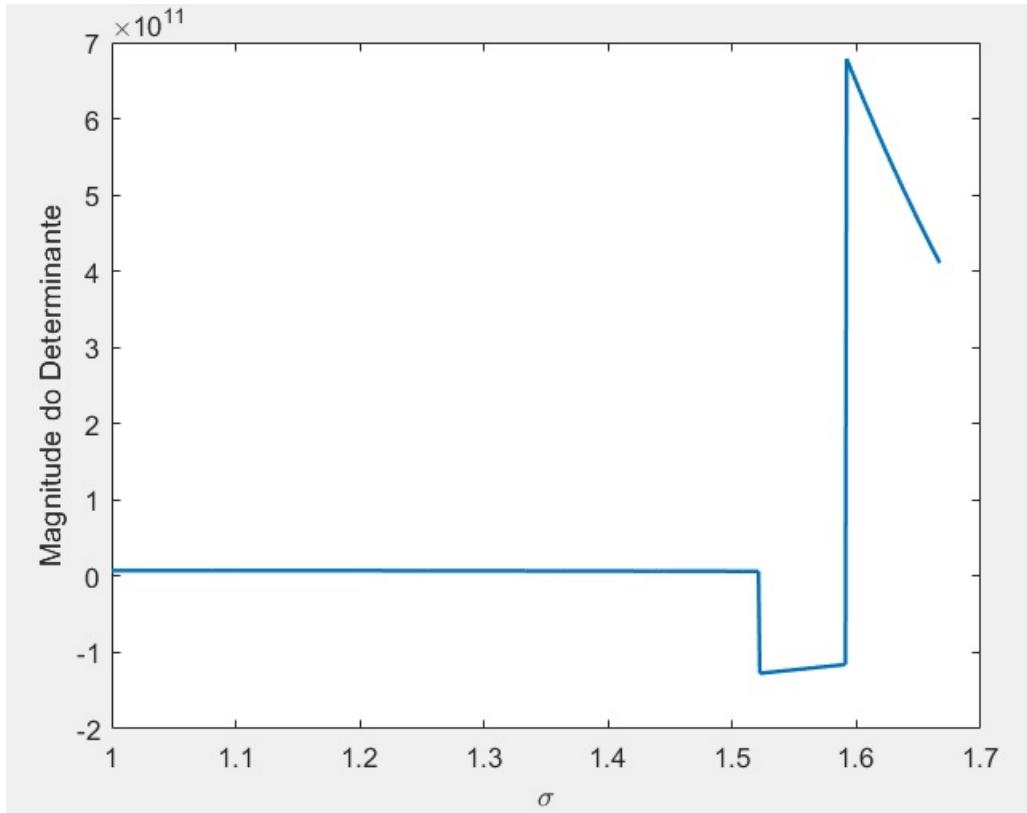


Figura 4.10: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 6 barras com vetores de direção de aumento

### 4.3 Sistema de 14 barras

O sistema de 14 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 4 barras de geração;
- 9 barras de carga;
- 20 linhas de transmissão;
- 3 transformadores em fase.

### 4.3.1 Sistema de 14 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 14 barras sem considerar os seus limites operacionais pode ser observada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 14 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	230.2298	-16.099	0	0	0
2	2	1.045	-4.9227	42.0511	42.7477	21.7	12.7	0
3	2	1.01	-12.6716	0	25.0714	94.2	19	0
4	0	1.0177	-10.2655	0	0	47.8	-3.9	0
5	0	1.0195	-8.7307	0	0	7.6	1.6	0
6	2	1.07	-14.1764	0	12.7291	11.2	7.5	0
7	0	1.0615	-13.3129	0	0	0	0	0
8	2	1.09	-13.3129	0	17.622	0	0	0
9	0	1.0559	-14.8922	0	0	29.5	16.6	0.19
10	0	1.051	-15.0513	0	0	9	5.8	0
11	0	1.0569	-14.7453	0	0	3.5	1.8	0
12	0	1.0552	-15.0309	0	0	6.1	1.6	0
13	0	1.0504	-15.1115	0	0	13.5	5.8	0
14	0	1.0355	-15.988	0	0	14.9	5	0
$K_G = 0.0513$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 13.2809								

Resolvendo o FCC para o sistema de 14 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.11).

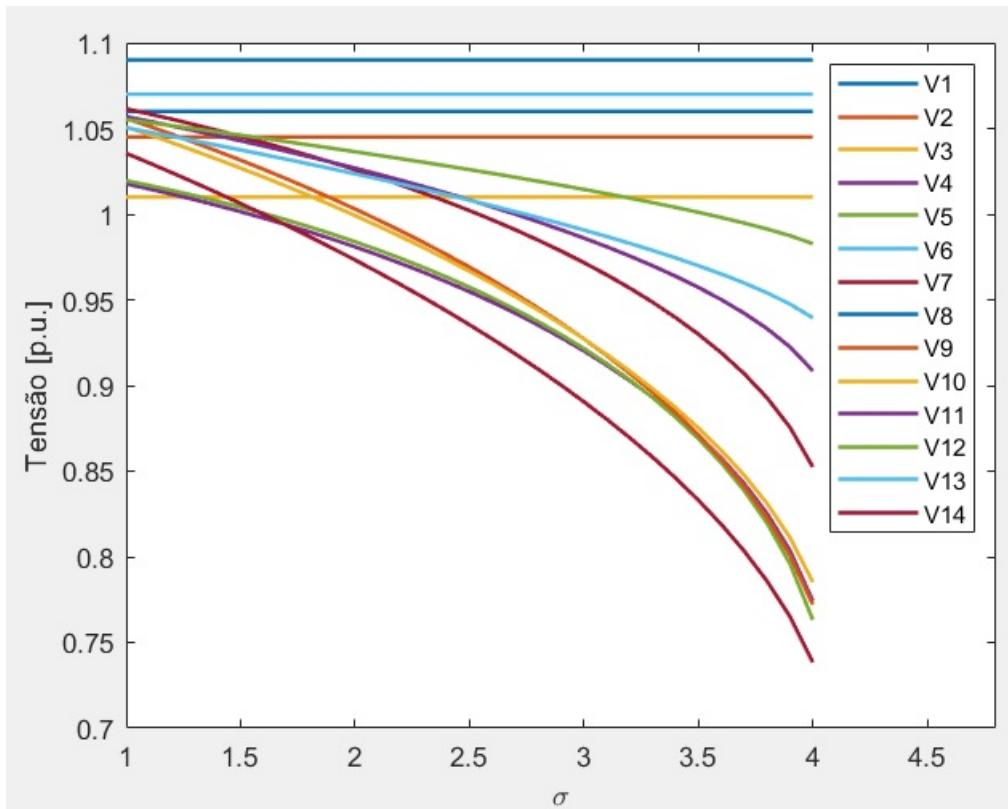


Figura 4.11: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 14 barras sem limites de geração de potência reativa

Em  $\sigma = 4,0$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais soluções para  $\sigma > 4,0$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.12. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4,0$ ).

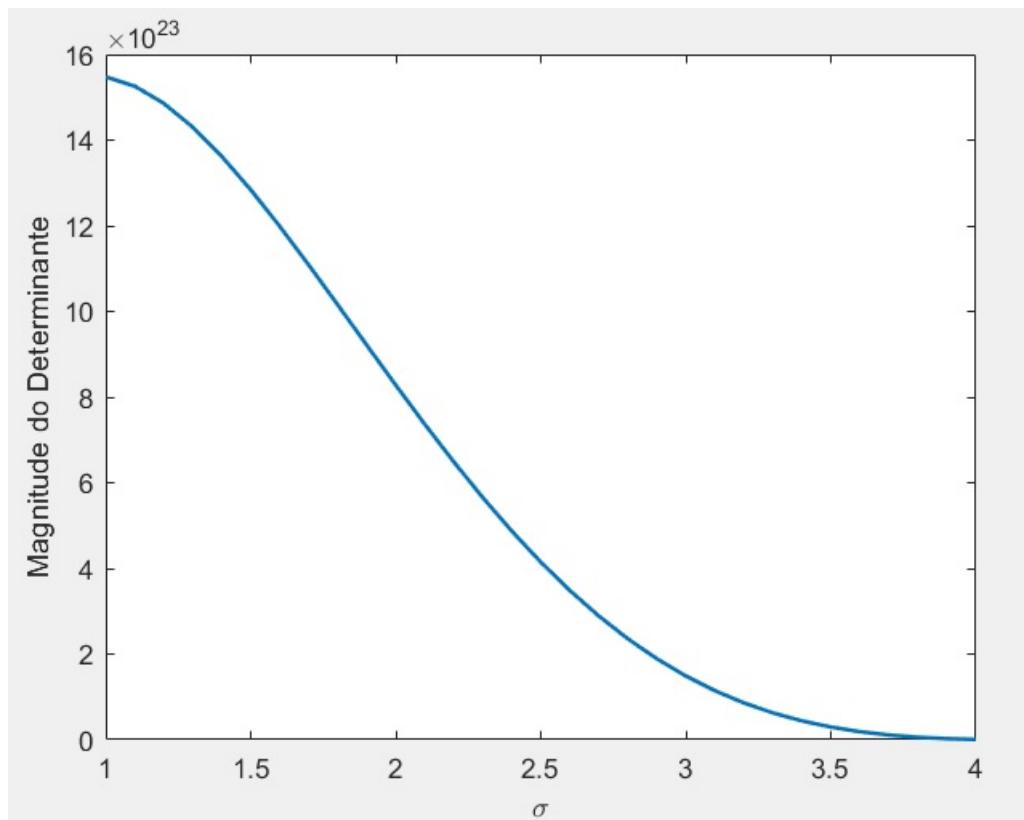


Figura 4.12: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 14 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4, 0$ ) pode ser visto na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 4, 0$ ) - Sistema de 14 barras

### 4.3.2 Sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração 2, 3, 6 e 8:

$$-40Mvar < Q_{G2} < 50Mvar$$

$$Q_{G3} < 40Mvar$$

$$-6Mvar < Q_{G6} < 24Mvar$$

$$-6Mvar < Q_{G8} < 24Mvar$$

As novas curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC considerando esses limites operacionais podem ser observadas na Figura 4.13.

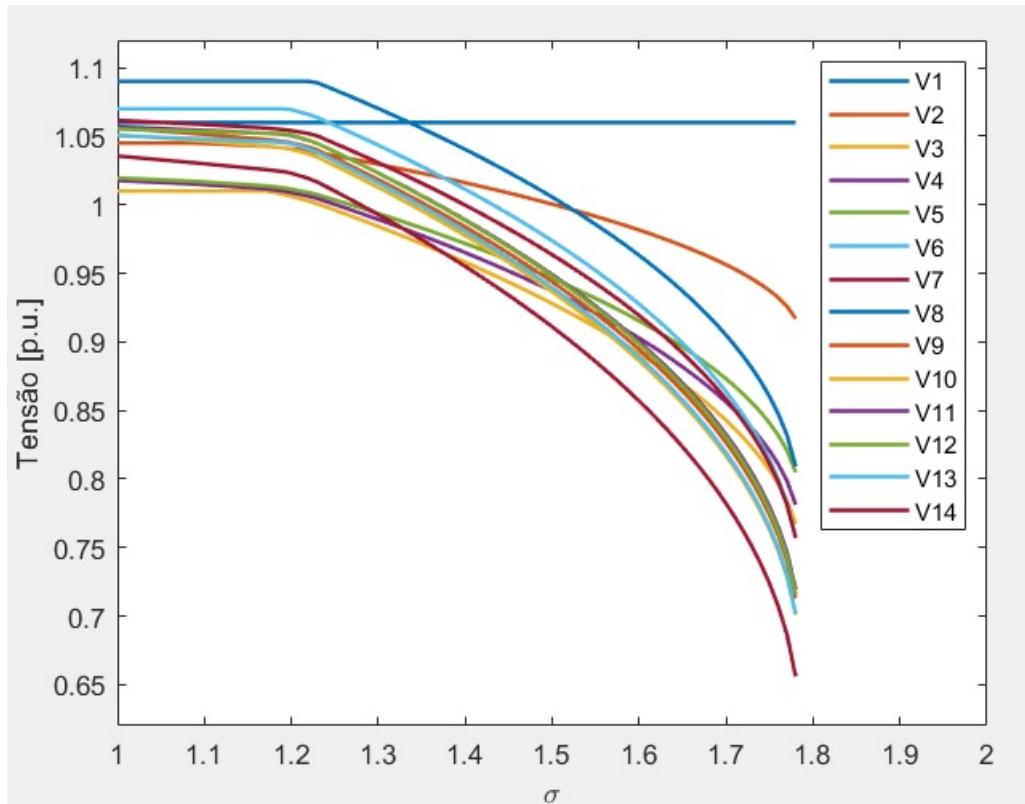


Figura 4.13: Curvas *PV* para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa

Note que, em  $\sigma = 1,22$ , a barra 8 atingiu seu limite superior de geração de

potência reativa. Nesse ponto, todas as barras de geração que possuem limites de geração de potência reativa já haviam atingido o seu limite. Entretanto, o sistema não entrou em colapso, caracterizando uma *BDIL* em todos os pontos em que uma das barras de geração alcançou esse limite. Em  $\sigma = 1,78$  o sistema atingiu o seu máximo carregamento, não apresentando mais solução para  $\sigma > 1,78$ . O estado do sistema no ponto de máximo carregamento pode ser observado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,78$ ) - Sistema de 14 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	452.0504	274.1998	0	0	0
2	2	0.91691	-8.7786	82.5663	50	38.626	22.606	0
3	2	0.76716	-29.5776	0	40	167.676	33.82	0
4	0	0.78111	-22.1487	0	0	85.084	-6.942	0
5	0	0.80486	-18.0704	0	0	13.528	2.848	0
6	2	0.75684	-36.0912	0	24	19.936	13.35	0
7	0	0.75693	-32.3358	0	0	0	0	0
8	2	0.80918	-32.3358	0	24	0	0	0
9	0	0.71284	-38.3195	0	0	52.51	29.548	0.19
10	0	0.70075	-39.0244	0	0	16.02	10.324	0
11	0	0.7192	-38.0068	0	0	6.23	3.204	0
12	0	0.71566	-39.2706	0	0	10.858	2.848	0
13	0	0.70161	-39.548	0	0	24.03	10.324	0
14	0	0.65596	-43.0355	0	0	26.522	8.9	0
$K_G = 0.2842$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 73,5967								

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.14. Note que, no ponto de máximo carregamento, a matriz Jacobiana se torna singular, o que caracteriza uma *BSN*.

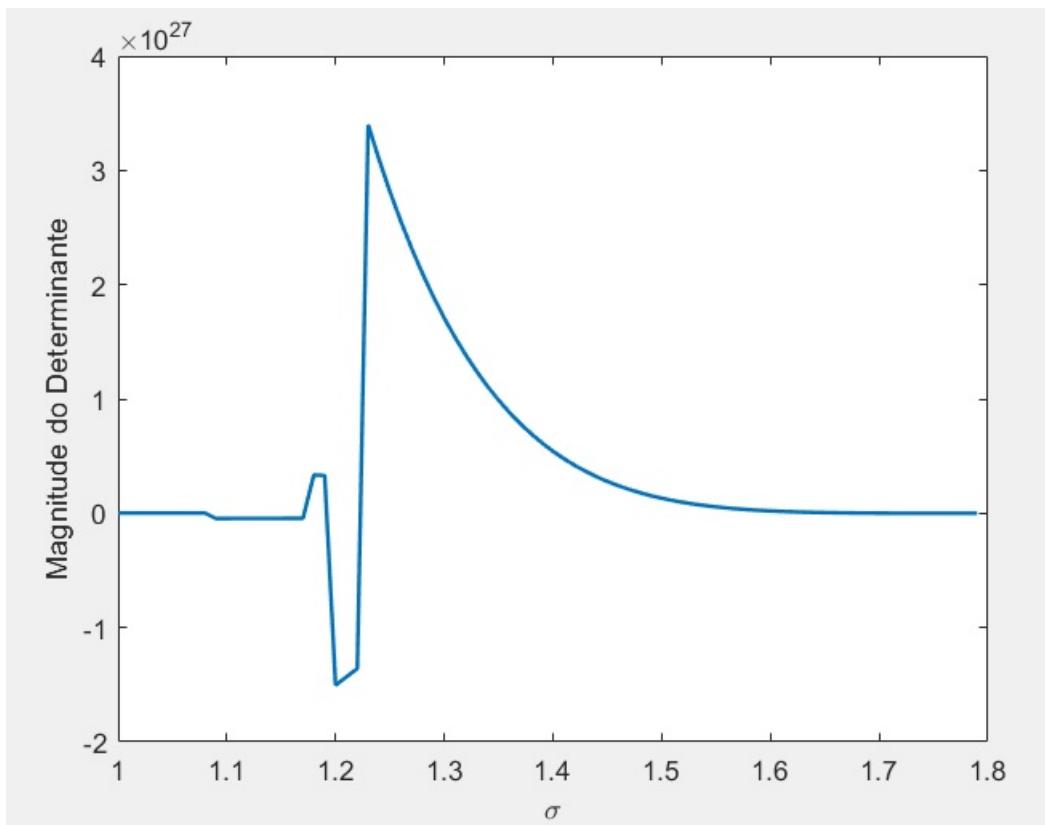


Figura 4.14: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 14 barras com limites de geração de potência reativa

## 4.4 Sistema de 30 barras

O sistema de 30 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 5 barras de geração;
- 24 barras de carga;
- 41 linhas de transmissão;
- 4 transformadores em fase.

### 4.4.1 Sistema de 30 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 30 barras sem considerar os seus limites operacionais pode ser observada na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 30 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	258.3429	-15.9771	0	0	0
2	2	1.043	-5.2799	42.4557	48.5627	21.7	12.7	0
3	0	1.0207	-7.4925	0	0	2.4	1.2	0
4	0	1.0117	-9.235	0	0	7.6	1.6	0
5	2	1.01	-14.1044	0	36.933	94.2	19	0
6	0	1.0102	-11.0108	0	0	0	0	0
7	0	1.0024	-12.8082	0	0	22.8	10.9	0
8	2	1.01	-11.7599	0	37.2063	30	30	0
9	0	1.0509	-14.056	0	0	0	0	0
10	0	1.0451	-15.6472	0	0	5.8	2	0.19
11	2	1.082	-14.056	0	16.1774	0	0	0
12	0	1.0571	-14.8927	0	0	11.2	7.5	0
13	2	1.071	-14.8927	0	10.627	0	0	0
14	0	1.0423	-15.7846	0	0	6.2	1.6	0
15	0	1.0377	-15.8763	0	0	8.2	2.5	0
16	0	1.0444	-15.4749	0	0	3.5	1.8	0
17	0	1.0399	-15.8092	0	0	9	5.8	0
18	0	1.0281	-16.4901	0	0	3.2	0.9	0
19	0	1.0256	-16.6636	0	0	9.5	3.4	0
20	0	1.0297	-16.4669	0	0	2.2	0.7	0
21	0	1.0327	-16.0899	0	0	17.5	11.2	0
22	0	1.0332	-16.0757	0	0	0	0	0
23	0	1.0272	-16.2665	0	0	3.2	1.6	0
24	0	1.0216	-16.4424	0	0	8.7	6.7	0.043
25	0	1.0173	-16.014	0	0	0	0	0
26	0	0.99965	-16.4337	0	0	3.5	2.3	0
27	0	1.0232	-15.4893	0	0	0	0	0
28	0	1.0068	-11.6348	0	0	0	0	0
29	0	1.0034	-16.7193	0	0	2.4	0.9	0
30	0	0.99192	-17.6021	0	0	10.6	1.9	0
$K_G = 0.0614$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 17.3986								

Resolvendo o FCC para o sistema de 30 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.15).

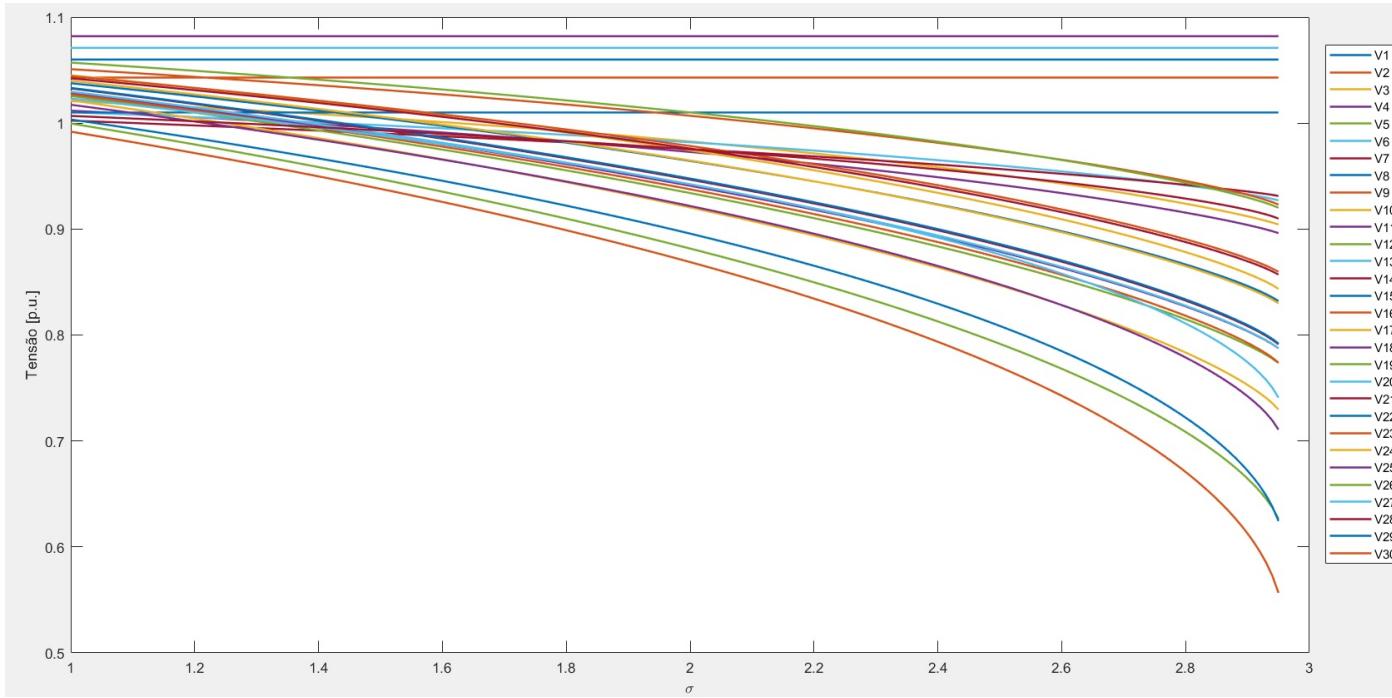


Figura 4.15: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras sem limites de geração de potência reativa

Em  $\sigma = 2,95$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 2,95$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.16. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,95$ ).

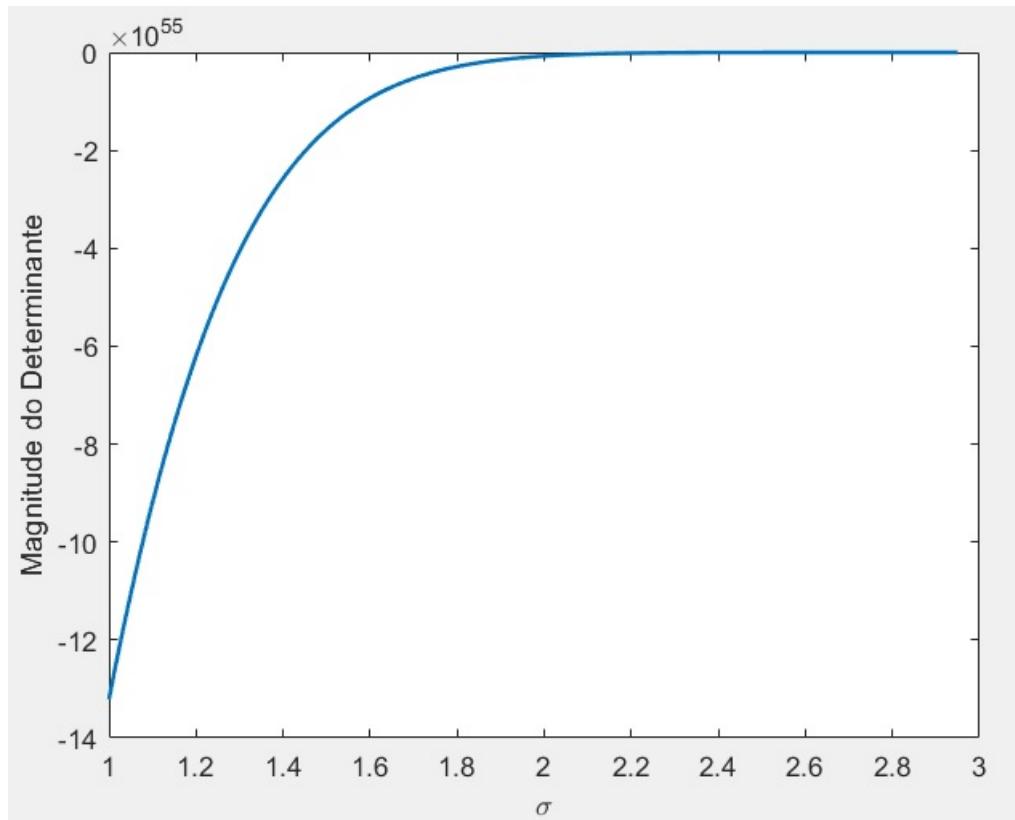


Figura 4.16: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 30 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,95$ ) pode ser visto na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,95$ ) - Sistema de 30 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	921.9787	14.8974	0	0	0
2	2	1.043	-19.9028	151.5166	420.9608	64.015	37.465	0
3	0	0.90428	-27.2683	0	0	7.08	3.54	0
4	0	0.89615	-34.331	0	0	22.42	4.72	0
5	2	1.01	-51.6657	0	256.8782	277.89	56.05	0
6	0	0.92703	-41.3406	0	0	0	0	0
7	0	0.93126	-47.4402	0	0	67.26	32.155	0
8	2	1.01	-45.3518	0	366.8572	88.5	88.5	0
9	0	0.92314	-53.3755	0	0	0	0	0
10	0	0.84355	-60.4931	0	0	17.11	5.9	0.19
11	2	1.082	-53.3755	0	82.6385	0	0	0
12	0	0.92012	-58.0474	0	0	33.04	22.125	0
13	2	1.071	-58.0474	0	115.4266	0	0	0
14	0	0.85703	-61.7856	0	0	18.29	4.72	0
15	0	0.83205	-62.0317	0	0	24.19	7.375	0
16	0	0.85967	-60.0749	0	0	10.325	5.31	0
17	0	0.8299	-61.3703	0	0	26.55	17.11	0
18	0	0.78741	-64.8238	0	0	9.44	2.655	0
19	0	0.77359	-65.6082	0	0	28.025	10.03	0
20	0	0.78758	-64.5481	0	0	6.49	2.065	0
21	0	0.79122	-62.6525	0	0	51.625	33.04	0
22	0	0.79195	-62.5948	0	0	0	0	0
23	0	0.77385	-63.8205	0	0	9.44	4.72	0
24	0	0.72961	-64.6159	0	0	25.665	19.765	0.043
25	0	0.71069	-64.1807	0	0	0	0	0
26	0	0.62679	-67.0082	0	0	10.325	6.785	0
27	0	0.74087	-62.3618	0	0	0	0	0
28	0	0.90988	-43.5474	0	0	0	0	0
29	0	0.62447	-70.4328	0	0	7.08	2.655	0
30	0	0.55663	-77.9006	0	0	31.27	5.605	0
$K_G = 0.8379$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 237.4653								

#### 4.4.2 Sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração 2, 5, 8, 11 e 13:

$$-40Mvar < Q_{G2} < 50Mvar$$

$$-40Mvar < Q_{G5} < 40Mvar$$

$$-10Mvar < Q_{G8} < 40Mvar$$

$$-6Mvar < Q_{G11} < 24Mvar$$

$$-6Mvar < Q_{G13} < 24Mvar$$

As novas curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC considerando os limites de geração de potência reativa podem ser observadas na Figura 4.17. A Figura 4.18 ilustra o FCC apenas para as barras de geração (*slack + PV*).

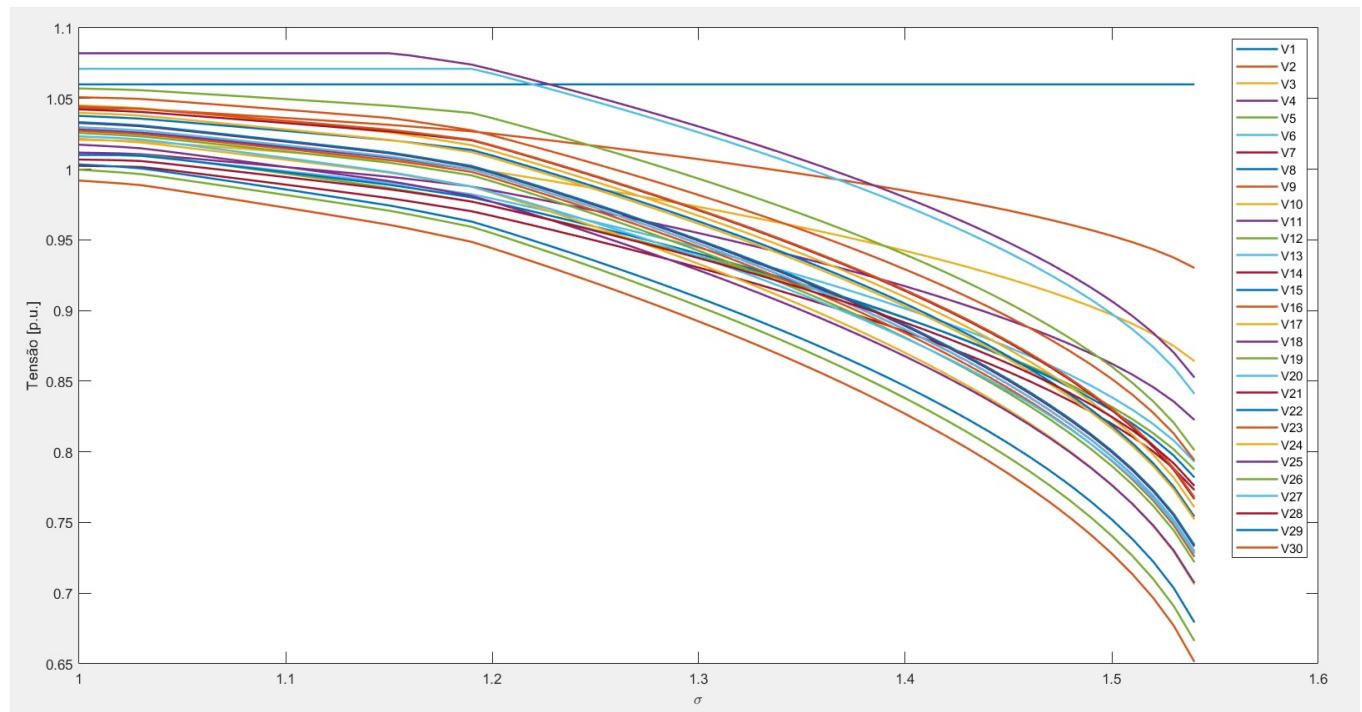


Figura 4.17: Curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa

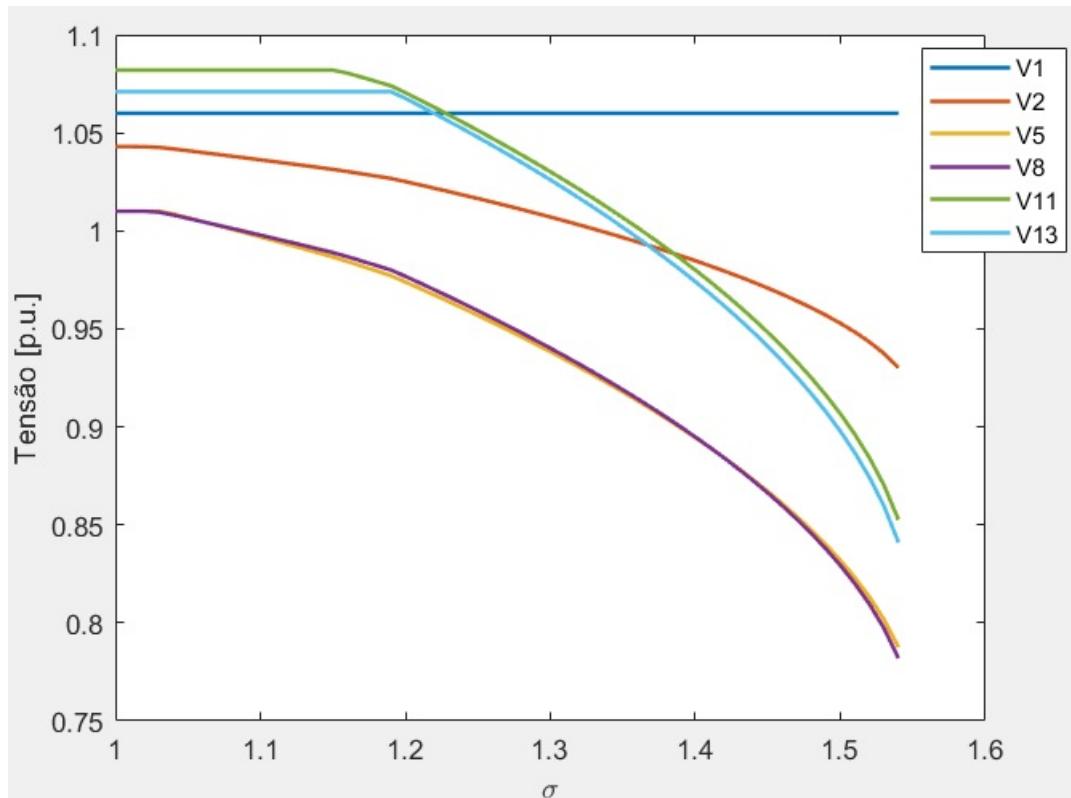


Figura 4.18: Curvas  $PV$  das barras de geração para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa

De maneira similar ao que ocorreu no sistema de 14 barras, todas as barras de geração que apresentavam limites de geração de potência reativa atingiram o seu limite superior (a última a atingir foi a barra 13 em  $\sigma = 1,2$ ) antes do ponto de máximo carregamento do sistema, caracterizando *BDIL* em todos os pontos em que uma das barras de geração alcançou esse limite. Em  $\sigma = 1,54$  o sistema atingiu o seu máximo carregamento, não apresentando mais solução para  $\sigma > 1,54$ . O estado do sistema no ponto de máximo carregamento pode ser observado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1.54$ ) - Sistema de 30 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	434.8607	252.5305	0	0	0
2	2	0.93015	-7.9053	71.4644	50	33.418	19.558	0
3	0	0.8642	-12.3811	0	0	3.696	1.848	0
4	0	0.82258	-15.7812	0	0	11.704	2.464	0
5	2	0.7875	-27.1942	0	40	145.068	29.26	0
6	0	0.79308	-19.5763	0	0	0	0	0
7	0	0.77301	-24.0151	0	0	35.112	16.786	0
8	2	0.78189	-21.2688	0	40	46.2	46.2	0
9	0	0.794	-27.6453	0	0	0	0	0
10	0	0.76072	-32.1839	0	0	8.932	3.08	0.19
11	2	0.85256	-27.6453	0	24	0	0	0
12	0	0.80108	-30.4772	0	0	17.248	11.55	0
13	2	0.84104	-30.4772	0	24	0	0	0
14	0	0.76657	-32.9358	0	0	9.548	2.464	0
15	0	0.75409	-33.1037	0	0	12.628	3.85	0
16	0	0.76781	-31.8803	0	0	5.39	2.772	0
17	0	0.75221	-32.7317	0	0	13.86	8.932	0
18	0	0.72951	-34.8539	0	0	4.928	1.386	0
19	0	0.72192	-35.3367	0	0	14.63	5.236	0
20	0	0.72978	-34.7016	0	0	3.388	1.078	0
21	0	0.73306	-33.4892	0	0	26.95	17.248	0
22	0	0.73402	-33.4406	0	0	0	0	0
23	0	0.72568	-34.1355	0	0	4.928	2.464	0
24	0	0.7062	-34.4957	0	0	13.398	10.318	0.043
25	0	0.70718	-33.6925	0	0	0	0	0
26	0	0.66618	-35.0877	0	0	5.39	3.542	0
27	0	0.72799	-32.3738	0	0	0	0	0
28	0	0.77589	-21.0127	0	0	0	0	0
29	0	0.67933	-36.3052	0	0	3.696	1.386	0
30	0	0.65132	-39.3602	0	0	16.324	2.926	0
$K_G = 0.2466$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 69.8891								

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.19. Note que, no ponto de máximo carregamento, a matriz Jacobiana se torna singular, o que caracteriza uma *BSN*.

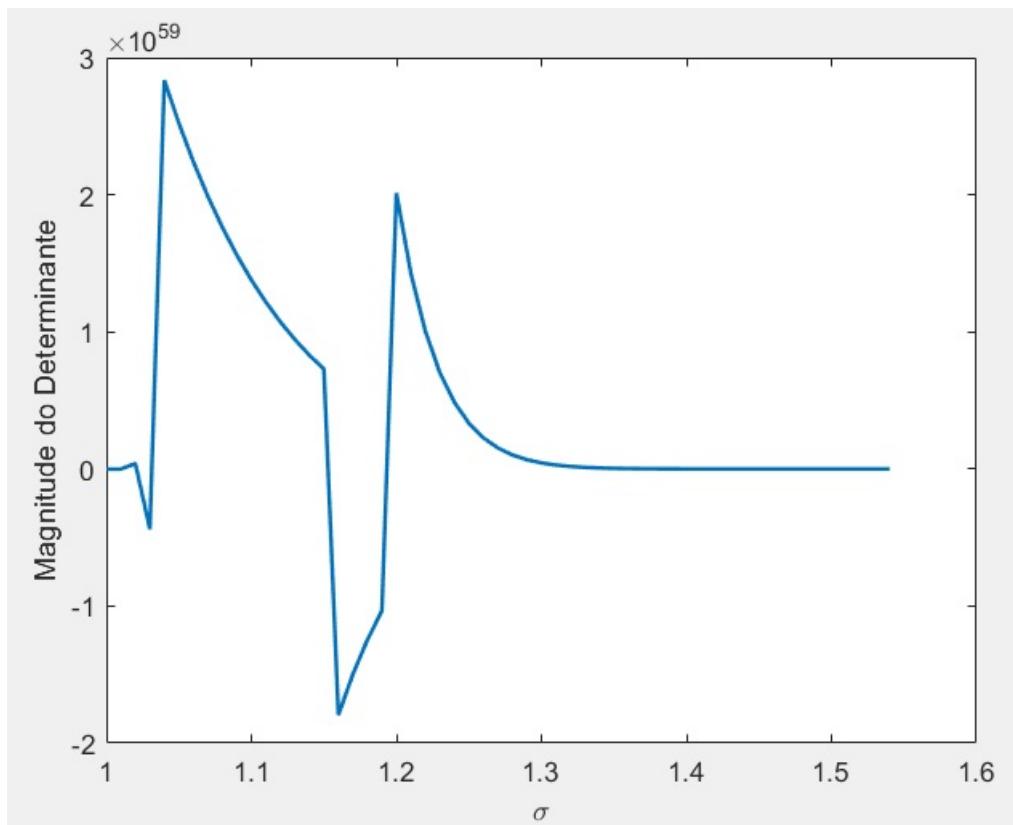


Figura 4.19: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 30 barras com limites de geração de potência reativa

## 4.5 Sistema 41 barras (CIGRE-32)

O sistema de 41 barras (CIGRE-32) apresenta as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 19 barras de geração;
- 21 barras de carga;
- 52 linhas de transmissão;
- 15 transformadores em fase.

### 4.5.1 Sistema de 41 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 41 barras sem considerar os seus limites operacionais pode ser observada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema de 41 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G(\text{Mvar})$	$P_L(MW)$	$Q_L(\text{Mvar})$	$b_k^{sh}(p.u.)$
4011	3	1.1	0	-12.9802	432.8757	0	0	0
4071	2	1.1	-2.8639	501.2698	-146.0322	300	100	0
4072	2	1.1	-7.0312	1421.7151	488.4061	2000	500	0
4012	2	1.1	3.1302	640.5648	1249.682	0	0	0
4021	2	1.1	-13.9649	300.764	-305.8043	0	0	0
4031	2	1.1	-14.1959	350.8932	510.0119	0	0	0
4042	2	1.1	-29.2531	701.7863	620.3224	0	0	0
4041	2	1.1	-23.7756	300.764	410.7978	0	0	0
4062	2	1.1	-20.5911	601.5281	155.5639	0	0	0
4063	2	1.1	-16.2056	1203.0668	230.9817	0	0	0
4051	2	1	-38.6341	701.7863	225.6919	0	0	0
4047	2	1.1	-32.6945	820.8163	464.9203	0	0	0
2032	2	1.1	2.6365	852.1737	-112.8262	200	50	0
1013	2	1.1	11.696	579.3433	-202.5545	100	40	0
1012	2	1.1	6.5095	802.0446	-1063.5356	300	100	0
1014	2	1.1	13.3217	449.1249	-55.6479	0	0	0
1022	2	1.1	0.14508	250.6349	-146.7438	280	95	0
1021	2	1.1	29.43	601.5281	55.4578	0	0	0
1043	2	1.1	-43.9301	200.5058	270.5774	230	100	0
1042	2	1.1	-33.5073	401.0223	0.17119	300	80	0
4022	0	1.0584	-3.2784	0	0	0	0	0
4032	0	1.1075	-18.6974	0	0	0	0	0
4043	0	1.0585	-34.896	0	0	0	0	0
4044	0	1.042	-34.2776	0	0	0	0	0
4045	0	1.0109	-37.5704	0	0	0	0	0
4046	0	1.0602	-36.0726	0	0	0	0	0
4061	0	1.089	-24.0526	0	0	0	0	0
2031	0	1.1636	-11.0636	0	0	100	30	0
1011	0	1.1716	1.5465	0	0	200	80	0
1041	0	1.0382	-48.4446	0	0	600	200	0
1044	0	1.1256	-37.2647	0	0	800	300	0
1045	0	1.094	-40.2366	0	0	700	250	0
42	0	1.0305	-32.0139	0	0	400	125.7	0
41	0	1.0738	-26.4273	0	0	540	128.8	0
62	0	1.0305	-23.7772	0	0	300	80.02	0
63	0	1.0209	-19.3678	0	0	590	256.2	0
51	0	1.0318	-41.5957	0	0	800	253.2	0
47	0	1.0963	-34.5725	0	0	100	45.19	0
43	0	1.0951	-37.8618	0	0	900	238.8	0
46	0	1.0941	-39.3659	0	0	700	193.7	0
61	0	1.0209	-27.5723	0	0	500	112.3	0

Resolvendo o FCC para o sistema de 41 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.20).

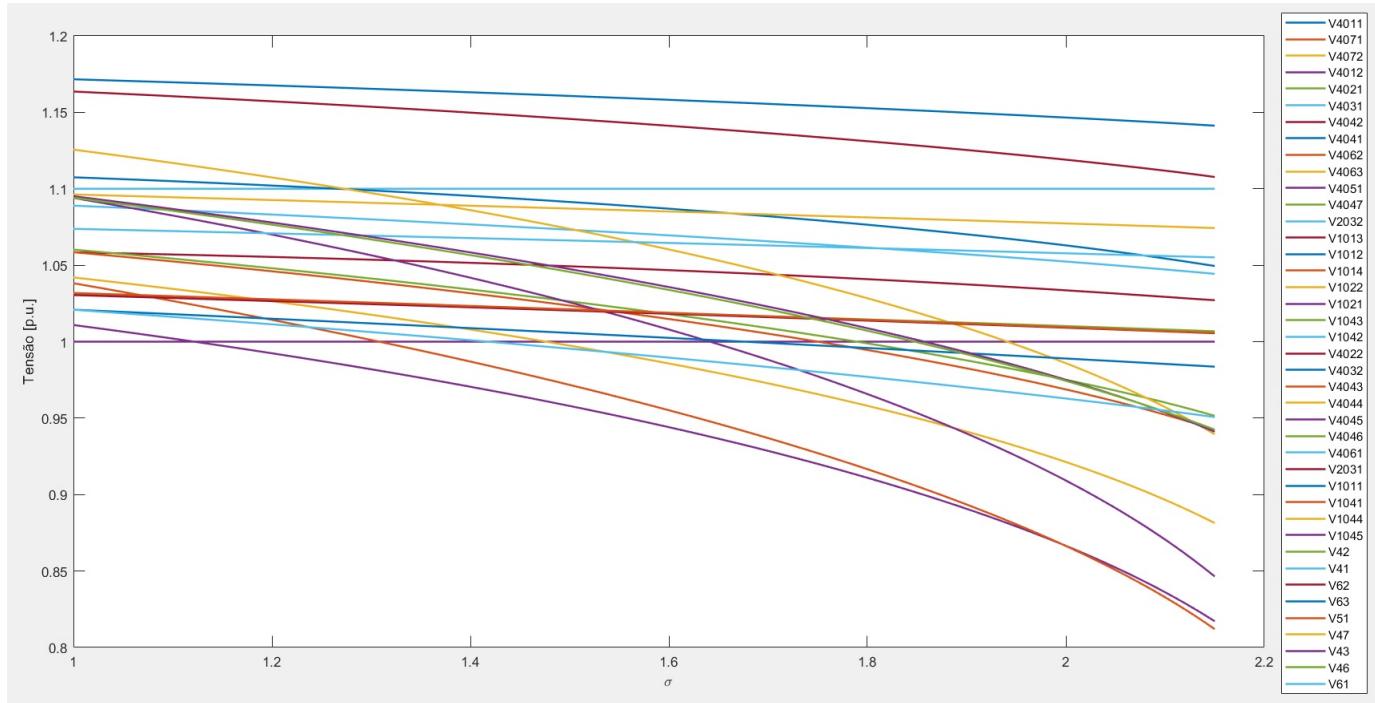


Figura 4.20: Curvas *PV* para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 41 barras sem limites de geração de potência reativa

Em  $\sigma = 2,15$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma *BSN*. A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 2,15$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.21. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,15$ ).

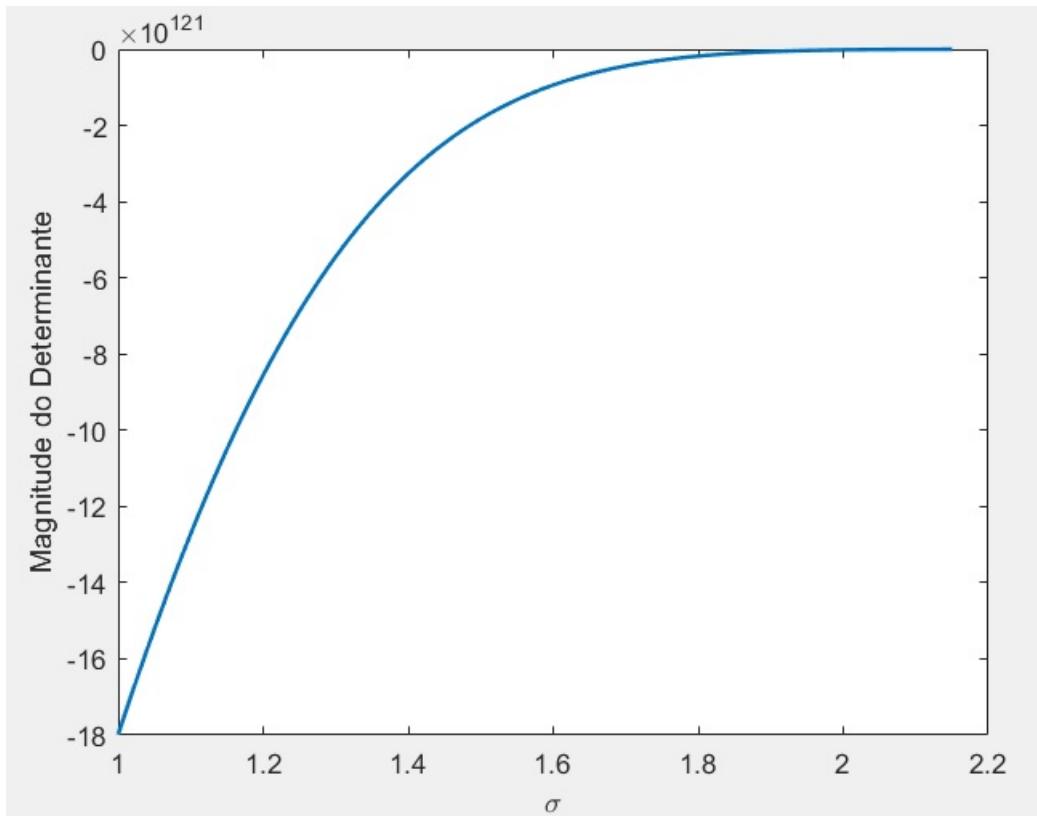


Figura 4.21: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 41 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,15$ ) pode ser visto na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2, 15$ ) - Sistema de 41 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
4011	3	1.1	0	-29.4853	1388.0804	0	0	0
4071	2	1.1	-3.3519	1138.6601	21.7456	645	215	0
4072	2	1.1	-11.1076	3229.4987	1165.0891	4300	1075	0
4012	2	1.1	7.2479	1455.0757	1476.0623	0	0	0
4021	2	1.1	-34.9176	683.2009	452.4387	0	0	0
4031	2	1.1	-35.0089	797.0718	2570.8496	0	0	0
4042	2	1.1	-72.4963	1594.1436	3680.8714	0	0	0
4041	2	1.1	-55.9979	683.2009	2110.1853	0	0	0
4062	2	1.1	-44.4726	1366.4018	1382.6101	0	0	0
4063	2	1.1	-34.005	2732.8279	709.079	0	0	0
4051	2	1	-98.0648	1594.1436	1672.3771	0	0	0
4047	2	1.1	-81.0025	1864.5263	1973.3868	0	0	0
2032	2	1.1	5.3593	1935.7561	324.7974	430	107.5	0
1013	2	1.1	26.7195	1316.0079	88.0787	215	86	0
1012	2	1.1	15.0198	1821.8853	-709.3998	645	215	0
1014	2	1.1	30.4257	1020.2102	-56.7687	0	0	0
1022	2	1.1	-3.3169	569.3301	1424.6352	602	204.25	0
1021	2	1.1	88.5999	1366.4018	1036.33	0	0	0
1043	2	1.1	-117.536	455.4592	1952.1619	494.5	215	0
1042	2	1.1	-84.6244	910.9426	329.3227	645	172	0
4022	0	1.0271	-9.7979	0	0	0	0	0
4032	0	1.0495	-45.1455	0	0	0	0	0
4043	0	0.94238	-86.3789	0	0	0	0	0
4044	0	0.88138	-85.3075	0	0	0	0	0
4045	0	0.81715	-94.9904	0	0	0	0	0
4046	0	0.95151	-89.3078	0	0	0	0	0
4061	0	1.0443	-53.2045	0	0	0	0	0
2031	0	1.1077	-27.6887	0	0	215	64.5	0
1011	0	1.1413	3.5924	0	0	430	172	0
1041	0	0.81201	-130.9491	0	0	1290	430	0
1044	0	0.93941	-94.983	0	0	1720	645	0
1045	0	0.84643	-103.83	0	0	1505	537.5	0
42	0	1.0068	-78.5808	0	0	860	270.255	0
41	0	1.0551	-61.8079	0	0	1161	276.92	0
62	0	1.0055	-51.5068	0	0	645	172.043	0
63	0	0.98365	-41.0758	0	0	1268.5	550.83	0
51	0	1.0057	-104.6092	0	0	1720	544.38	0
47	0	1.0743	-85.1257	0	0	215	97.1585	0
43	0	0.94119	-94.7384	0	0	1935	513.42	0
46	0	0.94246	-98.5014	0	0	1505	416.455	0
61	0	0.95067	-61.7038	0	0	1075	241.445	0

$$K_G = 0.2728$$

Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 2984.3

#### 4.5.2 Sistema de 41 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração (Tabela 4.17), fornecidos pelo banco de dados do CIGRE-32.

Tabela 4.17: Limites de geração de potência reativa para o sistema de 41 barras

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}(Mvar)$	$Q_{Gmax}(Mvar)$
4011	-100	500
4071	-50	250
4072	-300	1000
4012	-160	400
4021	-30	150
4031	-40	175
4042	0	350
4041	-200	300
4062	0	300
4063	0	600
4051	0	350
4047	0	600
2032	-80	425
1013	-50	300
1012	-80	400
1014	-100	350
1022	-25	125
1021	-160	300
1043	-20	100
1042	-40	200

Note, através do estado do sistema no caso base sem limites de geração de potência reativa (Tabela 4.16) e na Tabela 4.17, que ilustra os limites de geração de potência reativa, que várias barras já ultrapassaram seus respectivos limites em  $\sigma = 1$ . Vide a barra 4071, por exemplo, cujo limite inferior é  $-50\text{ Mvar}$  e, no caso base, apresentou  $Q_{G2} = -146,0322\text{Mvar}$ .

Simulando o sistema com os limites de geração de potência reativa, o sistema já não apresente solução para  $\sigma = 1$ . O caso  $\sigma < 1$  indica que o sistema não suporta nem o caso base.

Realizando o FCC com  $\sigma \in (0, 1)$ , o sistema também não apresenta nenhuma solução. Isso indica que os limites de geração de potência reativa fornecidos pelo banco de dados do CIGRE-32 tornam o sistema impraticável.

## 4.6 Sistema de 57 barras

O sistema de 57 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 6 barras de geração;
- 50 barras de carga;
- 80 linhas de transmissão;
- 15 transformadores em fase.

### 4.6.1 Sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 57 barras sem considerar os seus limites operacionais pode ser observada na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 57 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.04	0	460.6021	143.393	55	17	0
2	2	1.01	-1.1027	0	4.3308	3	88	0
3	2	0.985	-5.6286	40.8698	8.9485	41	21	0
4	0	0.97974	-6.8311	0	0	0	0	0
5	0	0.97577	-7.9242	0	0	13	4	0
6	2	0.98	-8.0112	0	5.8867	75	2	0
7	0	0.98348	-6.8352	0	0	0	0	0
8	2	1.005	-3.6412	459.7847	65.0666	150	22	0
9	2	0.98	-8.9377	0	12.6235	121	26	0
10	0	0.98463	-10.8985	0	0	5	2	0
11	0	0.9722	-9.6412	0	0	0	0	0
12	2	1.015	-9.9658	316.7406	139.3307	377	24	0
13	0	0.97677	-9.3284	0	0	18	2.3	0
14	0	0.96766	-8.938	0	0	10.5	5.3	0
15	0	0.98593	-6.8482	0	0	22	5	0
16	0	1.0126	-8.485	0	0	43	3	0
17	0	1.0165	-5.1938	0	0	42	8	0
18	0	0.98564	-14.2348	0	0	27.2	9.8	0.1

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
19	0	0.96265	-14.748	0	0	3.3	0.6	0
20	0	0.96077	-14.3088	0	0	2.3	1	0
21	0	1.0022	-12.7379	0	0	0	0	0
22	0	1.0046	-12.5232	0	0	0	0	0
23	0	1.0032	-12.5642	0	0	6.3	2.1	0
24	0	0.99543	-12.5177	0	0	0	0	0
25	0	0.95115	-21.3627	0	0	6.3	3.2	0.059
26	0	0.9554	-12.2005	0	0	0	0	0
27	0	0.97963	-10.7499	0	0	9.3	0.5	0
28	0	0.99535	-9.7235	0	0	4.6	2.3	0
29	0	1.0093	-9.0184	0	0	17	2.6	0
30	0	0.93344	-21.6796	0	0	3.6	1.8	0
31	0	0.91242	-21.7022	0	0	5.8	2.9	0
32	0	0.93701	-19.7658	0	0	1.6	0.8	0
33	0	0.93469	-19.8065	0	0	3.8	1.9	0
34	0	0.94885	-14.0752	0	0	0	0	0
35	0	0.95743	-13.7427	0	0	6	3	0
36	0	0.9684	-13.4147	0	0	0	0	0
37	0	0.97824	-13.1908	0	0	0	0	0
38	0	1.0079	-12.3901	0	0	14	7	0
39	0	0.97624	-13.2339	0	0	0	0	0
40	0	0.96556	-13.435	0	0	0	0	0
41	0	0.99318	-13.6311	0	0	6.3	3	0
42	0	0.96231	-15.1204	0	0	7.1	4.4	0
43	0	1.0074	-10.8303	0	0	2	1	0
44	0	1.0124	-11.5156	0	0	12	1.8	0
45	0	1.0328	-8.9401	0	0	0	0	0
46	0	1.0564	-10.7317	0	0	0	0	0
47	0	1.0292	-12.146	0	0	29.7	11.6	0
48	0	1.0231	-12.2463	0	0	0	0	0
49	0	1.0327	-12.5384	0	0	18	8.5	0
50	0	1.0203	-12.9725	0	0	21	10.5	0
51	0	1.0504	-12.0121	0	0	18	5.3	0
52	0	0.97954	-10.7713	0	0	4.9	2.2	0
53	0	0.97021	-11.5406	0	0	20	10	0.063
54	0	0.99585	-11.0292	0	0	4.1	1.4	0
55	0	1.0306	-10.1487	0	0	6.8	3.4	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
56	0	0.96311	-15.6807	0	0	7.6	2.2	0
57	0	0.95903	-16.2254	0	0	6.7	2	0
$K_G = 0.0217$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 27.1971								

Resolvendo o FCC para o sistema de 57 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, obtém-se as seguintes curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema (Figura 4.22 - barras 1 a 29 / Figura 4.23 - barras 30 a 57).

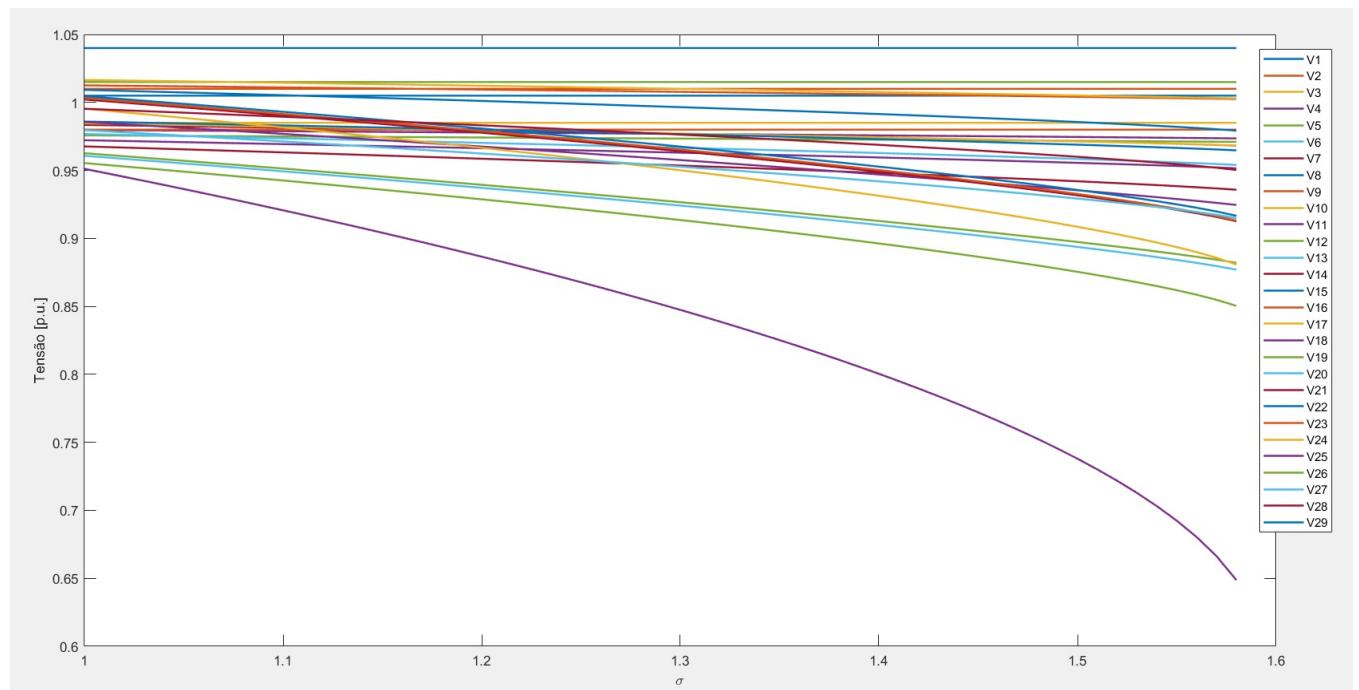


Figura 4.22: Curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29

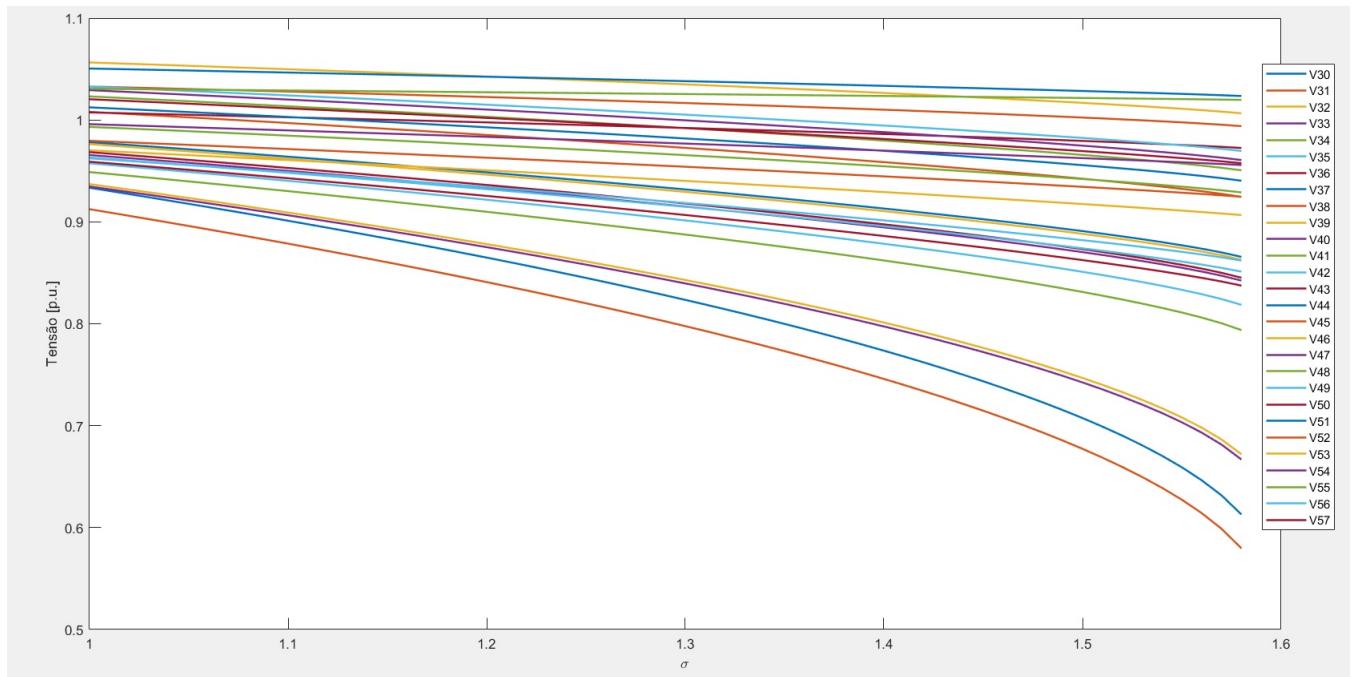


Figura 4.23: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 57

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.28. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,58$ ).

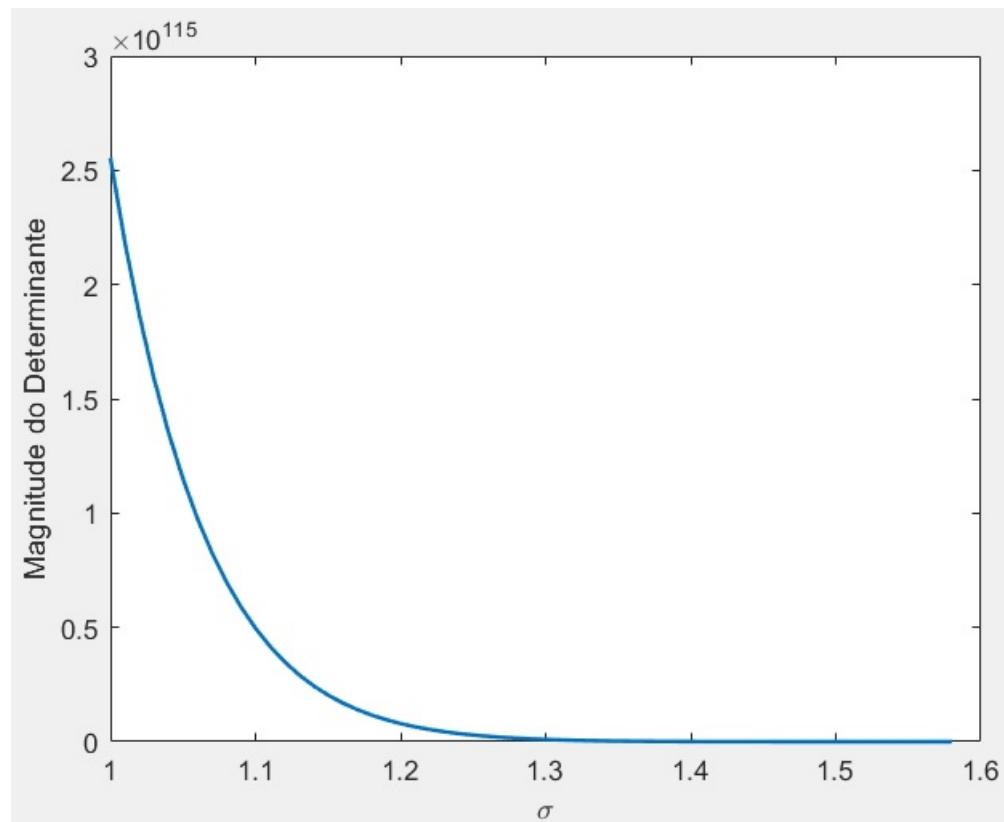


Figura 4.24: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 57 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,58$ ) pode ser visto na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,58$ ) - Sistema de 57 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G (Mvar)$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.04	0	739.2552	169.3029	86.9	26.86	0
2	2	1.01	-2.0908	0	61.1571	4.74	139.04	0
3	2	0.985	-9.6666	65.595	86.8683	64.78	33.18	0
4	0	0.97355	-11.5283	0	0	0	0	0
5	0	0.971	-13.3429	0	0	20.54	6.32	0
6	2	0.98	-13.5232	0	45.54	118.5	3.16	0
7	0	0.96826	-11.4713	0	0	0	0	0
8	2	1.005	-6.3055	737.9433	82.4604	237	34.76	0
9	2	0.98	-15.048	0	113.9935	191.18	41.08	0
10	0	0.9684	-18.0423	0	0	7.9	3.16	0
11	0	0.95158	-16.012	0	0	0	0	0
12	2	1.015	-16.2951	508.3609	236.3368	595.66	37.92	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
13	0	0.95404	-15.3881	0	0	28.44	3.634	0
14	0	0.93578	-14.7264	0	0	16.59	8.374	0
15	0	0.96477	-11.2929	0	0	34.76	7.9	0
16	0	1.0025	-13.8345	0	0	67.94	4.74	0
17	0	1.003	-8.4376	0	0	66.36	12.64	0
18	0	0.9246	-24.188	0	0	42.976	15.484	0.1
19	0	0.88202	-25.0689	0	0	5.214	0.948	0
20	0	0.87699	-24.1995	0	0	3.634	1.58	0
21	0	0.91262	-21.2543	0	0	0	0	0
22	0	0.91662	-20.8427	0	0	0	0	0
23	0	0.91309	-20.878	0	0	9.954	3.318	0
24	0	0.88077	-20.0605	0	0	0	0	0
25	0	0.64866	-43.4994	0	0	9.954	5.056	0.059
26	0	0.85036	-19.4351	0	0	0	0	0
27	0	0.9149	-17.6347	0	0	14.694	0.79	0
28	0	0.95035	-16.1366	0	0	7.268	3.634	0
29	0	0.97925	-15.1393	0	0	26.86	4.108	0
30	0	0.61292	-44.8451	0	0	5.688	2.844	0
31	0	0.57961	-45.5392	0	0	9.164	4.582	0
32	0	0.67194	-39.6897	0	0	2.528	1.264	0
33	0	0.66679	-39.8156	0	0	6.004	3.002	0
34	0	0.79381	-23.3786	0	0	0	0	0
35	0	0.81856	-22.9305	0	0	9.48	4.74	0
36	0	0.84513	-22.4744	0	0	0	0	0
37	0	0.86564	-22.0995	0	0	0	0	0
38	0	0.92452	-20.6724	0	0	22.12	11.06	0
39	0	0.86288	-22.1938	0	0	0	0	0
40	0	0.84233	-22.5855	0	0	0	0	0
41	0	0.92891	-23.3606	0	0	9.954	4.74	0
42	0	0.86201	-25.8494	0	0	11.218	6.952	0
43	0	0.97251	-18.1176	0	0	3.16	1.58	0
44	0	0.94036	-19.2143	0	0	18.96	2.844	0
45	0	0.99392	-14.995	0	0	0	0	0
46	0	1.0065	-17.7826	0	0	0	0	0
47	0	0.96064	-20.2485	0	0	46.926	18.328	0
48	0	0.95059	-20.4165	0	0	0	0	0
49	0	0.96958	-20.8923	0	0	28.44	13.43	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
50	0	0.95756	-21.6719	0	0	33.18	16.59	0
51	0	1.0235	-20.0168	0	0	28.44	8.374	0
52	0	0.92461	-17.9015	0	0	7.742	3.476	0
53	0	0.90665	-19.13	0	0	31.6	15.8	0.063
54	0	0.95578	-18.396	0	0	6.478	2.212	0
55	0	1.0197	-17.0623	0	0	10.744	5.372	0
56	0	0.85117	-26.6067	0	0	12.008	3.476	0
57	0	0.83745	-27.6362	0	0	10.586	3.16	0
$K_G = 0.0599$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 74.8903								

#### 4.6.2 Sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração (Tabela 4.20), fornecidos pelo banco de dados do sistema

Tabela 4.20: Limites de geração de potência reativa para o sistema de 57 barras

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}$ (Mvar)	$Q_{Gmax}$ (Mvar)
2	-17	50
3	-10	60
6	-8	25
8	-140	200
9	-3	9
12	-150	155

As novas curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC considerando os limites de geração de potência reativa podem ser observadas nas figuras 4.25 e 4.26. A Figura 4.27 ilustra o FCC apenas para as barras de geração (*slack + PV*).

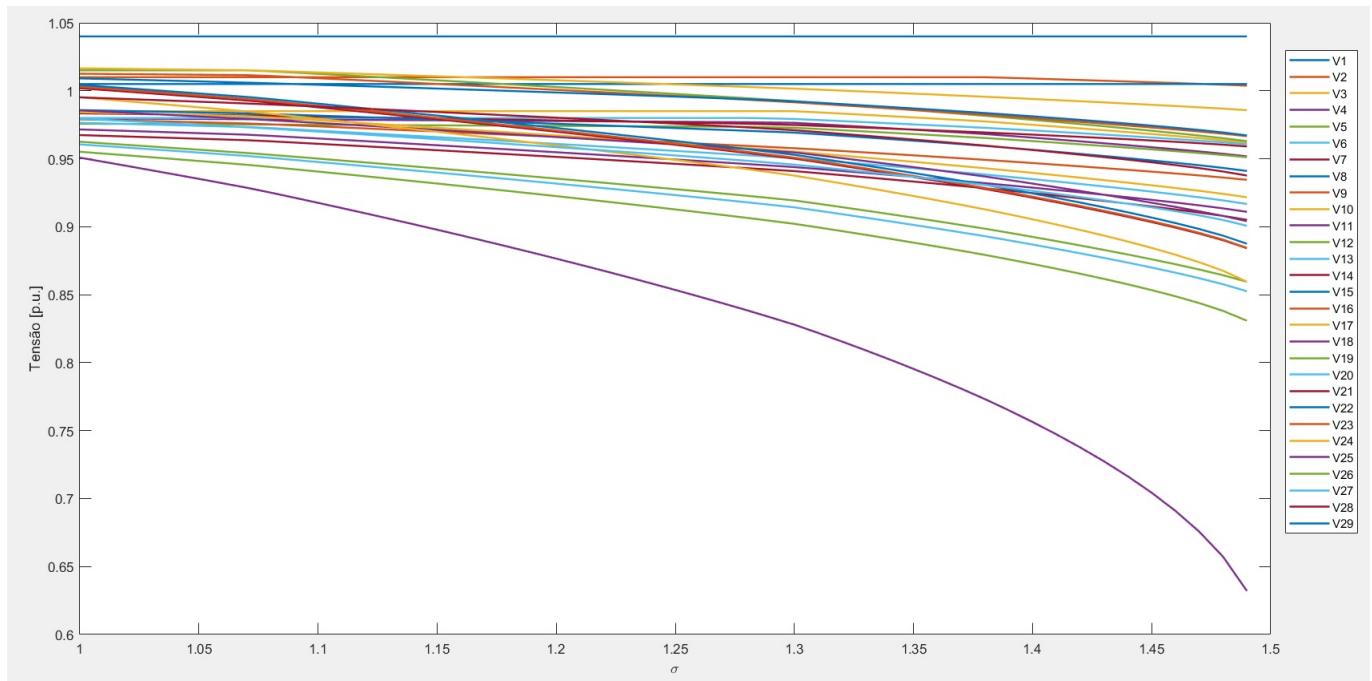


Figura 4.25: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29

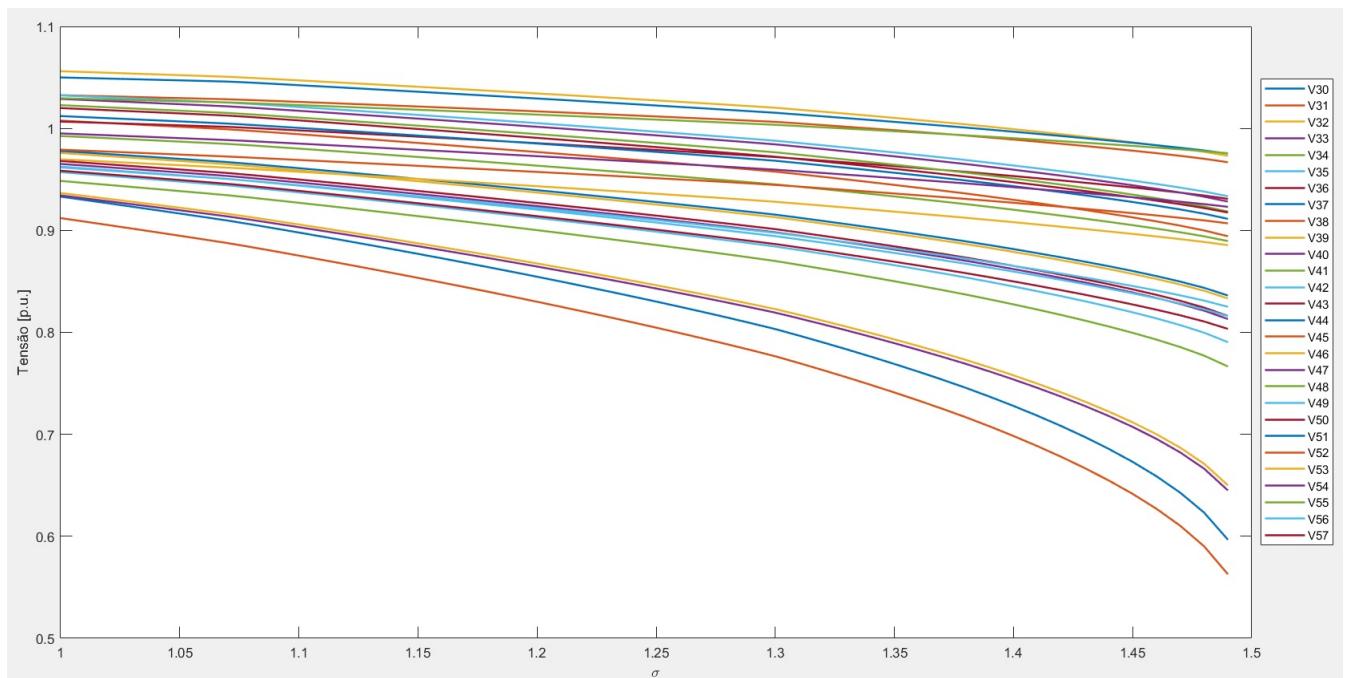


Figura 4.26: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 57

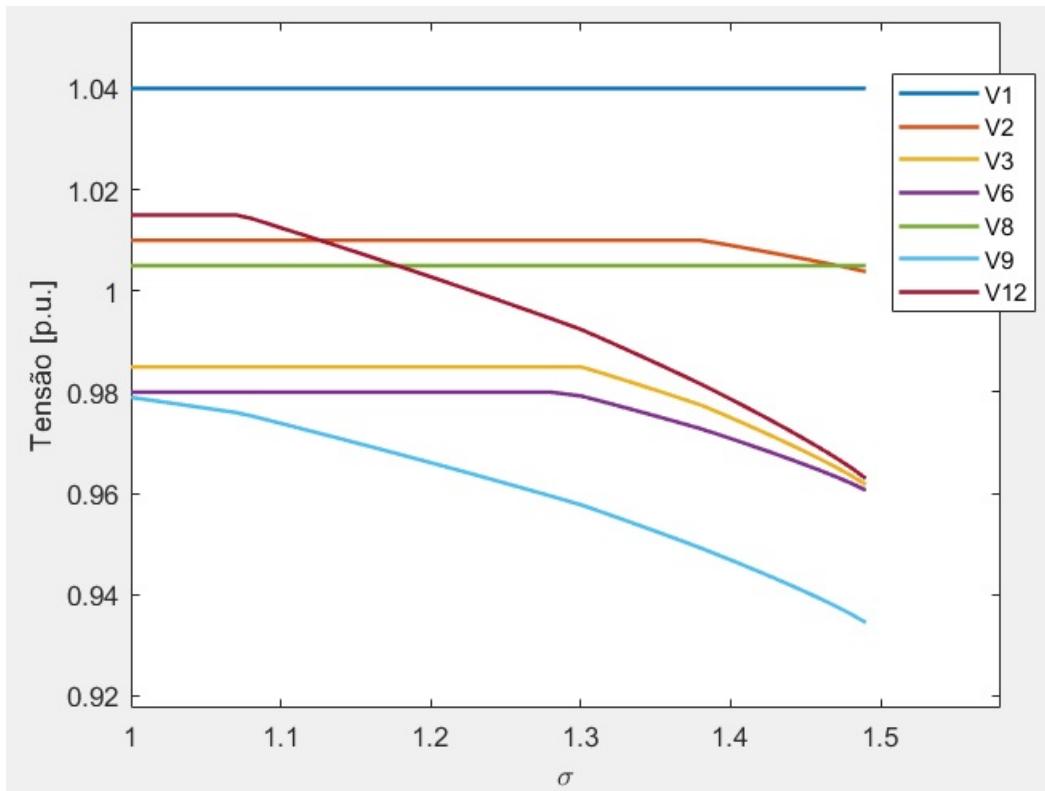


Figura 4.27: Curvas *PV* das barras de geração para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 57 barras com limites de geração de potência reativa

Em  $\sigma = 1,49$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma *BSN*. A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 1,49$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.28. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,49$ ).

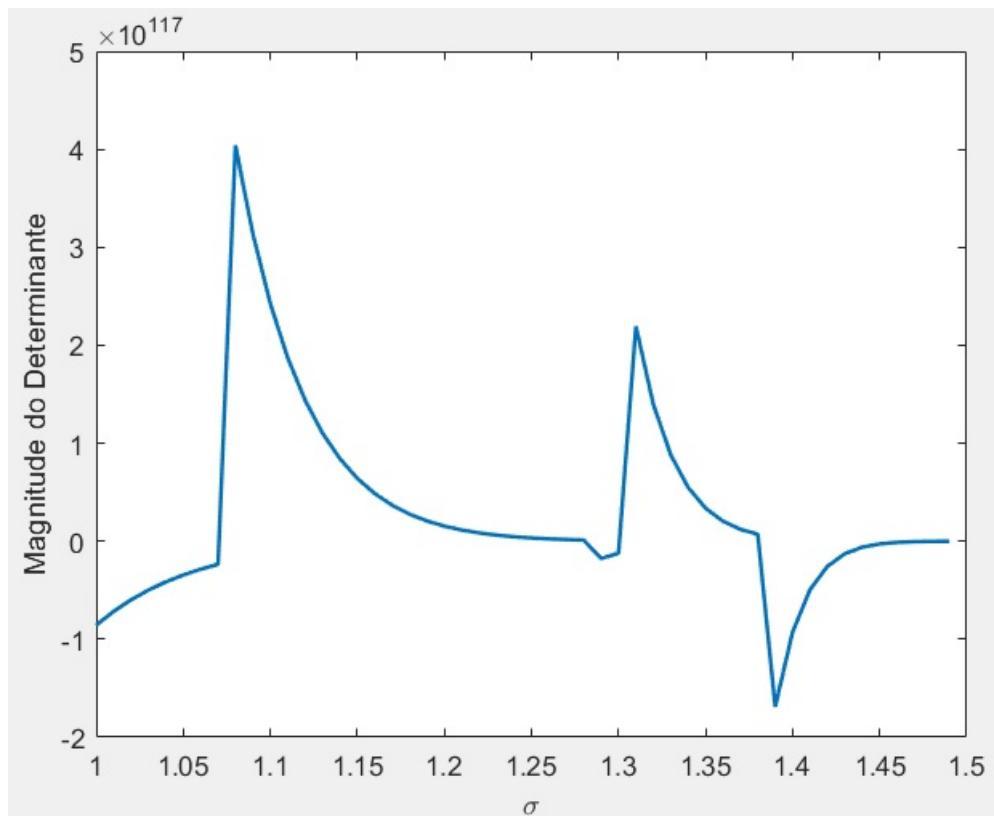


Figura 4.28: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 57 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,49$ ) pode ser visto na Tabela 4.21.

Tabela 4.21: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,49$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 57 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.04	0	696.8497	253.651	81.95	25.33	0
2	2	1.0038	-1.8796	0	50	4.47	131.12	0
3	2	0.96173	-8.9523	61.8323	60	61.09	31.29	0
4	0	0.95176	-10.8093	0	0	0	0	0
5	0	0.95111	-12.6238	0	0	19.37	5.96	0
6	2	0.96064	-12.8137	0	25	111.75	2.98	0
7	0	0.95906	-10.951	0	0	0	0	0
8	2	1.005	-6.0497	695.6131	195.0811	223.5	32.78	0
9	2	0.93449	-14.0348	0	9	180.29	38.74	0
10	0	0.92167	-17.0457	0	0	7.45	2.98	0
11	0	0.91095	-15.0775	0	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
12	2	0.96296	-15.1987	479.2001	155	561.73	35.76	0
13	0	0.91673	-14.4809	0	0	26.82	3.427	0
14	0	0.90506	-13.9053	0	0	15.645	7.897	0
15	0	0.94101	-10.6012	0	0	32.78	7.45	0
16	0	0.96666	-12.9158	0	0	64.07	4.47	0
17	0	0.98576	-7.7932	0	0	62.58	11.92	0
18	0	0.90409	-23.3551	0	0	40.528	14.602	0.1
19	0	0.85948	-24.2126	0	0	4.917	0.894	0
20	0	0.85248	-23.3395	0	0	3.427	1.49	0
21	0	0.88416	-20.4984	0	0	0	0	0
22	0	0.88748	-20.0826	0	0	0	0	0
23	0	0.88444	-20.1205	0	0	9.387	3.129	0
24	0	0.85952	-19.3454	0	0	0	0	0
25	0	0.632	-42.747	0	0	9.387	4.768	0.059
26	0	0.83084	-18.6899	0	0	0	0	0
27	0	0.90069	-16.9794	0	0	13.857	0.745	0
28	0	0.93763	-15.5429	0	0	6.854	3.427	0
29	0	0.96716	-14.5934	0	0	25.33	3.874	0
30	0	0.5967	-44.0915	0	0	5.364	2.682	0
31	0	0.56277	-44.8032	0	0	8.642	4.321	0
32	0	0.65002	-38.9552	0	0	2.384	1.192	0
33	0	0.645	-39.0821	0	0	5.662	2.831	0
34	0	0.76653	-22.6229	0	0	0	0	0
35	0	0.79037	-22.167	0	0	8.94	4.47	0
36	0	0.81608	-21.7025	0	0	0	0	0
37	0	0.83617	-21.3282	0	0	0	0	0
38	0	0.89427	-19.9059	0	0	20.86	10.43	0
39	0	0.83329	-21.4203	0	0	0	0	0
40	0	0.81309	-21.8085	0	0	0	0	0
41	0	0.88954	-22.5934	0	0	9.387	4.47	0
42	0	0.82505	-25.1866	0	0	10.579	6.556	0
43	0	0.93094	-17.2327	0	0	2.98	1.49	0
44	0	0.91132	-18.4698	0	0	17.88	2.682	0
45	0	0.96684	-14.3113	0	0	0	0	0
46	0	0.97309	-16.9826	0	0	0	0	0
47	0	0.92826	-19.4648	0	0	44.253	17.284	0
48	0	0.91845	-19.6312	0	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
49	0	0.93353	-20.0541	0	0	26.82	12.665	0
50	0	0.91754	-20.8163	0	0	31.29	15.645	0
51	0	0.97531	-19.0484	0	0	26.82	7.897	0
52	0	0.90692	-17.1909	0	0	7.301	3.278	0
53	0	0.88552	-18.3472	0	0	29.8	14.9	0.063
54	0	0.92311	-17.4678	0	0	6.109	2.086	0
55	0	0.97564	-15.9967	0	0	10.132	5.066	0
56	0	0.81587	-26.0016	0	0	11.324	3.278	0
57	0	0.80342	-27.0739	0	0	9.983	2.98	0
$K_G = 0.0558$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 69.8033								

Note, a partir da Figura 4.27 e da Tabela 4.21, que todas as barras de geração que possuíam limites de geração de potência reativa atingiram seu limite superior no ponto de máximo carregamento, com excessão da barra 8.

## 4.7 Sistema de 118 barras

O sistema de 118 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 53 barras de geração;
- 64 barras de carga;
- 186 linhas de transmissão;
- 9 transformadores em fase.

### 4.7.1 Sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 118 barras sem considerar os seus limites de geração de potência reativa pode ser observada na Tabela 4.22.

Tabela 4.22: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 118 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.035	0	391.5038	-65.6576	0	0	0
2	0	0.97101	-17.7518	0	0	20	9	0
3	0	0.96717	-17.3905	0	0	39	10	0
4	2	0.998	-13.6578	-9.2481	-12.5619	30	12	0
5	0	1.0019	-13.2056	0	0	0	0	-0.4
6	2	0.99	-15.9595	0	16.8663	52	22	0
7	0	0.98928	-16.4131	0	0	19	2	0
8	2	1.015	-8.1328	-28.7719	165.0876	0	0	0
9	0	1.0324	-0.55336	0	0	0	0	0
10	2	1.05	7.2703	462.4061	17.8466	0	0	0
11	0	0.98469	-16.2612	0	0	70	23	0
12	2	0.99	-16.788	87.3434	101.6162	47	10	0
13	0	0.96683	-17.7045	0	0	34	16	0
14	0	0.98269	-17.5857	0	0	14	1	0
15	2	0.97	-18.1664	0	18.2089	90	30	0
16	0	0.98206	-17.1436	0	0	25	10	0
17	0	0.99229	-15.4869	0	0	11	3	0
18	2	0.973	-17.8303	0	32.6559	60	34	0
19	2	0.963	-18.3912	0	-4.9954	45	25	0
20	0	0.95445	-17.3925	0	0	18	3	0
21	0	0.95383	-15.7198	0	0	14	8	0
22	0	0.96475	-13.0734	0	0	10	5	0
23	0	0.99743	-8.0443	0	0	7	3	0
24	2	0.992	-8.3373	-13.3584	-5.2422	0	0	0
25	2	1.05	-0.86408	226.0652	59.6706	0	0	0
26	2	1.015	0.96381	322.6567	46.0836	0	0	0
27	2	0.968	-13.6937	-9.2481	9.3399	62	13	0
28	0	0.9609	-15.4457	0	0	17	7	0
29	0	0.96286	-16.4827	0	0	24	4	0
30	0	0.97529	-10.3346	0	0	0	0	0
31	2	0.967	-16.3867	7.193	36.0349	43	27	0
32	2	0.964	-14.3066	0	-4.4656	59	23	0
33	0	0.96939	-19.2162	0	0	23	9	0
34	2	0.986	-19.0867	0	22.552	59	26	0.14

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
35	0	0.98028	-19.5187	0	0	33	9	0
36	2	0.98	-19.516	0	2.3188	31	17	0
37	0	0.98985	-18.6193	0	0	0	0	-0.25
38	0	0.94951	-12.6769	0	0	0	0	0
39	0	0.96828	-23.5783	0	0	27	11	0
40	2	0.97	-25.5795	-47.2682	40.136	20	23	0
41	0	0.96646	-26.6856	0	0	37	10	0
42	2	0.985	-26.9204	-60.6266	65.4714	37	23	0
43	0	0.97372	-18.9878	0	0	18	7	0
44	0	0.97957	-16.3525	0	0	16	8	0.1
45	0	0.98299	-14.4883	0	0	53	22	0.1
46	2	1.005	-11.6871	19.5238	1.4414	28	10	0.1
47	0	1.0159	-9.4257	0	0	34	0	0
48	0	1.02	-10.2522	0	0	20	11	0.15
49	2	1.025	-9.2659	209.6241	137.4128	87	30	0
50	0	0.9997	-11.4856	0	0	17	4	0
51	0	0.96385	-14.3533	0	0	17	8	0
52	0	0.95313	-15.3794	0	0	18	5	0
53	0	0.94313	-16.5843	0	0	23	11	0
54	2	0.955	-15.8605	49.3233	37.043	113	32	0
55	2	0.952	-15.9652	0	6.7949	63	22	0
56	2	0.954	-15.9157	0	19.6899	84	18	0
57	0	0.96901	-14.3993	0	0	12	3	0
58	0	0.95684	-15.3061	0	0	12	3	0
59	2	0.985	-9.1689	159.2732	83.3681	277	113	0
60	0	0.99294	-4.9257	0	0	78	3	0
61	2	0.995	-4.0404	164.4111	-28.2316	0	0	0
62	2	0.998	-4.46	0	6.2315	77	14	0
63	0	0.96651	-5.5822	0	0	0	0	0
64	0	0.98165	-3.6998	0	0	0	0	0
65	2	1.005	-0.56962	401.7795	161.2997	0	0	0
66	2	1.05	0.51382	402.8071	-11.1866	39	18	0
67	0	1.0186	-2.5328	0	0	28	7	0
68	0	1.0017	-1.1658	0	0	0	0	0
69	2	0.955	-18.2883	0	-0.72977	51	27	0
70	2	0.984	-7.277	0	17.7578	66	20	0
71	0	0.98656	-7.6524	0	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
72	2	0.98	-8.5763	-12.3308	-8.6781	0	0	0
73	2	0.991	-7.8717	-6.1654	10.5891	0	0	0
74	2	0.958	-8.3021	0	-2.0666	68	27	0.12
75	0	0.96626	-7.0433	0	0	47	11	0
76	2	0.943	-8.248	0	7.5983	68	36	0
77	2	1.006	-3.3692	0	97.4432	61	28	0
78	0	1.0034	-3.4409	0	0	71	26	0
79	0	1.0088	-2.6979	0	0	39	32	0.2
80	2	1.04	0.77897	490.1505	72.3924	130	26	0
81	0	0.99345	-0.40335	0	0	0	0	0
82	0	0.98292	-0.91792	0	0	54	27	0.2
83	0	0.97689	1.5692	0	0	20	10	0.1
84	0	0.97575	6.1557	0	0	11	7	0
85	2	0.985	8.6718	0	12.2108	24	15	0
86	0	0.98532	7.3317	0	0	21	10	0
87	2	1.015	7.5937	4.1103	12.8244	0	0	0
88	0	0.98504	13.6003	0	0	48	10	0
89	2	1.005	18.8817	623.7345	-7.4799	0	0	0
90	2	0.985	6.4089	-87.3434	86.1849	78	42	0
91	2	0.98	4.5171	-10.2757	-12.7928	0	0	0
92	2	0.993	2.1693	0	58.0507	65	10	0
93	0	0.98657	0.15803	0	0	12	7	0
94	0	0.98897	-1.148	0	0	30	16	0
95	0	0.9783	-1.6914	0	0	42	31	0
96	0	0.98914	-1.3192	0	0	38	15	0
97	0	1.0089	-0.61509	0	0	15	9	0
98	0	1.022	-1.3252	0	0	34	8	0
99	2	1.01	-2.2647	-43.1579	-15.034	0	0	0
100	2	1.017	-1.6664	258.9474	120.6699	37	18	0
101	0	0.99205	-0.89511	0	0	22	15	0
102	0	0.99123	1.0503	0	0	5	3	0
103	2	1.001	-5.2556	41.1028	45.9499	23	16	0
104	2	0.971	-8.0156	0	10.4971	38	25	0
105	2	0.965	-9.1303	0	-7.2513	31	26	0.2
106	0	0.96006	-9.3749	0	0	43	16	0
107	2	0.952	-12.2328	-22.6065	9.4809	28	12	0.06
108	0	0.96574	-10.3204	0	0	2	1	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
109	0	0.96654	-10.7732	0	0	8	3	0
110	2	0.973	-11.6307	0	9.3897	39	30	0.06
111	2	0.98	-9.9371	36.9925	-1.6217	0	0	0
112	2	0.975	-14.7838	-44.1855	43.5187	25	13	0
113	2	0.993	-15.5183	-6.1654	17.0281	0	0	0
114	0	0.96034	-14.6071	0	0	8	3	0
115	0	0.96019	-14.6104	0	0	22	7	0
116	2	1.005	-1.6208	-189.0727	94.9288	0	0	0
117	0	0.97259	-18.3143	0	0	20	8	0
118	0	0.9487	-8.0637	0	0	33	15	0
$K_G = 0.0276$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 101.1237								

Resolvendo o FCC para o sistema de 118 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, é possível obter as curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema. Essas curvas são ilustradas nas figuras 4.29 (barras 1 a 29), 4.30 (barras 30 a 59), 4.31 (barras 60 a 89) e 4.32 (barras 90 a 118).

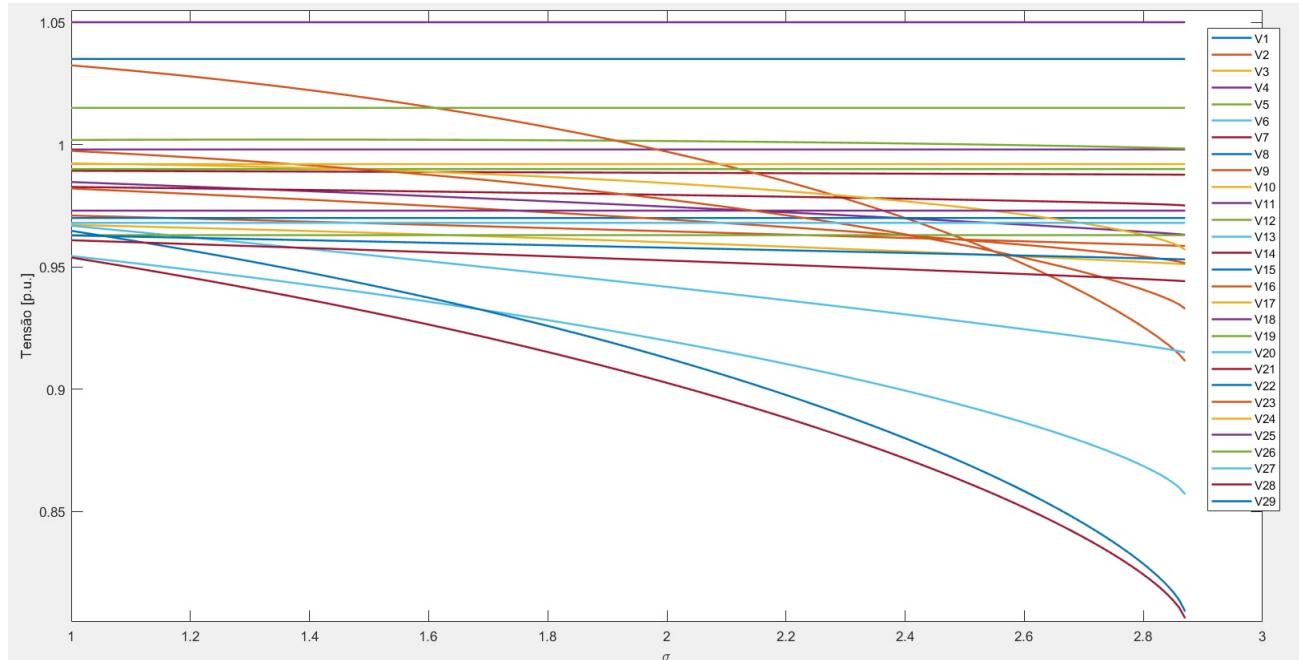


Figura 4.29: Curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29

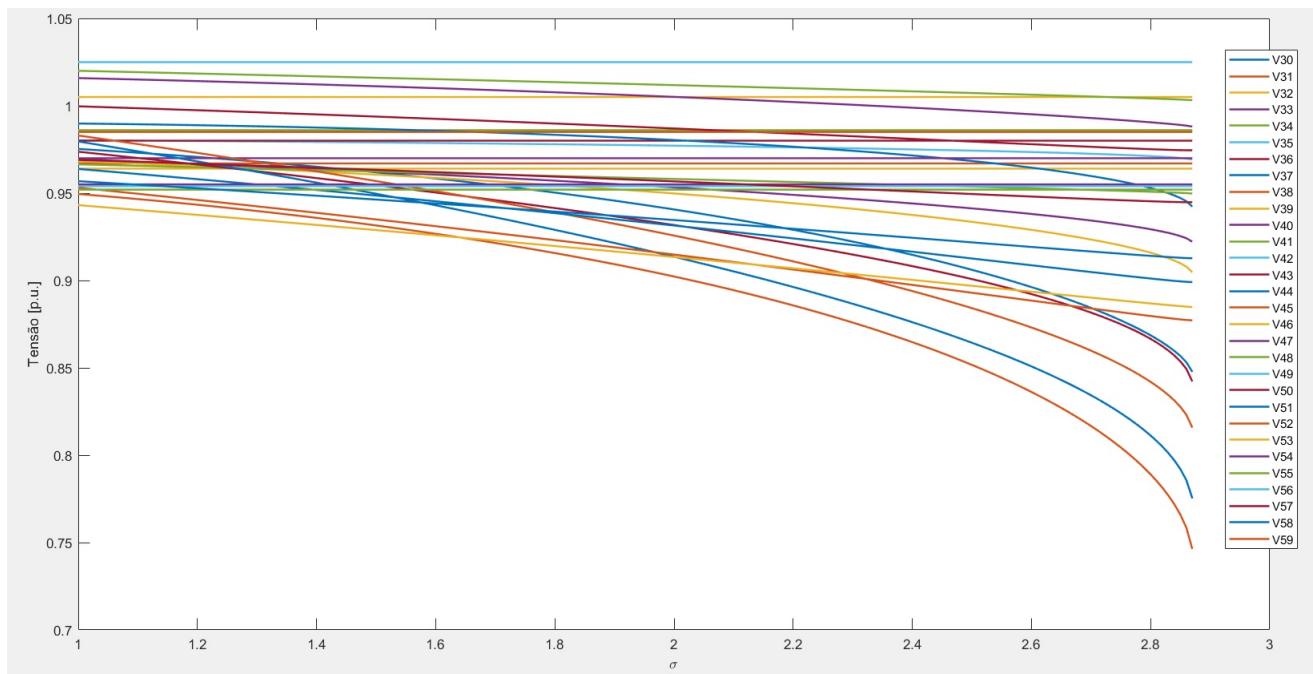


Figura 4.30: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 59

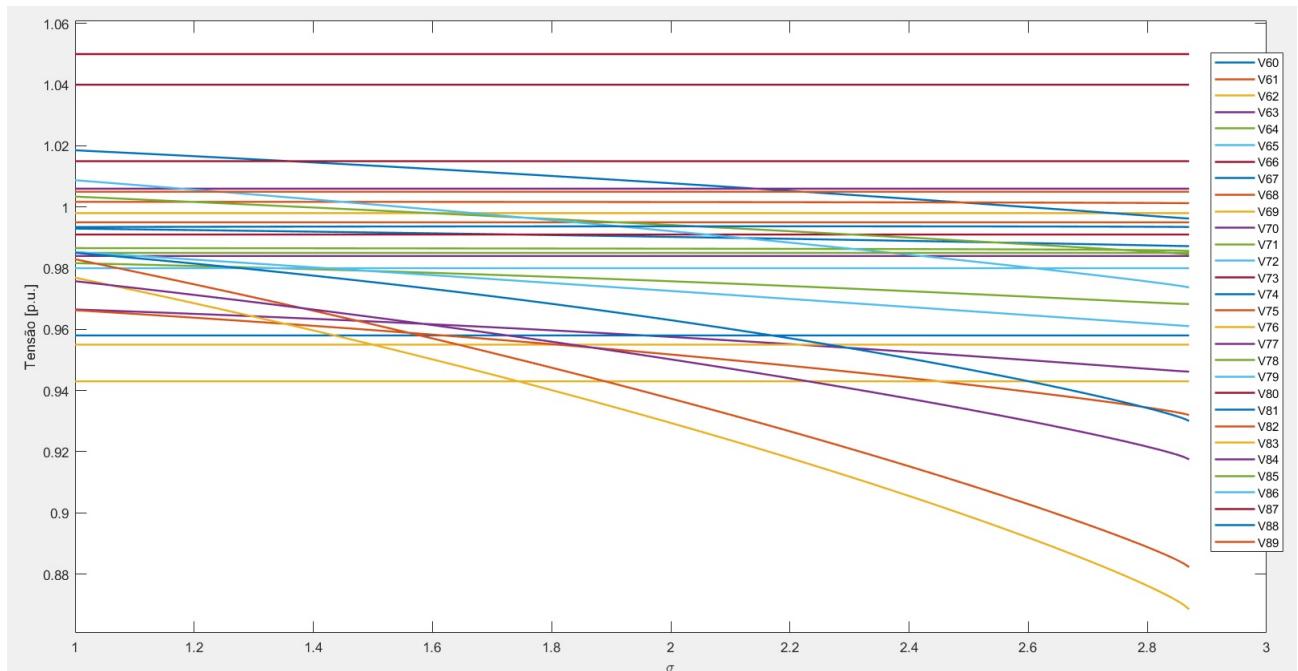


Figura 4.31: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 60 a 89

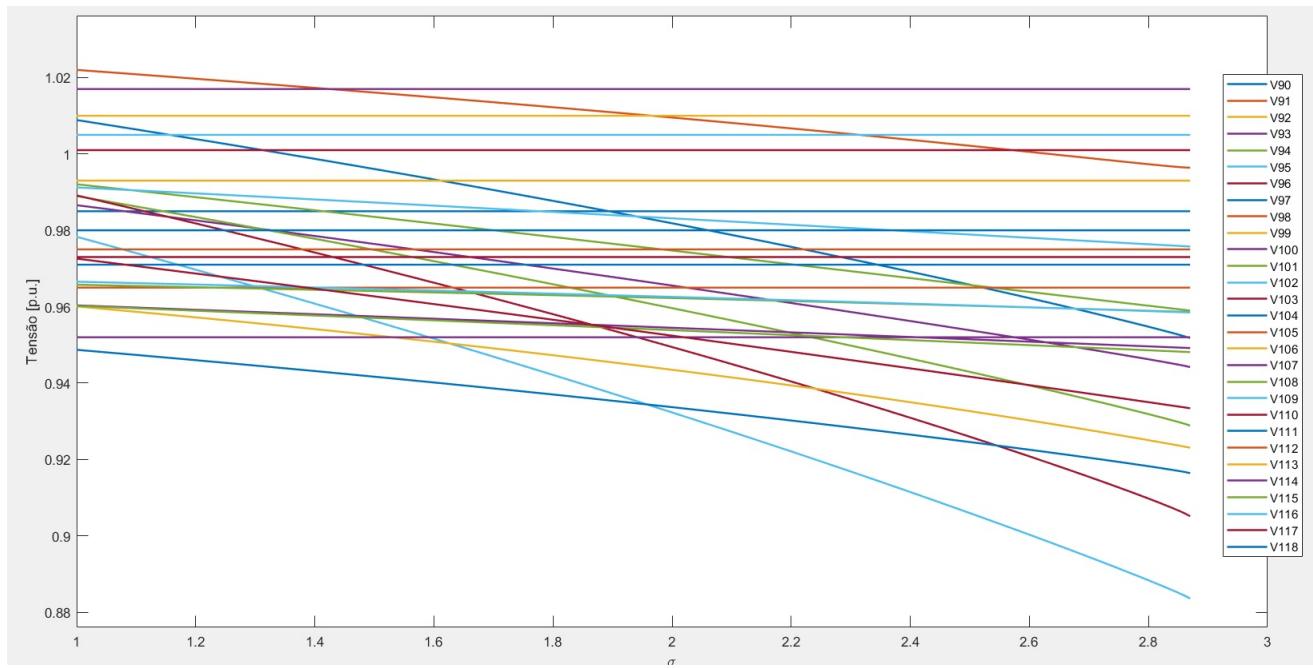


Figura 4.32: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras sem limites de geração de potência reativa - Barras 90 a 118

Em  $\sigma = 2,87$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 2,87$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pode ser visto na Figura 4.33. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,87$ ).

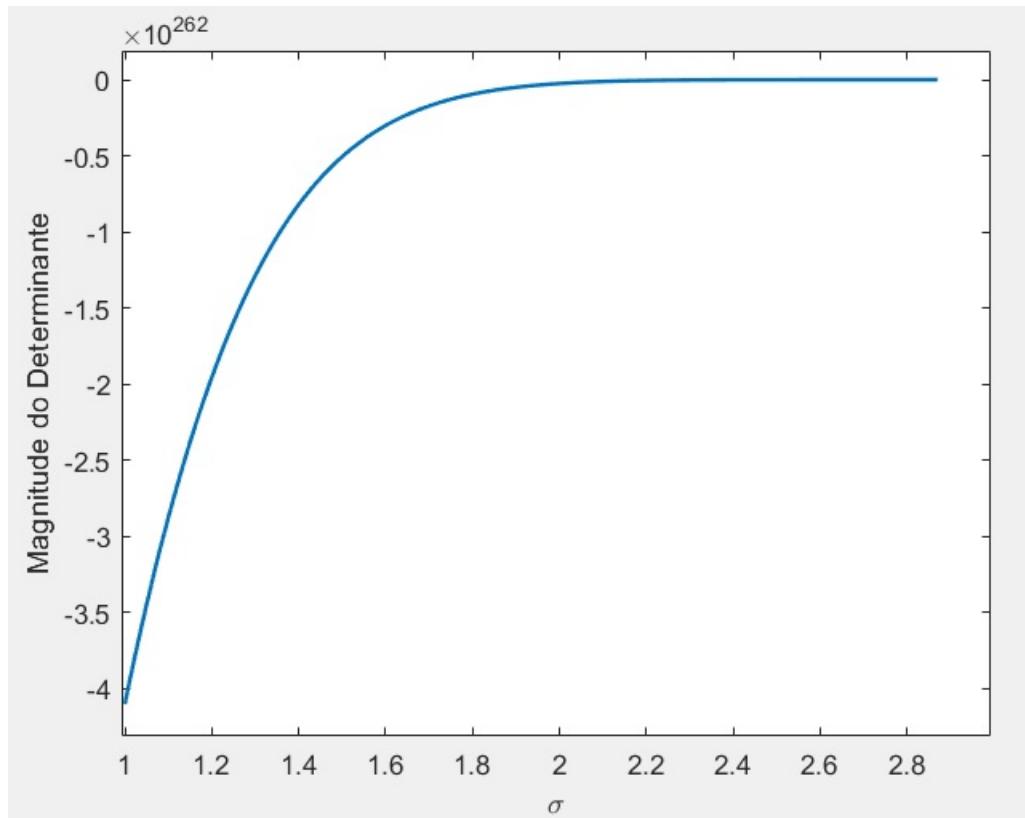


Figura 4.33: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 118 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,87$ ) pode ser visto na Tabela 4.23.

Tabela 4.23: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 2,87$ ) - Sistema de 118 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G(\text{Mvar})$	$P_L(MW)$	$Q_L(\text{Mvar})$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.035	0	1280.7836	-28.2549	0	0	0
2	0	0.95859	-71.3808	0	0	57.4	25.83	0
3	0	0.95112	-70.2555	0	0	111.93	28.7	0
4	2	0.998	-58.1818	-30.2547	107.7154	86.1	34.44	0
5	0	0.99837	-56.6477	0	0	0	0	-0.4
6	2	0.99	-65.4198	0	114.0624	149.24	63.14	0
7	0	0.98769	-66.8651	0	0	54.53	5.74	0
8	2	1.015	-40.8829	-94.1258	1380.5486	0	0	0
9	0	0.9115	-12.2891	0	0	0	0	0
10	2	1.05	17.0364	1512.7366	677.4086	0	0	0
11	0	0.96314	-66.4671	0	0	200.9	66.01	0
12	2	0.99	-68.1787	285.7391	316.9144	134.89	28.7	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
13	0	0.91503	-71.96	0	0	97.58	45.92	0
14	0	0.9751	-71.697	0	0	40.18	2.87	0
15	2	0.97	-76.9016	0	304.1101	258.3	86.1	0
16	0	0.95153	-69.9529	0	0	71.75	28.7	0
17	0	0.95697	-66.5666	0	0	31.57	8.61	0
18	2	0.973	-75.6217	0	216.1201	172.2	97.58	0
19	2	0.963	-78.3056	0	148.5489	129.15	71.75	0
20	0	0.85705	-74.3453	0	0	51.66	8.61	0
21	0	0.80642	-67.3785	0	0	40.18	22.96	0
22	0	0.80917	-55.8772	0	0	28.7	14.35	0
23	0	0.93291	-36.1865	0	0	20.09	8.61	0
24	2	0.992	-36.8668	-43.7013	126.8994	0	0	0
25	2	1.05	-10.6418	739.5601	323.5833	0	0	0
26	2	1.015	-4.2504	1055.554	424.0964	0	0	0
27	2	0.968	-59.5798	-30.2547	293.6126	177.94	37.31	0
28	0	0.94415	-65.092	0	0	48.79	20.09	0
29	0	0.95307	-68.6203	0	0	68.88	11.48	0
30	0	0.84774	-48.1705	0	0	0	0	0
31	2	0.967	-68.5207	23.5315	162.4133	123.41	77.49	0
32	2	0.964	-61.7489	0	219.271	169.33	66.01	0
33	0	0.9222	-82.6916	0	0	66.01	25.83	0
34	2	0.986	-85.9489	0	686.6913	169.33	74.62	0.14
35	0	0.96925	-87.3538	0	0	94.71	25.83	0
36	2	0.98	-87.4698	0	160.5674	88.97	48.79	0
37	0	0.94228	-83.9811	0	0	0	0	-0.25
38	0	0.74633	-58.7027	0	0	0	0	0
39	0	0.90472	-105.7511	0	0	77.49	31.57	0
40	2	0.97	-114.8852	-154.6353	395.7654	57.4	66.01	0
41	0	0.94976	-118.7981	0	0	106.19	28.7	0
42	2	0.985	-121.3884	-198.3366	483.9654	106.19	66.01	0
43	0	0.8422	-80.8734	0	0	51.66	20.09	0
44	0	0.77532	-60.8759	0	0	45.92	22.96	0.1
45	0	0.81579	-49.9518	0	0	152.11	63.14	0.1
46	2	1.005	-39.4077	63.8711	200.0026	80.36	28.7	0.1
47	0	0.98813	-30.5804	0	0	97.58	0	0
48	0	1.0032	-32.7097	0	0	57.4	31.57	0.15
49	2	1.025	-29.4754	685.7739	915.2553	249.69	86.1	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
50	0	0.97454	-35.883	0	0	48.79	11.48	0
51	0	0.89908	-44.4795	0	0	48.79	22.96	0
52	0	0.87719	-47.7549	0	0	51.66	14.35	0
53	0	0.8848	-51.211	0	0	66.01	31.57	0
54	2	0.955	-48.6246	161.3586	216.1984	324.31	91.84	0
55	2	0.952	-48.944	0	108.7985	180.81	63.14	0
56	2	0.954	-48.8916	0	206.8388	241.08	51.66	0
57	0	0.94482	-44.5109	0	0	34.44	8.61	0
58	0	0.91272	-47.3156	0	0	34.44	8.61	0
59	2	0.985	-24.8329	521.0537	482.4058	794.99	324.31	0
60	0	0.9872	-11.4976	0	0	223.86	8.61	0
61	2	0.995	-8.8419	537.8619	15.3355	0	0	0
62	2	0.998	-10.2086	0	113.5867	220.99	40.18	0
63	0	0.94617	-14.0988	0	0	0	0	0
64	0	0.96829	-8.2736	0	0	0	0	0
65	2	1.005	0.76088	1314.4	721.9637	0	0	0
66	2	1.05	4.9641	1317.7616	130.8829	111.93	51.66	0
67	0	0.99624	-4.2328	0	0	80.36	20.09	0
68	0	1.0013	-2.098	0	0	0	0	0
69	2	0.955	-73.6453	0	130.9486	146.37	77.49	0
70	2	0.984	-27.1846	0	205.3132	189.42	57.4	0
71	0	0.98563	-28.8992	0	0	0	0	0
72	2	0.98	-35.0281	-40.3396	1.9967	0	0	0
73	2	0.991	-29.516	-20.1698	15.401	0	0	0
74	2	0.958	-30.2336	0	176.4527	195.16	77.49	0.12
75	0	0.93199	-25.254	0	0	134.89	31.57	0
76	2	0.943	-29.5915	0	198.71	195.16	103.32	0
77	2	1.006	-11.4657	0	575.0669	175.07	80.36	0
78	0	0.98455	-11.2144	0	0	203.77	74.62	0
79	0	0.97372	-8.1645	0	0	111.93	91.84	0.2
80	2	1.04	4.0684	1603.5008	238.1141	373.1	74.62	0
81	0	0.99346	0.26155	0	0	0	0	0
82	0	0.88227	-3.8136	0	0	154.98	77.49	0.2
83	0	0.86848	4.3547	0	0	57.4	28.7	0.1
84	0	0.91752	18.5205	0	0	31.57	20.09	0
85	2	0.985	25.4533	0	382.6098	68.88	43.05	0
86	0	0.96106	22.033	0	0	60.27	28.7	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
87	2	1.015	23.2613	13.4465	23.5275	0	0	0
88	0	0.93008	41.7467	0	0	137.76	28.7	0
89	2	1.005	58.7676	2040.5135	439.5222	0	0	0
90	2	0.985	12.7273	-285.7391	527.3546	223.86	120.54	0
91	2	0.98	7.3313	-33.6164	1.7203	0	0	0
92	2	0.993	1.7762	0	495.1983	186.55	28.7	0
93	0	0.94418	-2.7794	0	0	34.44	20.09	0
94	0	0.92885	-5.6122	0	0	86.1	45.92	0
95	0	0.88358	-6.8887	0	0	120.54	88.97	0
96	0	0.90512	-4.8753	0	0	109.06	43.05	0
97	0	0.95178	-1.2926	0	0	43.05	25.83	0
98	0	0.9964	-3.4398	0	0	97.58	22.96	0
99	2	1.01	-8.3567	-141.1887	18.2585	0	0	0
100	2	1.017	-6.7272	847.1325	287.5293	106.19	51.66	0
101	0	0.95897	-5.6352	0	0	63.14	43.05	0
102	0	0.97575	-0.9161	0	0	14.35	8.61	0
103	2	1.001	-18.8687	134.4655	167.4482	66.01	45.92	0
104	2	0.971	-28.6572	0	118.4966	109.06	71.75	0
105	2	0.965	-32.465	0	160.4636	88.97	74.62	0.2
106	0	0.92306	-32.9486	0	0	123.41	45.92	0
107	2	0.952	-42.9157	-73.956	95.4232	80.36	34.44	0.06
108	0	0.95859	-36.056	0	0	5.74	2.87	0
109	0	0.95849	-37.4456	0	0	22.96	8.61	0
110	2	0.973	-40.1298	0	135.5138	111.93	86.1	0.06
111	2	0.98	-34.3682	121.0189	-20.2777	0	0	0
112	2	0.975	-50.1713	-144.5504	145.0682	71.75	37.31	0
113	2	0.993	-66.9359	-20.1698	139.6993	0	0	0
114	0	0.94916	-62.4513	0	0	22.96	8.61	0
115	0	0.94811	-62.4325	0	0	63.14	20.09	0
116	2	1.005	-3.5542	-618.5412	148.8302	0	0	0
117	0	0.9334	-72.7136	0	0	57.4	22.96	0
118	0	0.91641	-28.698	0	0	94.71	43.05	0

#### 4.7.2 Sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração (Tabela 4.24), fornecidos pelo banco de dados do sistema.

Tabela 4.24: Limites de geração de potência reativa para o sistema de 118 barras

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}(Mvar)$	$Q_{Gmax}(Mvar)$
1	-300	300
4	-300	300
6	-13	50
8	-300	300
10	-147	200
12	-35	120
15	-10	30
18	-16	50
19	-8	24
24	-300	300
25	-47	140
26	-1000	1000
27	-300	300
31	-300	300
32	-14	42
34	-8	24
36	-8	24
40	-300	300
42	-300	300
46	-100	100
49	-85	210
54	-300	300
55	-8	23
56	-8	15
59	-60	180
61	-100	300
62	-20	20
65	-67	200
66	-67	200

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}(Mvar)$	$Q_{Gmax}(Mvar)$
69	-5	15
70	-10	32
72	-100	100
73	-100	100
74	-6	9
76	-8	23
77	-20	70
80	-165	280
85	-8	23
87	-100	1000
89	-210	300
90	-300	300
91	-100	100
92	-3	9
99	-100	100
100	-50	155
103	-15	40
104	-8	23
105	-8	23
107	-200	200
110	-8	23
111	-100	1000
112	-100	1000
113	-100	200
116	-1000	1000

As novas curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis pelo método do FCC considerando os limites de geração de potência reativa podem ser observadas nas figuras 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37 . As figuras 4.38 e 4.39 ilustram o FCC apenas para as barras de geração (*slack + PV*).

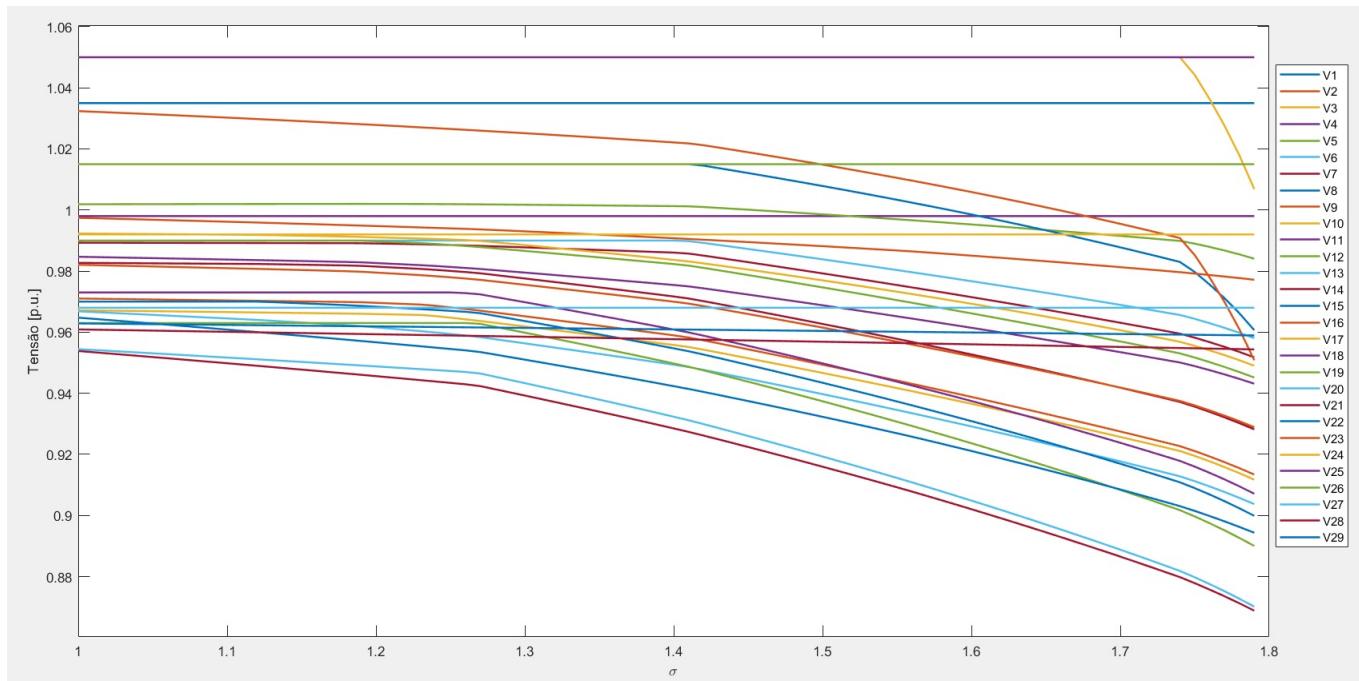


Figura 4.34: Curvas *PV* para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 29

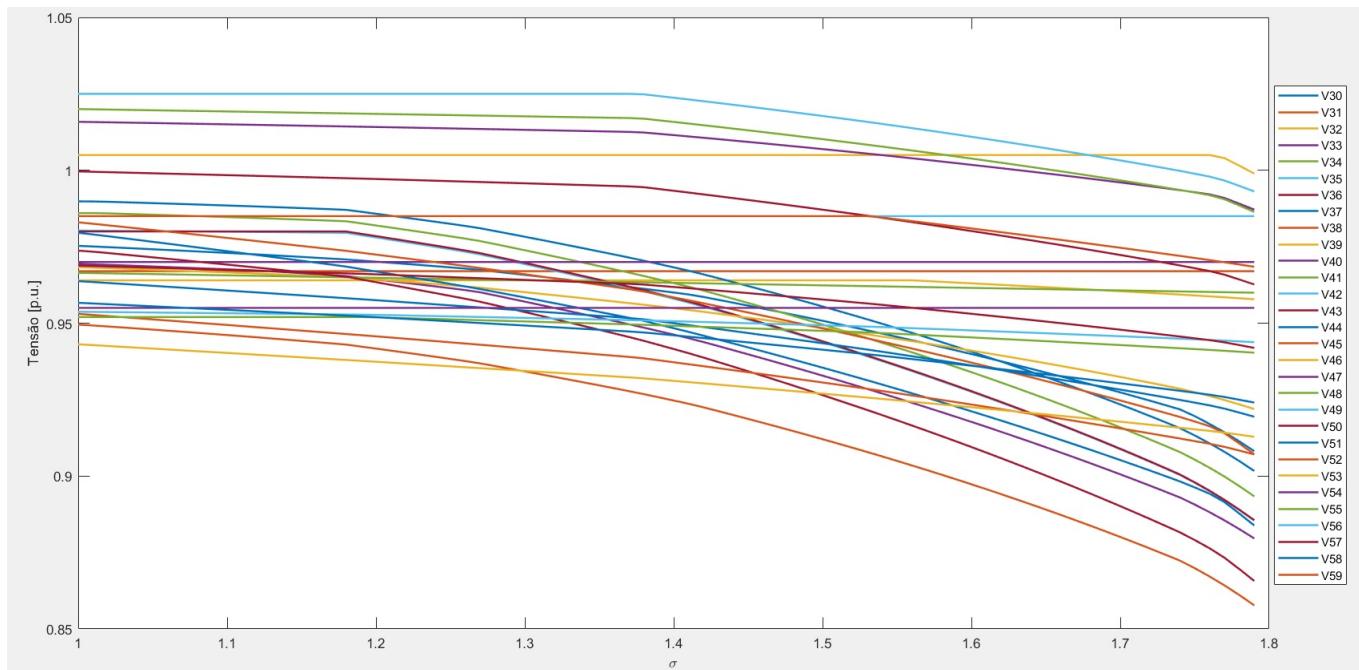


Figura 4.35: Curvas *PV* para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 30 a 59

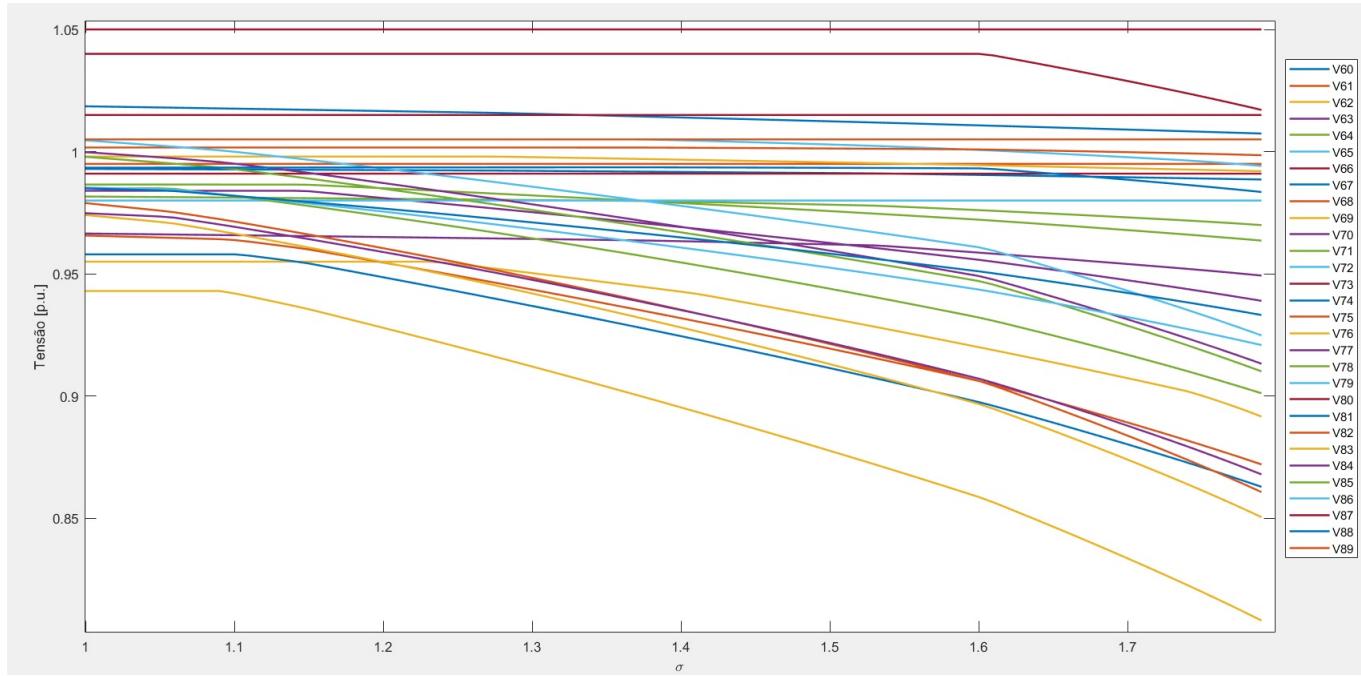


Figura 4.36: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 60 a 89

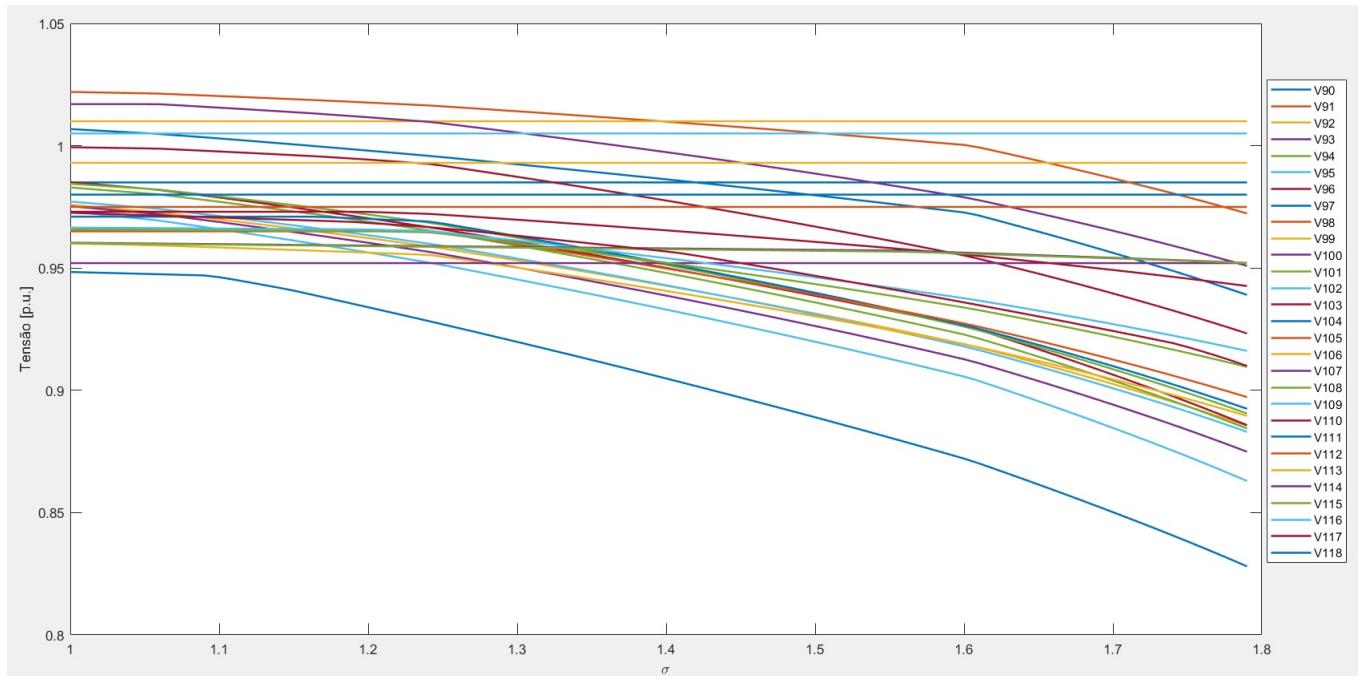


Figura 4.37: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras com limites de geração de potência reativa - Barras 90 a 118

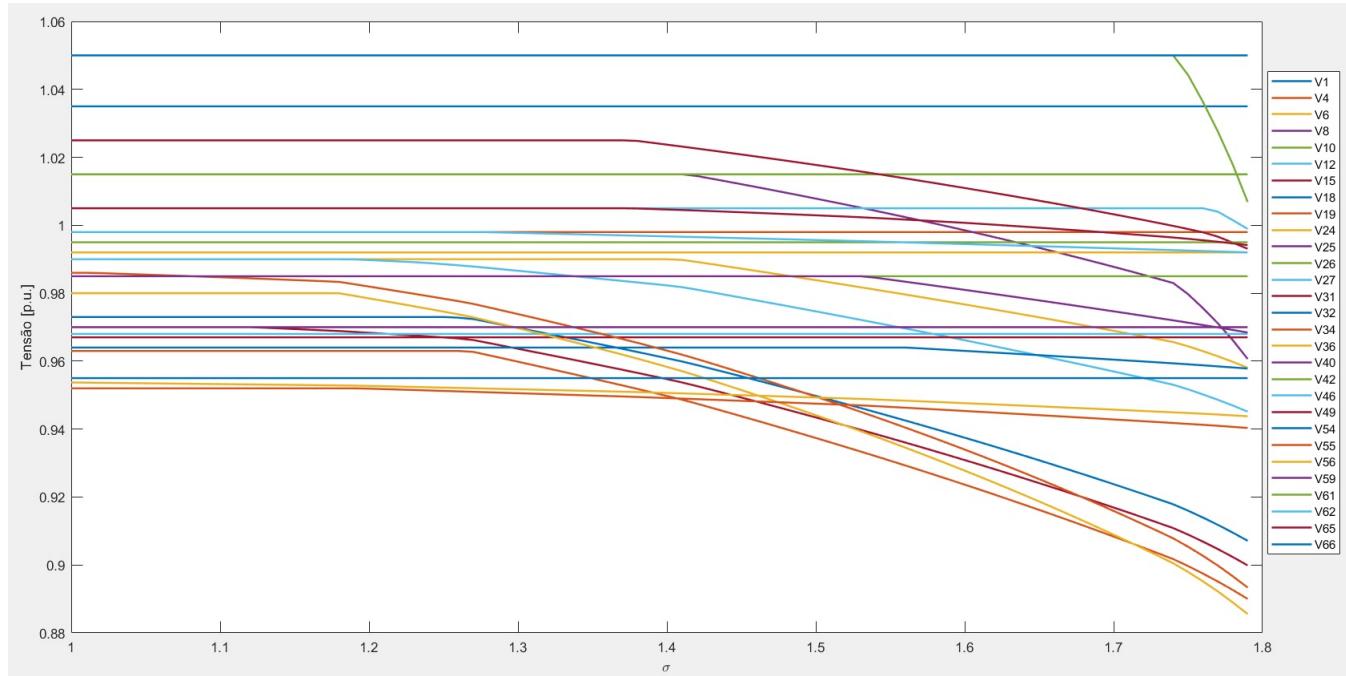


Figura 4.38: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras de geração com limites de geração de potência reativa - Barras 1 a 66

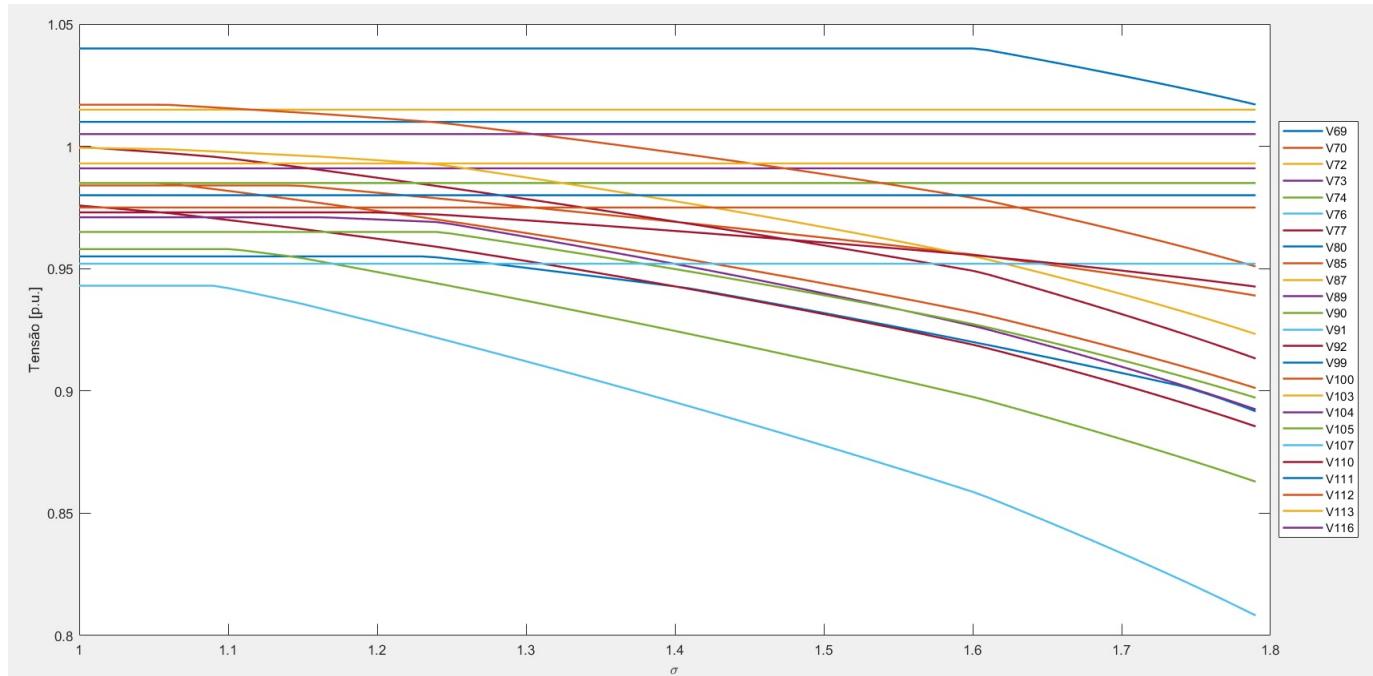


Figura 4.39: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 118 barras de geração com limites de geração de potência reativa - Barras 69 a 116

Em  $\sigma = 1,79$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 1,79$ .

O perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema

pode ser visto na Figura 4.40. Nela, é possível observar que a matriz atinge, de maneira contínua, a singularidade no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,79$ ).

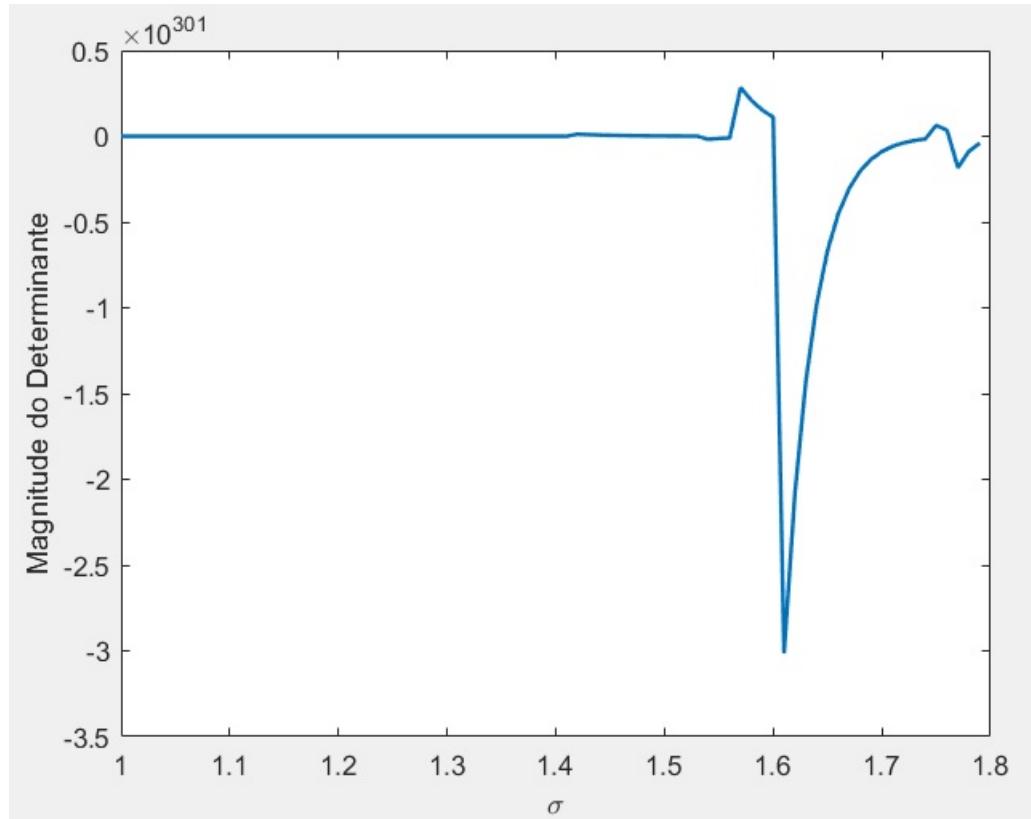


Figura 4.40: Perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema de 118 barras

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,79$ ) pode ser visto na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,79$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 118 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.035	0	741.0946	132.5083	0	0	0
2	0	0.91339	-33.8072	0	0	35.8	16.11	0
3	0	0.9117	-33.1942	0	0	69.81	17.9	0
4	2	0.998	-26.2374	-17.5062	287.2673	53.7	21.48	0
5	0	0.98405	-25.0991	0	0	0	0	-0.4
6	2	0.95805	-30.3194	0	50	93.08	39.38	0
7	0	0.95175	-31.1471	0	0	34.01	3.58	0
8	2	0.96065	-14.9792	-54.4636	300	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
9	0	0.95083	1.5585	0	0	0	0	0
10	2	1.0068	18.3075	875.3086	200	0	0	0
11	0	0.94313	-30.879	0	0	125.3	41.17	0
12	2	0.94515	-31.7901	165.3361	120	84.13	17.9	0
13	0	0.90372	-33.9357	0	0	60.86	28.64	0
14	0	0.92818	-33.619	0	0	25.06	1.79	0
15	2	0.89988	-35.5763	0	30	161.1	53.7	0
16	0	0.92892	-32.7565	0	0	44.75	17.9	0
17	0	0.94901	-30.0836	0	0	19.69	5.37	0
18	2	0.90712	-34.9199	0	50	107.4	60.86	0
19	2	0.89002	-36.2918	0	24	80.55	44.75	0
20	0	0.87015	-34.2766	0	0	32.22	5.37	0
21	0	0.86883	-30.7643	0	0	25.06	14.32	0
22	0	0.89433	-25.2688	0	0	17.9	8.95	0
23	0	0.97717	-15.5302	0	0	12.53	5.37	0
24	2	0.992	-16.6287	-25.2867	49.5923	0	0	0
25	2	1.05	-1.1157	427.9287	109.9234	0	0	0
26	2	1.015	2.6183	610.7709	169.8459	0	0	0
27	2	0.968	-27.0145	-17.5062	102.8388	110.98	23.27	0
28	0	0.95436	-30.3257	0	0	30.43	12.53	0
29	0	0.95894	-32.3855	0	0	42.96	7.16	0
30	0	0.9081	-19.6424	0	0	0	0	0
31	2	0.967	-32.2834	13.6159	111.9767	76.97	48.33	0
32	2	0.95783	-28.2545	0	42	105.61	41.17	0
33	0	0.87959	-38.3356	0	0	41.17	16.11	0
34	2	0.89336	-38.6263	0	24	105.61	46.54	0.14
35	0	0.88545	-39.6723	0	0	59.07	16.11	0
36	2	0.88556	-39.6695	0	24	55.49	30.43	0
37	0	0.90166	-37.703	0	0	0	0	-0.25
38	0	0.8577	-24.6835	0	0	0	0	0
39	0	0.92192	-49.7736	0	0	48.33	19.69	0
40	2	0.97	-54.4876	-89.476	239.6224	35.8	41.17	0
41	0	0.95996	-56.3575	0	0	66.23	17.9	0
42	2	0.985	-56.4613	-114.7627	172.6643	66.23	41.17	0
43	0	0.86568	-37.8922	0	0	32.22	12.53	0
44	0	0.88382	-31.3506	0	0	28.64	14.32	0.1
45	0	0.90709	-27.2941	0	0	94.87	39.38	0.1

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
46	2	0.99892	-22.2532	36.9575	100	50.12	17.9	0.1
47	0	0.98713	-17.2946	0	0	60.86	0	0
48	0	0.98638	-18.5956	0	0	35.8	19.69	0.15
49	2	0.99308	-16.5778	396.8066	210	155.73	53.7	0
50	0	0.96266	-20.9504	0	0	30.43	7.16	0
51	0	0.9194	-26.6547	0	0	30.43	14.32	0
52	0	0.90708	-28.734	0	0	32.22	8.95	0
53	0	0.91285	-31.1336	0	0	41.17	19.69	0
54	2	0.955	-29.8255	93.3663	248.351	202.27	57.28	0
55	2	0.94034	-29.8415	0	23	112.77	39.38	0
56	2	0.94378	-29.7961	0	15	150.36	32.22	0
57	0	0.94191	-26.7692	0	0	21.48	5.37	0
58	0	0.92403	-28.5621	0	0	21.48	5.37	0
59	2	0.96843	-15.8078	301.4952	180	495.83	202.27	0
60	0	0.9886	-7.7422	0	0	139.62	5.37	0
61	2	0.995	-6.1384	311.2208	50.5714	0	0	0
62	2	0.99202	-6.837	0	20	137.83	25.06	0
63	0	0.94931	-9.1152	0	0	0	0	0
64	0	0.96996	-5.5835	0	0	0	0	0
65	2	0.99416	0.22863	760.5459	200	0	0	0
66	2	1.05	2.5297	762.4911	88.2633	69.81	32.22	0
67	0	1.0074	-3.1339	0	0	50.12	12.53	0
68	0	0.99855	-1.3857	0	0	0	0	0
69	2	0.89164	-35.0837	0	15	91.29	48.33	0
70	2	0.93897	-14.7502	0	32	118.14	35.8	0
71	0	0.96362	-15.7494	0	0	0	0	0
72	2	0.98	-17.6131	-23.3416	6.8272	0	0	0
73	2	0.991	-16.3902	-11.6708	61.8434	0	0	0
74	2	0.86291	-16.8937	0	9	121.72	48.33	0.12
75	0	0.87206	-14.1151	0	0	84.13	19.69	0
76	2	0.8082	-17.0865	0	23	121.72	64.44	0
77	2	0.91326	-5.8168	0	70	109.19	50.12	0
78	0	0.91012	-5.9851	0	0	127.09	46.54	0
79	0	0.92482	-4.393	0	0	69.81	57.28	0.2
80	2	1.0171	2.3525	927.8271	280	232.7	46.54	0
81	0	0.98351	0.060587	0	0	0	0	0
82	0	0.86074	-1.1212	0	0	96.66	48.33	0.2

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
83	0	0.85049	4.2104	0	0	35.8	17.9	0.1
84	0	0.86799	13.7966	0	0	19.69	12.53	0
85	2	0.90116	18.8369	0	23	42.96	26.85	0
86	0	0.92087	15.6647	0	0	37.59	17.9	0
87	2	1.015	15.8737	7.7805	43.8603	0	0	0
88	0	0.93317	28.6961	0	0	85.92	17.9	0
89	2	1.005	38.4787	1180.6941	233.1082	0	0	0
90	2	0.985	13.1125	-165.3361	224.65	139.62	75.18	0
91	2	0.98	8.8914	-19.4513	75.9712	0	0	0
92	2	0.88549	5.3586	0	9	116.35	17.9	0
93	0	0.87489	0.92279	0	0	21.48	12.53	0
94	0	0.88442	-1.9383	0	0	53.7	28.64	0
95	0	0.86294	-3.0875	0	0	75.18	55.49	0
96	0	0.88575	-2.1461	0	0	68.02	26.85	0
97	0	0.93902	-0.49985	0	0	26.85	16.11	0
98	0	0.97233	-1.9719	0	0	60.86	14.32	0
99	2	1.01	-5.0336	-81.6955	90.8078	0	0	0
100	2	0.95088	-3.1848	490.1728	155	66.23	32.22	0
101	0	0.89054	-1.5117	0	0	39.38	26.85	0
102	0	0.883	2.8462	0	0	8.95	5.37	0
103	2	0.92326	-11.2377	77.8052	40	41.17	28.64	0
104	2	0.89245	-17.7406	0	23	68.02	44.75	0
105	2	0.89723	-20.4721	0	23	55.49	46.54	0.2
106	0	0.88955	-21.0165	0	0	76.97	28.64	0
107	2	0.952	-28.201	-42.7929	109.6667	50.12	21.48	0.06
108	0	0.90959	-23.1944	0	0	3.58	1.79	0
109	0	0.91611	-24.22	0	0	14.32	5.37	0
110	2	0.94264	-26.2035	0	23	69.81	53.7	0.06
111	2	0.98	-23.3276	70.0247	29.1474	0	0	0
112	2	0.975	-33.0205	-83.6406	130.7948	44.75	23.27	0
113	2	0.993	-30.8357	-11.6708	165.1454	0	0	0
114	0	0.9521	-28.7392	0	0	14.32	5.37	0
115	0	0.95202	-28.7351	0	0	39.38	12.53	0
116	2	1.005	-2.2508	-357.904	188.8469	0	0	0
117	0	0.90998	-34.8328	0	0	35.8	14.32	0
118	0	0.82803	-16.5259	0	0	59.07	26.85	0

$$K_G = 0.1551$$

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 569.0179								

Note, a partir da Tabela 4.25, que de todas as 54 barras que possuíam limites de geração de potência reativa, 30 barras atingiram o seu limite superior.

## 4.8 Sistema de 300 barras

O sistema de 300 barras possui as seguintes características:

- 1 barra *slack*;
- 68 barras de geração;
- 231 barras de carga;
- 411 linhas de transmissão;
- 62 transformadores em fase;
- 1 transformador defasador.

### 4.8.1 Sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa nas barras de geração

A solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) para o sistema de 300 barras sem considerar os seus limites de geração de potência reativa pode ser observada na Tabela 4.26.

Tabela 4.26: Solução do caso base ( $\sigma = 1$ ) - Sistema 300 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7049	3	1.0507	0	47.2707	118.117	0	0	0
2	0	1.0335	26.8904	0	0	56	15	0
3	0	0.99019	25.9816	0	0	20	0	0
4	0	1.018	23.6634	0	0	0	0	0
5	0	1.0161	24.0753	0	0	353	130	0
6	0	1.0287	26.1918	0	0	120	41	0
7	0	0.9876	25.5958	0	0	0	0	0
8	2	1.0153	21.0863	-5.0916	51.5298	58	14	0
9	0	1.0015	22.1247	0	0	96	43	0
10	2	1.0205	20.6157	-5.0916	29.1534	148	33	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
11	0	1.0051	21.6257	0	0	83	21	0
12	0	0.9931	24.564	0	0	0	0	0
13	0	0.99725	18.6277	0	0	58	10	0
14	0	0.98881	12.9529	0	0	160	60	0
15	0	1.0191	8.2149	0	0	126.7	23	0
16	0	1.0045	14.7414	0	0	0	0	0
17	0	1.0593	3.3685	0	0	561	220	0
19	0	0.97433	20.0798	0	0	0	0	0
20	2	1.001	16.738	-10.1833	62.9997	595	120	0
21	0	0.97106	20.8313	0	0	77	1	0
22	0	0.99533	17.289	0	0	81	23	0
23	0	1.0482	23.3721	0	0	21	7	0
24	0	1.002	25.4335	0	0	0	0	0
25	0	1.0194	20.8965	0	0	45	12	0
26	0	0.99193	17.7366	0	0	28	9	0
27	0	0.96787	14.4966	0	0	69	13	0
33	0	1.0072	1.2828	0	0	55	6	0
34	0	1.0131	7.5771	0	0	0	0	0
35	0	0.97117	-8.1762	0	0	0	0	0
36	0	0.98347	-4.9913	0	0	0	0	0
37	0	1.006	0.6309	0	0	85	32	0
38	0	1.0031	0.53993	0	0	155	18	0
39	0	1.0292	10.0882	0	0	0	0	0
40	0	1.0064	0.26767	0	0	46	-21	0
41	0	1.014	2.4376	0	0	86	0	0
42	0	1.0164	8.3575	0	0	0	0	0
43	0	0.98035	-2.023	0	0	39	9	0
44	0	0.98572	-1.3619	0	0	195	29	0
45	0	0.99257	1.9061	0	0	0	0	0
46	0	1.0041	4.7227	0	0	0	0	0
47	0	0.95642	-6.7018	0	0	58	11.8	0
48	0	0.98851	-1.6098	0	0	41	19	0
49	0	1.0368	-0.3083	0	0	92	26	0
51	0	1.0123	0.88109	0	0	-5	5	0
52	0	0.98313	0.042337	0	0	61	28	0
53	0	0.97511	-2.7708	0	0	69	3	0
54	0	0.98464	-1.1841	0	0	10	1	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
55	0	1.0002	1.8531	0	0	22	10	0
57	0	1.0276	8.8112	0	0	98	20	0
58	0	0.98892	11.9163	0	0	14	1	0
59	0	0.97634	12.967	0	0	218	106	0
60	0	0.99598	8.0644	0	0	0	0	0
61	0	0.98806	14.958	0	0	227	110	0
62	0	1.0067	17.795	0	0	0	0	0
63	2	0.9583	0.61415	0	38.7889	70	30	0
64	0	0.94329	5.3984	0	0	0	0	0
69	0	0.9537	-7.5362	0	0	0	0	0
70	0	0.93918	-17.8238	0	0	56	20	0
71	0	0.97057	-12.4834	0	0	116	38	0
72	0	0.96342	-9.9334	0	0	57	19	0
73	0	0.96157	-8.3838	0	0	224	71	0
74	0	0.97174	-4.6643	0	0	0	0	0
76	2	0.9632	-9.1536	0	104.8579	208	107	0
77	0	0.97899	-7.287	0	0	74	28	0
78	0	0.98503	-6.3736	0	0	0	0	0
79	0	0.9733	-7.3012	0	0	48	14	0
80	0	0.97932	-6.912	0	0	28	7	0
81	0	1.0044	-0.81828	0	0	0	0	0
84	2	1.025	0.68976	381.8723	148.0839	37	13	0
85	0	0.98038	-1.5447	0	0	0	0	0
86	0	0.97956	2.3144	0	0	0	0	0
87	0	0.97803	9.7863	0	0	0	0	0
88	0	0.99051	-3.2331	0	0	0	0	0
89	0	1.0221	4.0245	0	0	44.2	0	0
90	0	1.017	2.6121	0	0	66	0	0
91	2	1.052	6.4575	157.8406	63.5833	17.4	0	0
92	2	1.052	8.8525	295.3146	46.6544	15.8	0	0
94	0	0.98269	7.8113	0	0	60.3	0	0
97	0	1.0141	2.7883	0	0	39.9	0	0
98	2	1	1.5419	69.2462	-0.70953	66.7	0	0
99	0	0.9884	-4.3516	0	0	83.5	0	0
100	0	1.0024	1.711	0	0	0	0	0
102	0	0.99547	1.0281	0	0	77.8	0	0
103	0	1.0244	3.3326	0	0	32	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
104	0	0.991	-1.1606	0	0	8.6	0	0
105	0	1.0172	2.3092	0	0	49.6	0	0
107	0	1.0017	-0.99654	0	0	4.6	0	0
108	2	0.99	-4.3597	119.1442	49.4618	112.1	0	0
109	0	0.96153	-9.8313	0	0	30.7	0	0
110	0	0.9637	-8.6626	0	0	63	0	0
112	0	0.9588	-11.9402	0	0	19.6	0	0
113	0	0.94995	-9.027	0	0	26.2	0	0
114	0	0.96109	-11.7609	0	0	18.2	0	0
115	0	0.95293	8.793	0	0	0	0	0
116	0	1.0248	9.7344	0	0	0	0	0
117	0	0.92734	17.8886	0	0	0	0	3.25
118	0	0.92273	18.5175	0	0	14.1	650	0
119	2	1.0435	28.1681	1965.3696	1102.5429	0	0	0
120	0	0.95705	14.0538	0	0	777	215	0.55
121	0	0.98099	9.914	0	0	535	55	0
122	0	0.96406	7.8772	0	0	229.1	11.8	0
123	0	0.9949	4.4982	0	0	78	1.4	0
124	2	1.0233	8.8697	244.3983	146.1082	276.4	59.3	0
125	2	1.0103	3.2008	0	258.2117	514.8	82.7	0
126	0	0.98904	8.7597	0	0	57.9	5.1	0
127	0	0.98785	10.9196	0	0	380.8	37	0
128	0	0.99552	16.4414	0	0	0	0	0
129	0	0.99678	16.8104	0	0	0	0	0
130	0	1.0144	25.8277	0	0	0	0	0
131	0	0.98112	25.6993	0	0	0	0	0
132	0	1.0002	23.4235	0	0	0	0	0
133	0	0.99678	15.897	0	0	0	0	0
134	0	1.0063	13.637	0	0	0	0	0
135	0	0.9995	15.0642	0	0	169.2	41.6	0
136	0	1.0301	23.788	0	0	55.2	18.2	0
137	0	1.0411	20.3214	0	0	273.6	99.8	0
138	2	1.055	15.3945	-196.0278	265.9343	826.7	135.2	0
139	0	1.0066	18.347	0	0	595	83.3	0
140	0	1.0326	18.3548	0	0	387.7	114.7	0
141	2	1.051	21.8913	286.1497	99.5845	145	58	0
142	0	0.99924	18.5647	0	0	56.5	24.5	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
143	2	1.0435	25.0198	708.755	216.7541	89.5	35.5	0
144	0	1.0075	18.3584	0	0	0	0	0
145	0	1.0006	21.2168	0	0	24	14	0
146	2	1.0528	25.9481	85.5394	79.1772	0	0	0
147	2	1.0528	30.1074	220.9768	-30.2503	0	0	0
148	0	1.0542	21.3151	0	0	63	25	0
149	2	1.0735	26.4068	104.8876	65.2078	0	0	0
150	0	0.98137	25.9792	0	0	0	0	0
151	0	1.0014	24.4161	0	0	0	0	0
152	2	1.0535	31.7077	378.8174	27.6896	17	9	0
153	2	1.0435	33.1361	219.9585	26.3107	0	0	0
154	0	0.96202	20.9673	0	0	70	5	0.345
155	0	0.9936	29.5868	0	0	200	50	0
156	2	0.963	27.8929	0	103.6192	75	50	0
157	0	0.97436	10.2743	0	0	123.5	-24.3	0
158	0	0.9873	10.7375	0	0	0	0	0
159	0	0.97655	12.4892	0	0	33	16.5	0
160	0	0.99334	9.6885	0	0	0	0	0
161	0	1.0251	31.6147	0	0	35	15	0
162	0	0.94641	42.6747	0	0	85	24	0
163	0	0.99728	25.134	0	0	0	0.4	0
164	0	0.93948	32.7663	0	0	0	0	-2.12
165	0	0.96968	51.206	0	0	0	0	0
166	0	0.98017	55.3737	0	0	0	0	-1.03
167	0	0.96515	14.1169	0	0	299.9	95.7	0
168	0	0.99553	16.4204	0	0	0	0	0
169	0	0.98136	14.5478	0	0	0	0	0
170	2	0.929	20.4492	208.7569	107.273	481.8	205	0
171	2	0.9829	11.3926	0	201.1538	763.6	291.1	0
172	0	1.0128	15.6271	0	0	26.5	0	0
173	0	0.96674	8.743	0	0	163.5	43	0.53
174	0	1.0571	19.1134	0	0	0	0	0
175	0	0.95721	14.0737	0	0	176	83	0
176	2	1.0522	26.2064	232.1784	51.4447	5	4	0
177	2	1.0077	22.0405	85.5394	46.8202	28	12	0
178	0	0.93207	14.7083	0	0	427.4	173.6	0
179	0	0.9562	11.848	0	0	74	29	0.45

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
180	0	0.97146	18.2384	0	0	69.5	49.3	0
181	0	1.048	20.4543	0	0	73.4	0	0
182	0	1.036	17.6318	0	0	240.7	89	0
183	0	0.97031	29.8125	0	0	40	4	0
184	0	1.0307	14.8927	0	0	136.8	16.6	0
185	2	1.0522	17.4295	203.6652	71.2813	0	0	0
186	2	1.065	24.0211	1221.9915	325.0312	59.8	24.3	0
187	2	1.065	23.2283	1221.9915	372.9678	59.8	24.3	0
188	0	1.0501	21.0723	0	0	182.6	43.6	0
189	0	0.99435	-7.4251	0	0	7	2	0
190	2	1.0551	-1.0245	483.705	736.2142	0	0	-1.5
191	2	1.0435	34.9751	2009.1576	752.9617	489	53	0
192	0	0.92674	10.7066	0	0	800	72	0
193	0	0.98439	-7.8182	0	0	0	0	0
194	0	1.018	-0.20154	0	0	0	0	0
195	0	1.0129	-1.9017	0	0	0	0	0
196	0	0.9641	-6.7577	0	0	10	3	0
197	0	0.98505	-5.105	0	0	43	14	0
198	2	1.015	-1.9317	431.7703	135.9618	64	21	0
199	0	0.94979	-7.3356	0	0	35	12	0
200	0	0.9528	-7.1328	0	0	27	12	0
201	0	0.96008	-9.34	0	0	41	14	0
202	0	0.98239	-6.6666	0	0	38	13	0
203	0	0.99891	-3.6819	0	0	42	14	0
204	0	0.96508	-7.4647	0	0	72	24	0
205	0	0.9774	-7.8593	0	0	0	-5	0
206	0	0.98763	-9.8514	0	0	12	2	0
207	0	0.99911	-10.1633	0	0	-21	-14.2	0
208	0	0.98816	-8.0118	0	0	7	2	0
209	0	0.99784	-7.1905	0	0	38	13	0
210	0	0.97577	-5.5731	0	0	0	0	0
211	0	0.99211	-4.6395	0	0	96	7	0
212	0	1.0008	-3.684	0	0	0	0	0
213	2	1.01	7.8971	276.9847	49.6106	0	0	0
214	0	0.98985	1.9252	0	0	22	16	0
215	0	0.98042	-0.84776	0	0	47	26	0
216	0	0.9661	-3.0568	0	0	176	105	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
217	0	1.0076	-2.5168	0	0	100	75	0
218	0	0.9944	-2.91	0	0	131	96	0
219	0	1.0374	-1.5072	0	0	0	0	0
220	2	1.008	-1.8147	101.8326	156.0523	285	100	0
221	2	1	-2.4133	458.2468	269.2828	171	70	0
222	2	1.05	-3.3969	254.5816	199.819	328	188	0
223	0	0.99562	-2.6102	0	0	428	232	0
224	0	0.98848	-1.3906	0	0	173	99	0
225	0	0.93356	10.4398	0	0	410	40	0
226	0	1.0043	-1.5682	0	0	0	0	0
227	2	1	-7.4645	308.5528	294.0797	538	369	0
228	0	1.0261	-1.1025	0	0	223	148	0
229	0	1.0356	-0.10897	0	0	96	46	0
230	2	1.04	6.1861	351.3225	85.9684	0	0	0
231	0	1.0408	-1.527	0	0	159	107	-3
232	0	1.028	-3.5297	0	0	448	143	0
233	2	1	-6.1438	305.4979	159.8568	404	212	0
234	0	1.0302	-1.0205	0	0	572	244	0
235	0	1.0092	-1.0859	0	0	269	157	0
236	2	1.0165	4.6087	610.9957	351.3583	0	0	0
237	0	1.0414	-1.4038	0	0	0	0	0
238	2	1.01	-1.0026	254.5816	248.5474	255	149	-1.5
239	2	1	4.1697	560.0794	68.9722	0	0	0
240	0	1.0237	-0.54167	0	0	0	0	-1.4
241	2	1.05	3.3134	585.9755	63.8603	0	0	0
242	2	0.993	1.9241	173.1155	71.4432	0	0	0
243	2	1.01	0.24073	85.5394	52.3573	8	3	0
244	0	0.99202	-0.71844	0	0	0	0	0
245	0	0.97088	-1.4393	0	0	61	30	0
246	0	0.96482	-2.2807	0	0	77	33	0
247	0	0.96829	-2.2775	0	0	61	30	0
248	0	0.97374	-6.0473	0	0	29	14	0.456
249	0	0.97296	-6.4737	0	0	29	14	0
250	0	1.0174	-4.6074	0	0	-23	-17	0
281	0	1.025	-0.46881	0	0	-33.1	-29.4	0
319	0	1.0093	20.8585	0	0	115.8	-24	0
320	0	1.0076	17.2384	0	0	2.4	-12.6	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
322	0	0.99525	-1.4427	0	0	2.4	-3.9	0
323	0	0.96837	2.8346	0	0	-14.9	26.5	0
324	0	0.97362	-7.495	0	0	24.7	-1.2	0
526	0	0.9418	-16.0837	0	0	145.3	-34.9	0
528	0	0.95964	-20.2978	0	0	28.1	-20.5	0
531	0	0.95421	-11.5777	0	0	14	2.5	0
552	0	0.99423	-5.6493	0	0	-11.1	-1.4	0
562	0	0.93047	-10.952	0	0	50.5	17.4	0
609	0	0.95222	-11.1547	0	0	29.6	0.6	0
664	0	0.9957	2.1727	0	0	-113.7	76.7	0
1190	0	1.0129	26.9056	0	0	100.31	29.17	0
1200	0	1.0229	15.3035	0	0	-100	34.17	0
1201	0	1.0184	7.9852	0	0	0	0	0
2040	0	0.95985	3.5934	0	0	0	0	0
7001	2	1.0507	30.3089	475.5583	155.0598	0	0	0
7002	2	1.0507	31.7269	634.4172	106.5374	0	0	0
7003	2	1.0323	33.281	1232.1747	491.017	0	0	0
7011	2	1.0145	24.2015	238.2883	55.211	0	0	0
7012	2	1.0507	31.0678	378.8174	215.4923	0	0	0
7017	2	1.0507	6.0647	336.0477	385.9121	0	0	0
7023	2	1.0507	25.6269	188.3904	15.1323	0	0	0
7024	2	1.029	32.154	417.5137	120.6166	0	0	0
7039	2	1.05	18.3464	509.1631	239.6664	0	0	0
7044	2	1.0145	2.3379	37.6781	55.2669	0	0	0
1	0	1.0257	25.3649	0	0	90	49	0
7055	2	0.9967	6.7234	45.8247	33.1783	0	0	0
7057	2	1.0212	13.4763	168.0238	101.9563	0	0	0
7061	2	1.0145	20.5079	407.3305	132.4259	0	0	0
7062	2	1.0017	24.8796	407.3305	181.8261	0	0	0
7071	2	0.9893	-7.8289	118.1258	100.3726	0	0	0
7130	2	1.0507	39.6104	1315.6775	356.5969	0	0	0
7139	2	1.0507	24.8096	712.8284	317.6735	0	0	0
7166	2	1.0145	60.377	563.1344	250.7316	0	0	0
9001	0	0.99783	0.60978	0	0	0	0	0
9002	2	0.9945	-8.7925	-4.277	4.3217	0	0	0
9003	0	0.95372	-8.9844	0	0	2.71	0.94	0.024
9004	0	0.9471	-9.1253	0	0	0.86	0.28	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
9005	0	0.99829	0.52733	0	0	0	0	0
9006	0	0.98463	-5.5617	0	0	0	0	0
9007	0	0.96719	-7.3876	0	0	0	0	0
9012	0	1.0007	-5.5281	0	0	0	0	0
9021	0	0.98879	-9.0088	0	0	4.75	1.56	0
9022	0	0.9654	-11.4537	0	0	1.53	0.53	0
9023	0	0.97522	-9.2975	0	0	0	0	0
9024	0	0.97096	-11.2313	0	0	1.35	0.47	0
9025	0	0.96542	-10.3127	0	0	0.45	0.16	0
9026	0	0.96626	-10.2272	0	0	0.45	0.16	0
9031	0	0.90124	-14.4093	0	0	1.84	0.64	0
9032	0	0.91376	-13.2092	0	0	1.39	0.48	0
9033	0	0.8982	-14.7397	0	0	1.89	0.65	0
9034	0	0.9667	-10.4109	0	0	1.55	0.54	0.0172
9035	0	0.92028	-12.5268	0	0	1.66	0.58	0
9036	0	0.92922	-12.1635	0	0	3.03	1	0
9037	0	0.92699	-11.9255	0	0	1.86	0.64	0
9038	0	0.90879	-13.7904	0	0	2.58	0.89	0
9041	0	0.9336	-10.6498	0	0	1.01	0.35	0
9042	0	0.92012	-11.8357	0	0	0.81	0.28	0
9043	0	0.93454	-10.8329	0	0	1.6	0.52	0
9044	0	0.94932	-9.0842	0	0	0	0	0
9051	2	1	-7.8387	-36.4663	15.8086	0	0	0
9052	0	0.9625	-5.5784	0	0	30	23	0
9053	2	1	-6.0389	-26.9653	14.6436	0	0	0
9054	2	1	5.1675	50.9163	30.5665	0	0	0
9055	2	1	4.4336	8.1466	5.6935	0	0	0
9071	0	0.95107	-9.1766	0	0	1.02	0.35	0
9072	0	0.95615	-8.6208	0	0	1.02	0.35	0
9121	0	0.97824	-7.559	0	0	3.8	1.25	0
9533	0	1.0405	-6.5099	0	0	1.19	0.41	0
$K_G = 0.0183$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 426.0270								

Resolvendo o FCC para o sistema de 300 barras sem considerar os limites de geração de potência reativa, é possível obter as curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema. Essas curvas são ilustradas nas figuras 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45,

4.46, 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50.

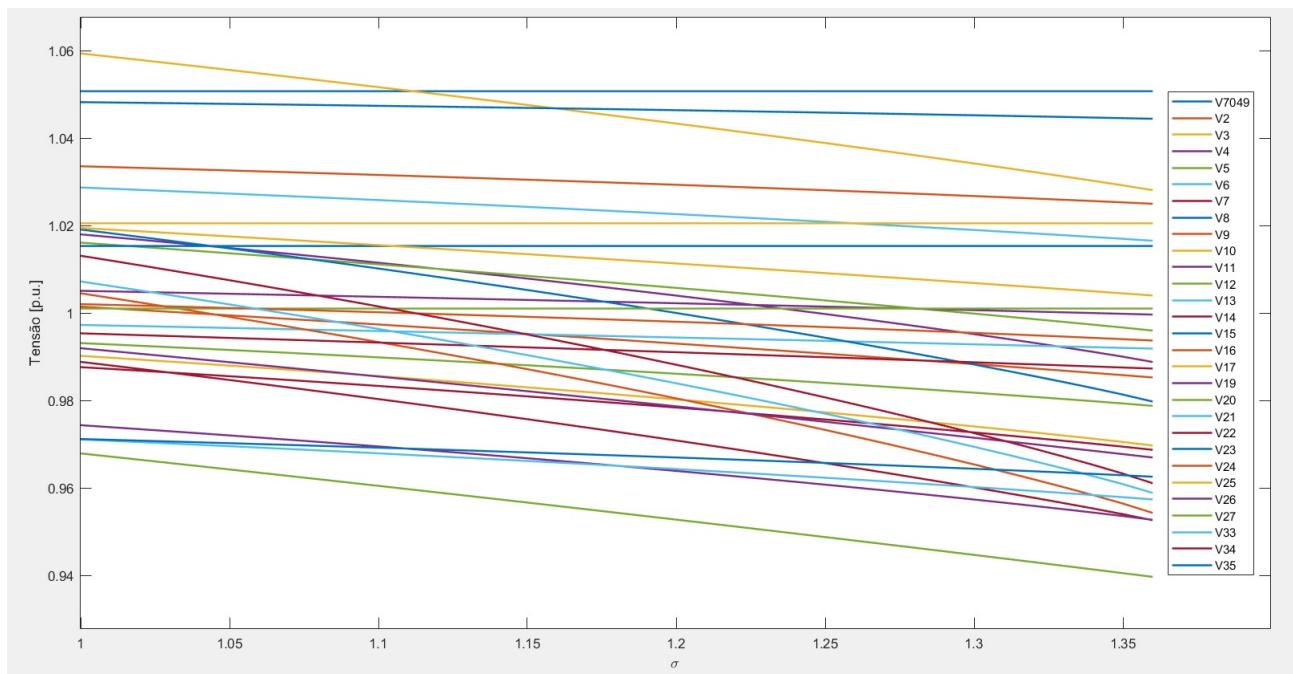


Figura 4.41: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (1)

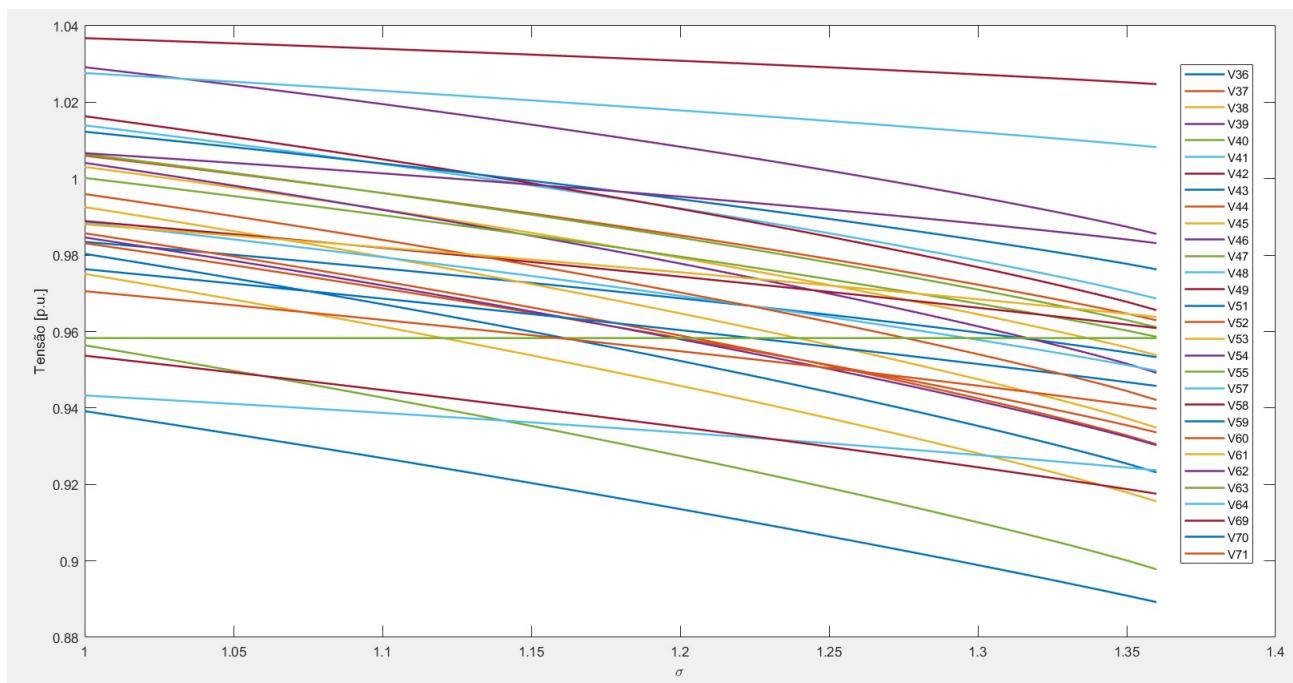


Figura 4.42: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (2)

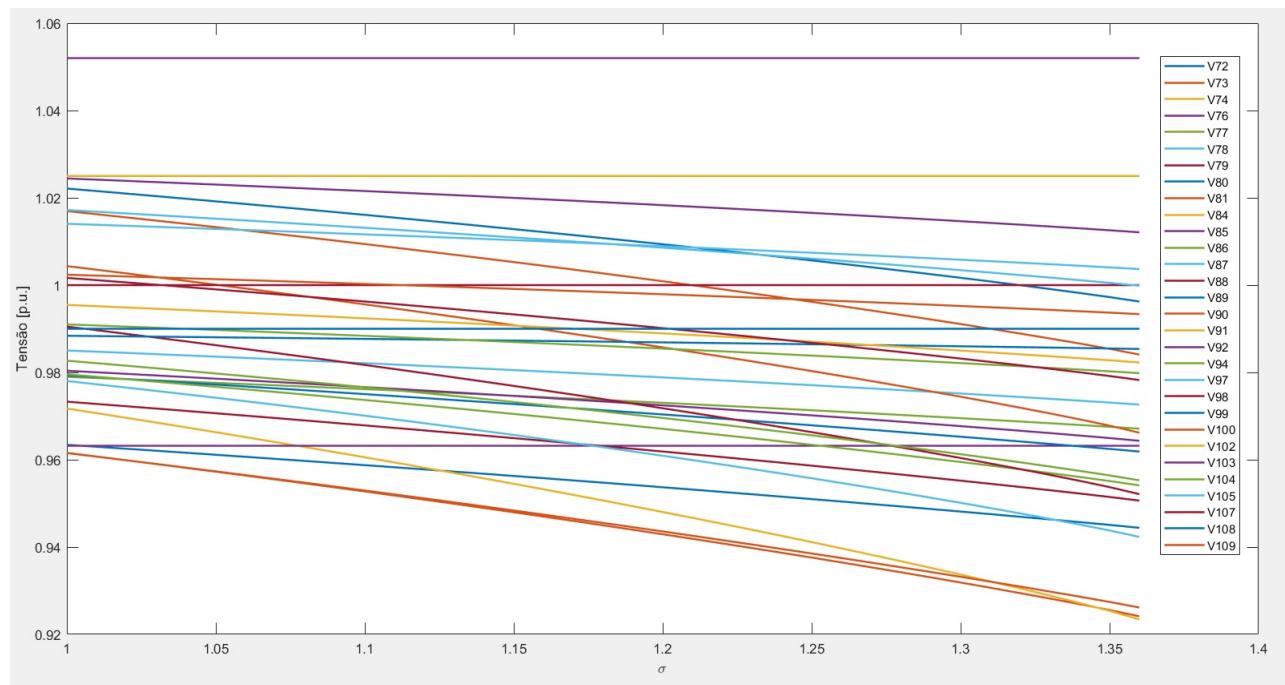


Figura 4.43: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (3)

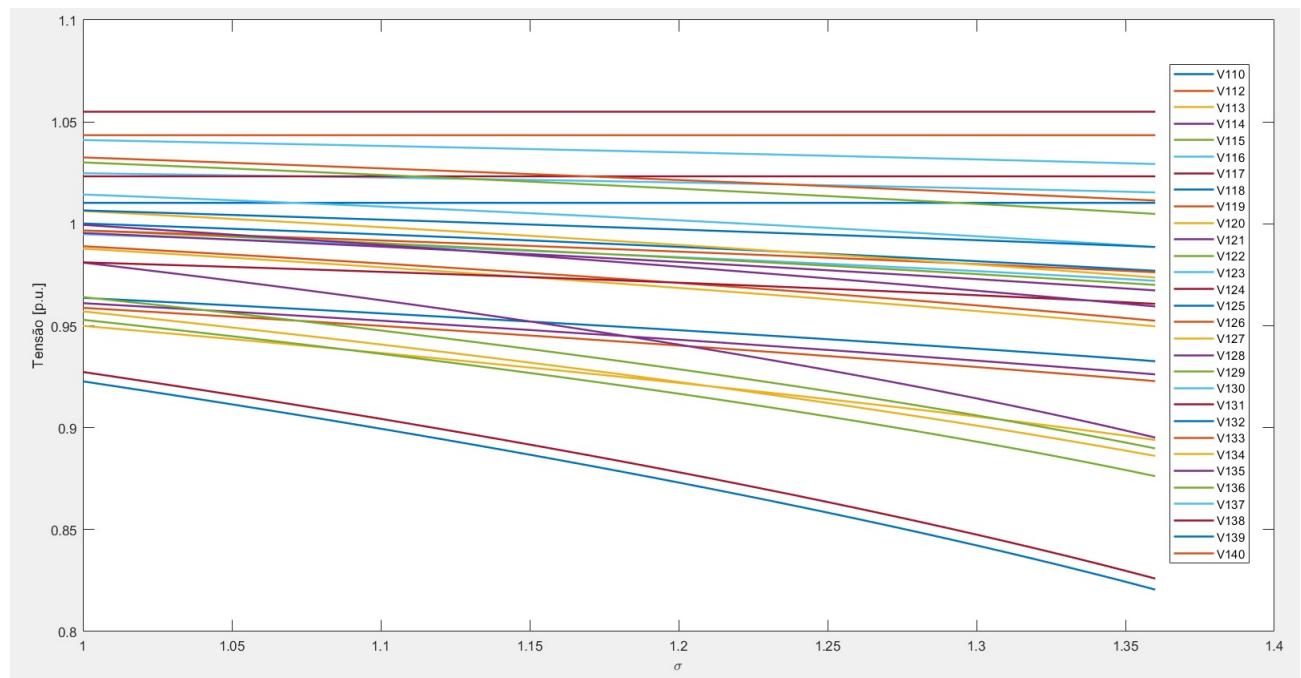


Figura 4.44: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (4)

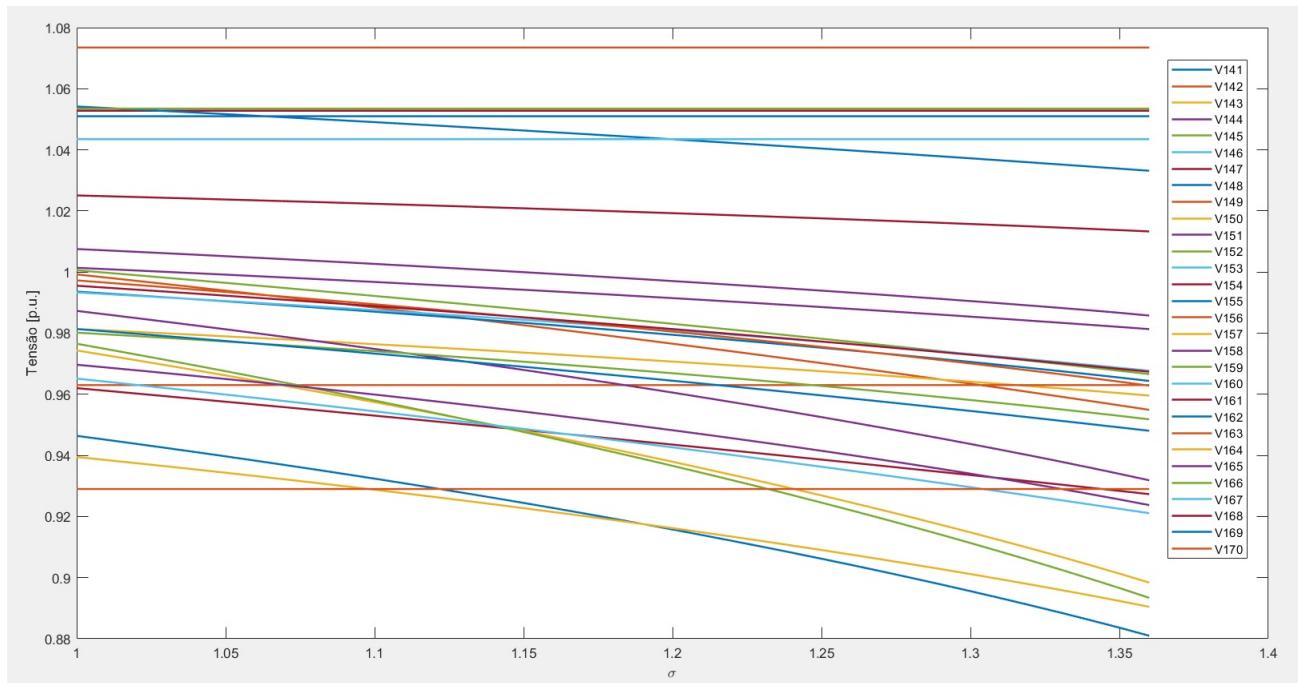


Figura 4.45: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (5)

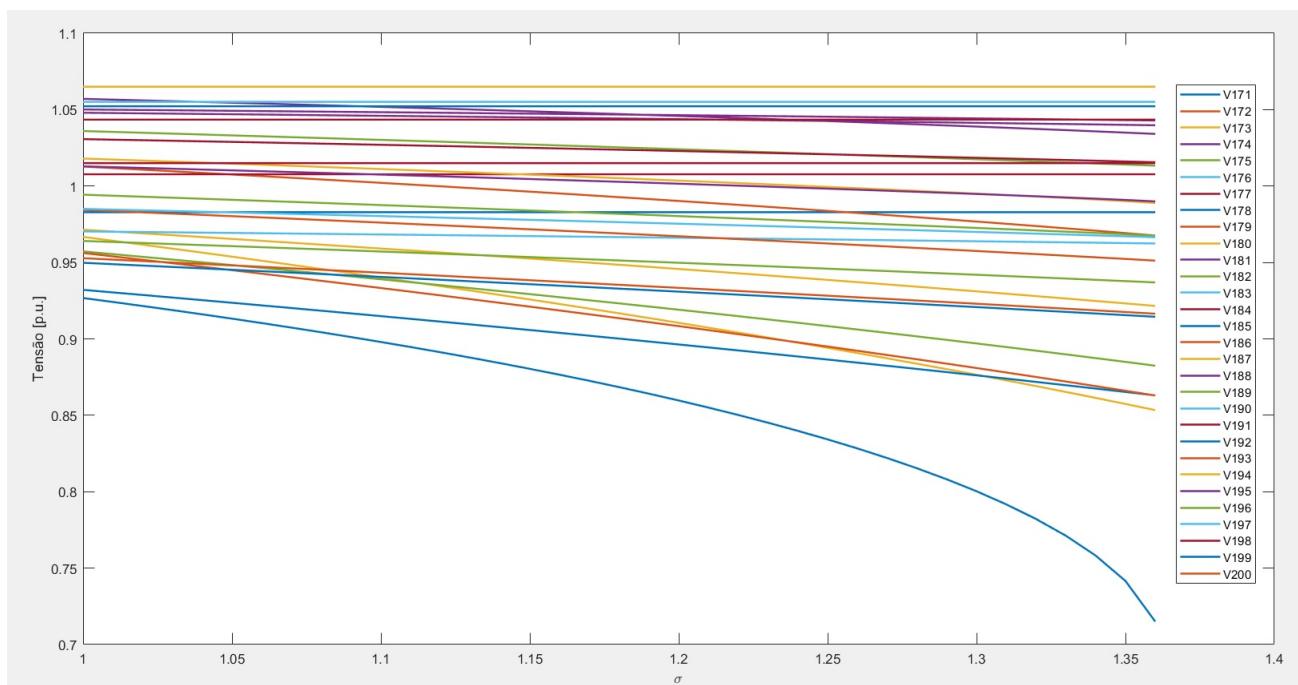


Figura 4.46: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (6)

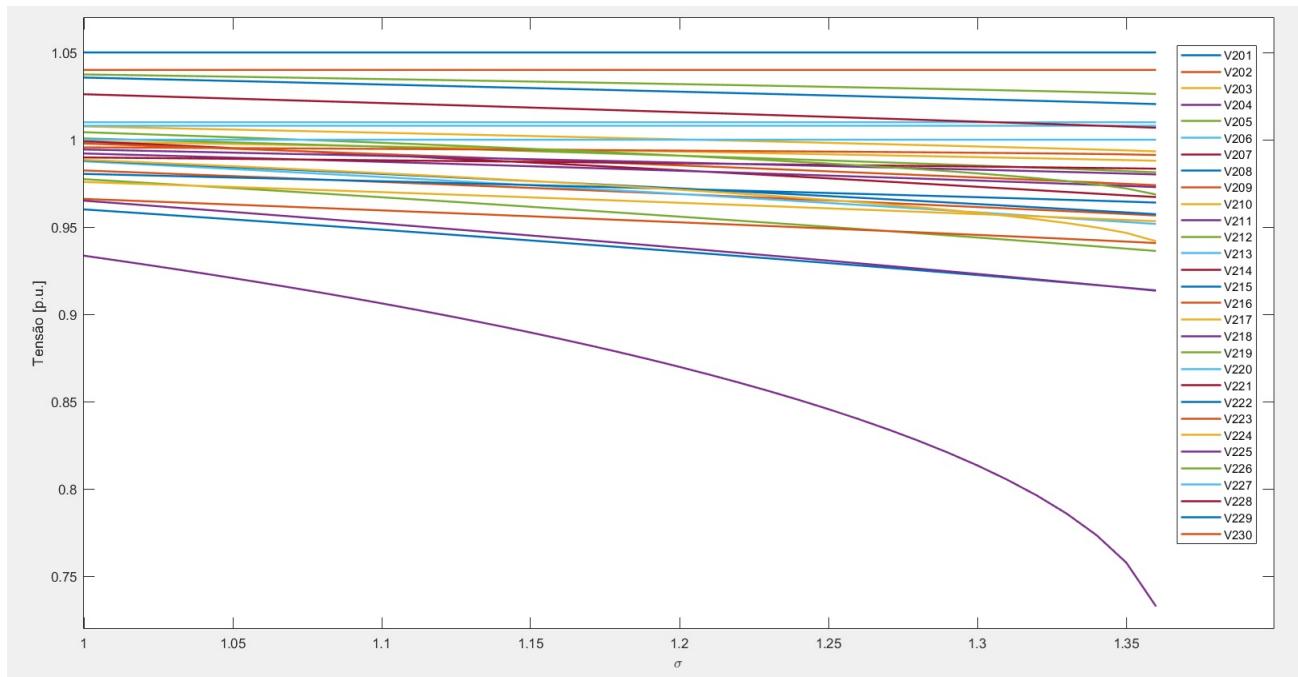


Figura 4.47: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (7)

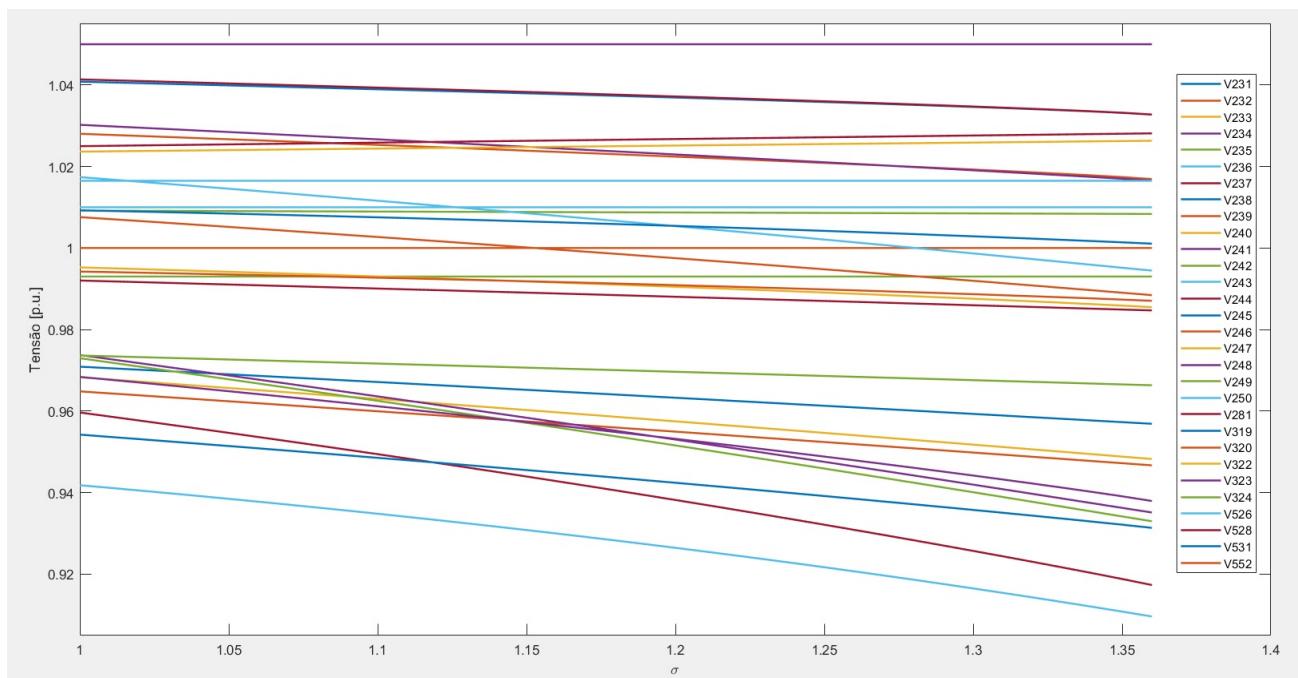


Figura 4.48: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (8)

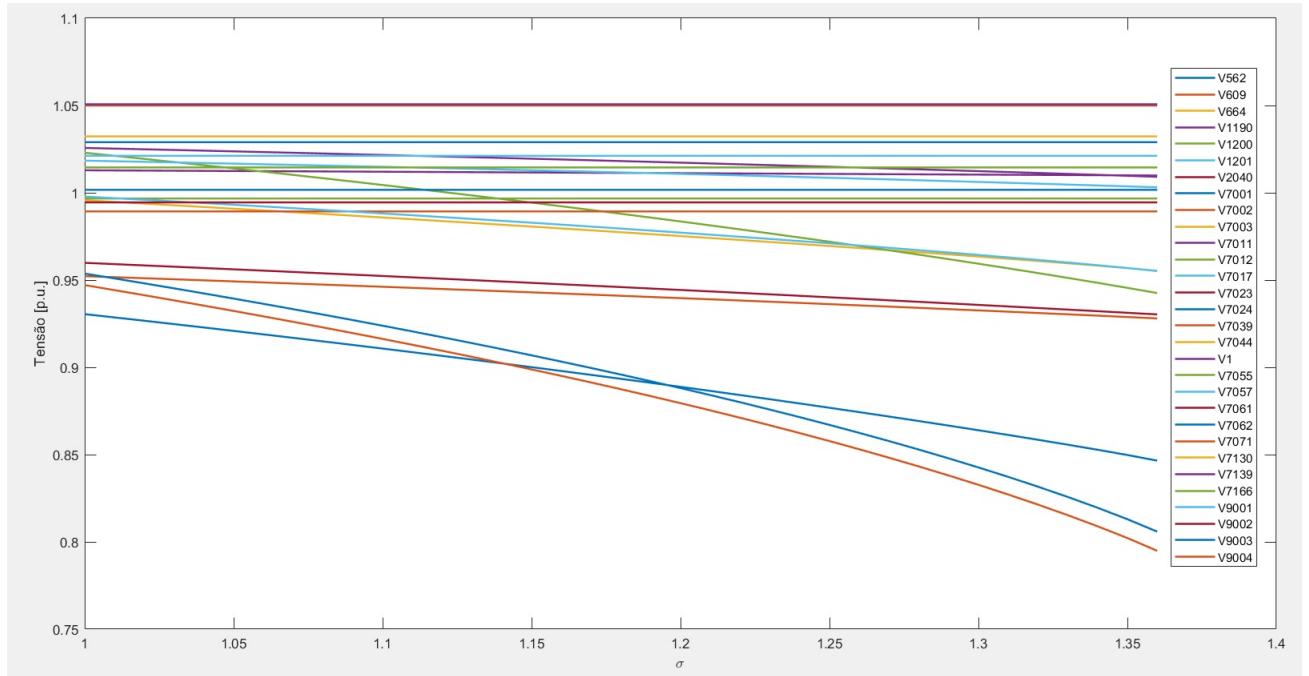


Figura 4.49: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (9)

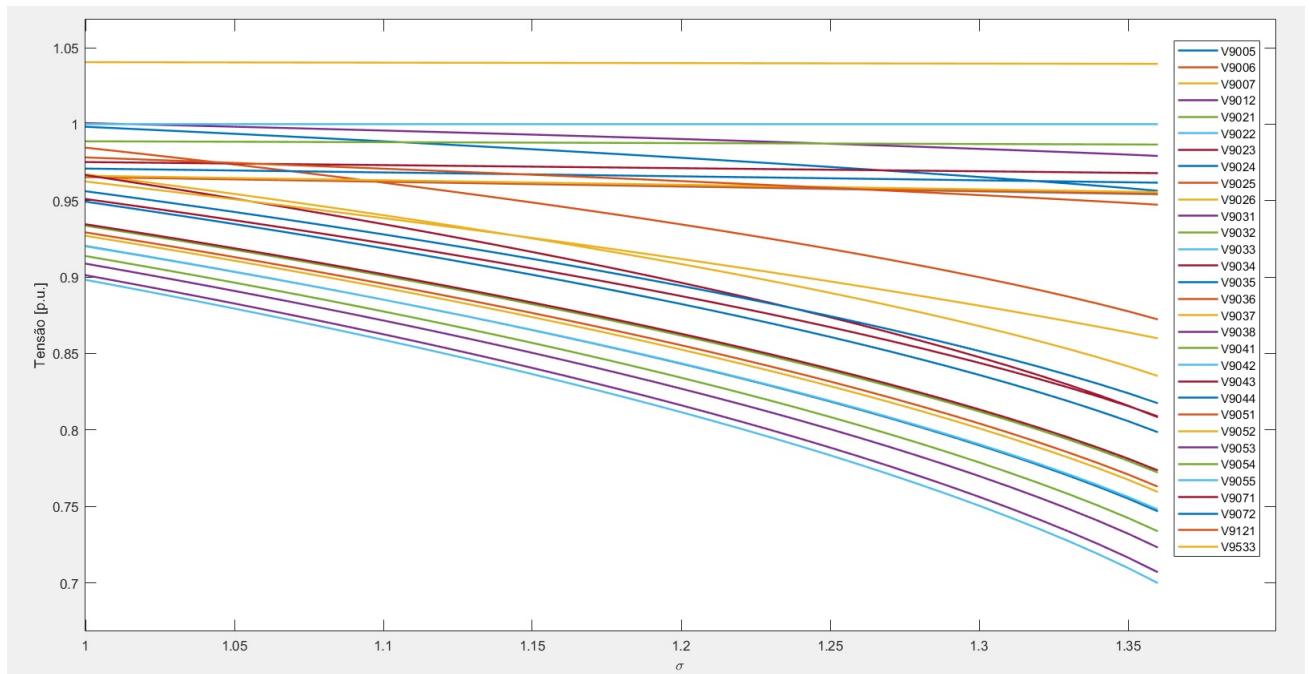


Figura 4.50: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras sem limites de geração de potência reativa (10)

Em  $\sigma = 1,36$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 1,36$ .

No caso do sistema de 300 barras, não foi possível obter o perfil da magnitude

do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema pois a ordem do determinante excede a memória do programa utilizado para realizar as simulações numéricas (*Matlab*).

O estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,36$ ) pode ser visto na Tabela 4.27.

Tabela 4.27: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 1,36$ ) - Sistema de 300 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7049	3	1.051	0.00	64.962	220.16	0	0	0
2	0	1.025	40.01	0	0	76.16	20.4	0
3	0	0.970	39.00	0	0	27.2	0	0
4	0	0.989	35.66	0	0	0	0	0
5	0	0.996	36.33	0	0	480.08	176.8	0
6	0	1.017	39.09	0	0	163.2	55.76	0
7	0	0.969	38.44	0	0	0	0	0
8	2	1.015	31.50	-6.9972	223.92	78.88	19.04	0
9	0	0.985	33.41	0	0	130.56	58.48	0
10	2	1.021	31.34	-6.9972	79.5	201.28	44.88	0
11	0	1.000	32.55	0	0	112.88	28.56	0
12	0	0.979	36.90	0	0	0	0	0
13	0	0.992	28.38	0	0	78.88	13.6	0
14	0	0.953	19.85	0	0	217.6	81.6	0
15	0	0.980	12.76	0	0	172.31	31.28	0
16	0	0.954	22.50	0	0	0	0	0
17	0	1.028	5.23	0	0	762.96	299.2	0
19	0	0.953	30.32	0	0	0	0	0
20	2	1.001	25.77	-13.994	286.74	809.2	163.2	0
21	0	0.957	31.47	0	0	104.72	1.36	0
22	0	0.987	26.62	0	0	110.16	31.28	0
23	0	1.044	35.27	0	0	28.56	9.52	0
24	0	0.994	38.05	0	0	0	0	0
25	0	1.004	31.85	0	0	61.2	16.32	0
26	0	0.967	27.37	0	0	38.08	12.24	0
27	0	0.940	22.70	0	0	93.84	17.68	0
33	0	0.959	2.25	0	0	74.8	8.16	0
34	0	0.961	11.73	0	0	0	0	0
35	0	0.963	-12.31	0	0	0	0	0
36	0	0.953	-7.58	0	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
37	0	0.963	1.19	0	0	115.6	43.52	0
38	0	0.954	1.12	0	0	210.8	24.48	0
39	0	0.986	15.51	0	0	0	0	0
40	0	0.961	0.70	0	0	62.56	-28.56	0
41	0	0.969	3.98	0	0	116.96	0	0
42	0	0.966	12.90	0	0	0	0	0
43	0	0.923	-2.77	0	0	53.04	12.24	0
44	0	0.931	-1.79	0	0	265.2	39.44	0
45	0	0.935	3.13	0	0	0	0	0
46	0	0.949	7.38	0	0	0	0	0
47	0	0.898	-9.88	0	0	78.88	16.048	0
48	0	0.950	-2.16	0	0	55.76	25.84	0
49	0	1.025	-0.43	0	0	125.12	35.36	0
51	0	0.976	1.52	0	0	-6.8	6.8	0
52	0	0.934	0.38	0	0	82.96	38.08	0
53	0	0.916	-3.90	0	0	93.84	4.08	0
54	0	0.930	-1.46	0	0	13.6	1.36	0
55	0	0.959	3.15	0	0	29.92	13.6	0
57	0	1.008	13.55	0	0	133.28	27.2	0
58	0	0.961	18.06	0	0	19.04	1.36	0
59	0	0.946	19.62	0	0	296.48	144.16	0
60	0	0.942	12.43	0	0	0	0	0
61	0	0.964	22.52	0	0	308.72	149.6	0
62	0	0.983	26.60	0	0	0	0	0
63	2	0.958	1.31	0	144.55	95.2	40.8	0
64	0	0.924	8.08	0	0	0	0	0
69	0	0.918	-11.44	0	0	0	0	0
70	0	0.889	-26.24	0	0	76.16	27.2	0
71	0	0.940	-18.34	0	0	157.76	51.68	0
72	0	0.944	-14.73	0	0	77.52	25.84	0
73	0	0.924	-12.37	0	0	304.64	96.56	0
74	0	0.923	-6.92	0	0	0	0	0
76	2	0.963	-14.00	0	327.47	282.88	145.52	0
77	0	0.967	-10.95	0	0	100.64	38.08	0
78	0	0.973	-9.65	0	0	0	0	0
79	0	0.951	-10.92	0	0	65.28	19.04	0
80	0	0.962	-10.18	0	0	38.08	9.52	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
81	0	0.966	-1.11	0	0	0	0	0
84	2	1.025	0.22	524.79	207.74	50.32	17.68	0
85	0	0.964	-2.49	0	0	0	0	0
86	0	0.954	3.31	0	0	0	0	0
87	0	0.942	14.70	0	0	0	0	0
88	0	0.952	-4.78	0	0	0	0	0
89	0	0.996	6.15	0	0	60.112	0	0
90	0	0.984	4.01	0	0	89.76	0	0
91	2	1.052	9.31	216.91	98.982	23.664	0	0
92	2	1.052	12.52	405.84	90.501	21.488	0	0
94	0	0.955	11.70	0	0	82.008	0	0
97	0	1.004	4.08	0	0	54.264	0	0
98	2	1.000	2.02	95.162	23.902	90.712	0	0
99	0	0.985	-6.55	0	0	113.56	0	0
100	0	0.993	2.43	0	0	0	0	0
102	0	0.982	1.49	0	0	105.81	0	0
103	0	1.012	4.85	0	0	43.52	0	0
104	0	0.980	-1.79	0	0	11.696	0	0
105	0	1.000	3.38	0	0	67.456	0	0
107	0	0.978	-1.41	0	0	6.256	0	0
108	2	0.990	-6.63	163.73	138.68	152.46	0	0
109	0	0.926	-14.50	0	0	41.752	0	0
110	0	0.933	-12.70	0	0	85.68	0	0
112	0	0.923	-17.66	0	0	26.656	0	0
113	0	0.894	-13.40	0	0	35.632	0	0
114	0	0.926	-17.42	0	0	24.752	0	0
115	0	0.876	15.42	0	0	0	0	0
116	0	1.015	16.90	0	0	0	0	0
117	0	0.826	30.06	0	0	0	0	3.25
118	0	0.821	31.13	0	0	19.176	884	0
119	2	1.044	45.87	2700.9	2139	0	0	0
120	0	0.886	24.44	0	0	1056.7	292.4	0.55
121	0	0.895	17.47	0	0	727.6	74.8	0
122	0	0.890	13.83	0	0	311.58	16.048	0
123	0	0.972	8.92	0	0	106.08	1.904	0
124	2	1.023	15.45	335.87	316.21	375.9	80.648	0
125	2	1.010	6.58	0	544.87	700.13	112.47	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
126	0	0.952	14.51	0	0	78.744	6.936	0
127	0	0.950	17.49	0	0	517.89	50.32	0
128	0	0.967	25.44	0	0	0	0	0
129	0	0.970	25.97	0	0	0	0	0
130	0	0.989	38.96	0	0	0	0	0
131	0	0.961	38.63	0	0	0	0	0
132	0	0.977	35.51	0	0	0	0	0
133	0	0.976	24.61	0	0	0	0	0
134	0	0.974	21.41	0	0	0	0	0
135	0	0.959	23.46	0	0	230.11	56.576	0
136	0	1.005	36.06	0	0	75.072	24.752	0
137	0	1.029	30.96	0	0	372.1	135.73	0
138	2	1.055	24.19	-269.39	444.84	1124.3	183.87	0
139	0	0.989	28.27	0	0	809.2	113.29	0
140	0	1.011	28.18	0	0	527.27	155.99	0
141	2	1.051	32.95	393.24	188.96	197.2	78.88	0
142	0	0.955	28.00	0	0	76.84	33.32	0
143	2	1.044	36.97	974.01	459.74	121.72	48.28	0
144	0	0.986	27.42	0	0	0	0	0
145	0	0.967	31.69	0	0	32.64	19.04	0
146	2	1.053	38.42	117.55	157.61	0	0	0
147	2	1.053	44.18	303.68	-25.126	0	0	0
148	0	1.033	31.75	0	0	85.68	34	0
149	2	1.074	38.98	144.14	86.788	0	0	0
150	0	0.960	39.05	0	0	0	0	0
151	0	0.981	36.89	0	0	0	0	0
152	2	1.054	47.10	520.59	103.68	23.12	12.24	0
153	2	1.044	49.08	302.28	73.8	0	0	0
154	0	0.927	32.55	0	0	95.2	6.8	0.345
155	0	0.964	44.13	0	0	272	68	0
156	2	0.963	41.68	0	234.4	102	68	0
157	0	0.898	17.43	0	0	167.96	-33.048	0
158	0	0.932	18.02	0	0	0	0	0
159	0	0.893	21.01	0	0	44.88	22.44	0
160	0	0.968	16.45	0	0	0	0	0
161	0	1.013	47.00	0	0	47.6	20.4	0
162	0	0.881	64.38	0	0	115.6	32.64	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
163	0	0.963	37.73	0	0	0	0.544	0
164	0	0.890	48.90	0	0	0	0	-2.12
165	0	0.924	77.58	0	0	0	0	0
166	0	0.952	83.76	0	0	0	0	-1.03
167	0	0.921	21.97	0	0	407.86	130.15	0
168	0	0.967	25.41	0	0	0	0	0
169	0	0.948	22.67	0	0	0	0	0
170	2	0.929	31.37	286.89	287.37	655.25	278.8	0
171	2	0.983	18.32	0	538.43	1038.5	395.9	0
172	0	0.968	24.16	0	0	36.04	0	0
173	0	0.853	12.61	0	0	222.36	58.48	0.53
174	0	1.034	29.01	0	0	0	0	0
175	0	0.882	20.93	0	0	239.36	112.88	0
176	2	1.052	37.88	319.07	88.898	6.8	5.44	0
177	2	1.008	31.82	117.55	140	38.08	16.32	0
178	0	0.863	21.62	0	0	581.26	236.1	0
179	0	0.863	17.53	0	0	100.64	39.44	0.45
180	0	0.922	27.19	0	0	94.52	67.048	0
181	0	1.040	31.15	0	0	99.824	0	0
182	0	1.013	27.20	0	0	327.35	121.04	0
183	0	0.962	44.56	0	0	54.4	5.44	0
184	0	1.016	23.20	0	0	186.05	22.576	0
185	2	1.052	26.70	279.89	132.26	0	0	0
186	2	1.065	36.09	1679.3	506.34	81.328	33.048	0
187	2	1.065	34.99	1679.3	571.37	81.328	33.048	0
188	0	1.043	32.01	0	0	248.34	59.296	0
189	0	0.968	-10.90	0	0	9.52	2.72	0
190	2	1.055	-1.38	664.73	1103.5	0	0	-1.5
191	2	1.044	65.51	2761.1	2078.8	665.04	72.08	0
192	0	0.715	19.95	0	0	1088	97.92	0
193	0	0.951	-12.06	0	0	0	0	0
194	0	0.989	-0.17	0	0	0	0	0
195	0	0.990	-2.64	0	0	0	0	0
196	0	0.937	-9.29	0	0	13.6	4.08	0
197	0	0.967	-7.17	0	0	58.48	19.04	0
198	2	1.015	-2.89	593.36	240.47	87.04	28.56	0
199	0	0.914	-10.31	0	0	47.6	16.32	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
200	0	0.916	-9.89	0	0	36.72	16.32	0
201	0	0.914	-14.58	0	0	55.76	19.04	0
202	0	0.957	-9.45	0	0	51.68	17.68	0
203	0	0.988	-5.28	0	0	57.12	19.04	0
204	0	0.913	-12.67	0	0	97.92	32.64	0
205	0	0.936	-12.61	0	0	0	-6.8	0
206	0	0.952	-14.85	0	0	16.32	2.72	0
207	0	0.967	-15.18	0	0	-28.56	-19.312	0
208	0	0.957	-12.02	0	0	9.52	2.72	0
209	0	0.974	-10.49	0	0	51.68	17.68	0
210	0	0.953	-7.82	0	0	0	0	0
211	0	0.973	-6.60	0	0	130.56	9.52	0
212	0	0.981	-5.18	0	0	0	0	0
213	2	1.010	10.97	380.65	72.847	0	0	0
214	0	0.983	2.70	0	0	29.92	21.76	0
215	0	0.964	-1.16	0	0	63.92	35.36	0
216	0	0.941	-4.26	0	0	239.36	142.8	0
217	0	0.993	-3.44	0	0	136	102	0
218	0	0.980	-3.98	0	0	178.16	130.56	0
219	0	1.026	-2.02	0	0	0	0	0
220	2	1.008	-2.51	139.94	299.85	387.6	136	0
221	2	1.000	-3.56	629.75	600.73	232.56	95.2	0
222	2	1.050	-4.52	349.86	286.66	446.08	255.68	0
223	0	0.991	-3.81	0	0	582.08	315.52	0
224	0	0.942	-2.15	0	0	235.28	134.64	0
225	0	0.733	19.45	0	0	557.6	54.4	0
226	0	0.969	-2.36	0	0	0	0	0
227	2	1.000	-10.12	424.03	455.33	731.68	501.84	0
228	0	1.007	-1.41	0	0	303.28	201.28	0
229	0	1.020	-0.01	0	0	130.56	62.56	0
230	2	1.040	8.77	482.81	146.23	0	0	0
231	0	1.033	-2.05	0	0	216.24	145.52	-3
232	0	1.017	-4.82	0	0	609.28	194.48	0
233	2	1.000	-8.33	419.83	261.94	549.44	288.32	0
234	0	1.017	-1.29	0	0	777.92	331.84	0
235	0	1.008	-1.45	0	0	365.84	213.52	0
236	2	1.017	6.57	839.66	452.69	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
237	0	1.033	-1.87	0	0	0	0	0
238	2	1.010	-1.35	349.86	398.87	346.8	202.64	-1.5
239	2	1.000	5.77	769.69	84.939	0	0	0
240	0	1.026	-0.73	0	0	0	0	-1.4
241	2	1.050	4.66	805.28	137.05	0	0	0
242	2	0.993	2.66	237.91	170.96	0	0	0
243	2	1.010	0.36	117.55	73.557	10.88	4.08	0
244	0	0.985	-0.95	0	0	0	0	0
245	0	0.957	-1.97	0	0	82.96	40.8	0
246	0	0.947	-3.14	0	0	104.72	44.88	0
247	0	0.948	-3.13	0	0	82.96	40.8	0
248	0	0.935	-8.22	0	0	39.44	19.04	0.456
249	0	0.933	-8.85	0	0	39.44	19.04	0
250	0	0.994	-6.15	0	0	-31.28	-23.12	0
281	0	1.028	-0.63	0	0	-45.016	-39.984	0
319	0	1.001	31.73	0	0	157.49	-32.64	0
320	0	0.988	26.67	0	0	3.264	-17.136	0
322	0	0.985	-2.18	0	0	3.264	-5.304	0
323	0	0.938	4.06	0	0	-20.264	36.04	0
324	0	0.966	-10.92	0	0	33.592	-1.632	0
526	0	0.910	-22.55	0	0	197.61	-47.464	0
528	0	0.917	-29.95	0	0	38.216	-27.88	0
531	0	0.931	-17.07	0	0	19.04	3.4	0
552	0	0.987	-8.67	0	0	-15.096	-1.904	0
562	0	0.847	-16.74	0	0	68.68	23.664	0
609	0	0.928	-16.41	0	0	40.256	0.816	0
664	0	0.955	3.30	0	0	-154.63	104.31	0
1190	0	1.010	44.15	0	0	136.42	39.671	0
1200	0	0.943	26.43	0	0	-136	46.471	0
1201	0	1.003	16.22	0	0	0	0	0
2040	0	0.930	0.85	0	0	0	0	0
7001	2	1.051	45.08	653.54	262.99	0	0	0
7002	2	1.051	46.70	871.85	175.81	0	0	0
7003	2	1.032	49.28	1693.3	765.45	0	0	0
7011	2	1.015	36.11	327.47	88.677	0	0	0
7012	2	1.051	45.99	520.59	283.69	0	0	0
7017	2	1.051	9.05	461.82	604.23	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7023	2	1.051	38.38	258.9	35.812	0	0	0
7024	2	1.029	47.39	573.77	172.59	0	0	0
7039	2	1.050	27.40	699.72	426.06	0	0	0
7044	2	1.015	3.60	51.779	89.181	0	0	0
1	0	1.009	38.16	0	0	122.4	66.64	0
7055	2	0.997	10.14	62.975	57.504	0	0	0
7057	2	1.021	20.09	230.91	147.27	0	0	0
7061	2	1.015	30.36	559.78	254.34	0	0	0
7062	2	1.002	36.60	559.78	282.86	0	0	0
7071	2	0.989	-11.73	162.34	151.11	0	0	0
7130	2	1.051	58.59	1808.1	650.66	0	0	0
7139	2	1.051	37.33	979.61	467.95	0	0	0
7166	2	1.015	90.85	773.89	460.95	0	0	0
9001	0	0.955	1.16	0	0	0	0	0
9002	2	0.995	-12.80	-5.8777	11.739	0	0	0
9003	0	0.806	-15.01	0	0	3.6856	1.2784	0.024
9004	0	0.795	-15.26	0	0	1.1696	0.3808	0
9005	0	0.956	1.03	0	0	0	0	0
9006	0	0.872	-8.92	0	0	0	0	0
9007	0	0.835	-12.10	0	0	0	0	0
9012	0	0.979	-7.97	0	0	0	0	0
9021	0	0.987	-13.09	0	0	6.46	2.1216	0
9022	0	0.954	-16.46	0	0	2.0808	0.7208	0
9023	0	0.968	-13.48	0	0	0	0	0
9024	0	0.962	-16.15	0	0	1.836	0.6392	0
9025	0	0.954	-14.89	0	0	0.612	0.2176	0
9026	0	0.956	-14.77	0	0	0.612	0.2176	0
9031	0	0.707	-26.19	0	0	2.5024	0.8704	0
9032	0	0.734	-23.50	0	0	1.8904	0.6528	0
9033	0	0.700	-26.96	0	0	2.5704	0.884	0
9034	0	0.808	-17.63	0	0	2.108	0.7344	0.0172
9035	0	0.747	-22.05	0	0	2.2576	0.7888	0
9036	0	0.763	-21.25	0	0	4.1208	1.36	0
9037	0	0.759	-20.79	0	0	2.5296	0.8704	0
9038	0	0.723	-24.76	0	0	3.5088	1.2104	0
9041	0	0.772	-18.25	0	0	1.3736	0.476	0
9042	0	0.748	-20.67	0	0	1.1016	0.3808	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
9043	0	0.774	-18.60	0	0	2.176	0.7072	0
9044	0	0.799	-15.19	0	0	0	0	0
9051	2	1.000	-11.10	-50.114	29.832	0	0	0
9052	0	0.860	-8.70	0	0	40.8	31.28	0
9053	2	1.000	-8.48	-37.057	27.455	0	0	0
9054	2	1.000	7.69	69.972	58.983	0	0	0
9055	2	1.000	6.63	11.196	10.981	0	0	0
9071	0	0.809	-15.42	0	0	1.3872	0.476	0
9072	0	0.817	-14.37	0	0	1.3872	0.476	0
9121	0	0.947	-10.89	0	0	5.168	1.7	0
9533	0	1.039	-9.13	0	0	1.6184	0.5576	0
$K_G = 0.0394$								
Perdas de potência ativa na transmissão (MW) = 916.8919								

#### 4.8.2 Sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa nas barras de geração

Considere o caso em que haja os respectivos limites de geração de potência reativa para as barras de geração (Tabela 4.28), fornecidos pelo banco de dados do sistema.

Tabela 4.28: Limites de geração de potência reativa para o sistema de 300 barras

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}$ (Mvar)	$Q_{Gmax}$ (Mvar)
8	-10	10
10	-20	20
20	-20	20
63	-25	25
76	12	35
84	-240	240
91	-11	96
92	-153	153
98	-30	56
108	-24	77
119	-500	1500
124	-60	120
125	-25	200
138	-125	350

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}(Mvar)$	$Q_{Gmax}(Mvar)$
141	-50	75
143	-100	300
146	-15	35
147	-50	100
149	-25	50
152	-50	175
153	-50	90
156	-10	15
170	-40	90
171	-50	150
176	-45	90
177	-15	35
185	-50	80
186	-100	400
187	-100	400
190	-300	300
191	-1000	1000
198	-260	260
213	-150	150
220	-60	60
221	-320	320
222	-300	300
227	-300	300
230	-250	250
233	-500	500
236	-300	300
238	-200	200
239	-400	400
241	-600	600
242	40	100
243	40	80
7001	-210	210
7002	-280	280
7003	-420	420
7011	-100	100
7012	-224	224
7017	0	350

Barra ( $k$ )	$Q_{Gmin}(Mvar)$	$Q_{Gmax}(Mvar)$
7023	0	120
7024	-224	224
7039	-200	200
7044	0	42
7055	0	25
7057	-90	90
7061	-150	150
7062	0	150
7071	0	87
7130	-100	600
7139	-125	325
7166	-200	300
9002	-2	2
9051	-17.35	17.35
9053	-12.8	12.83
9054	-38	38
9055	-6	6

Similar ao que ocorre no sistema de 41 barras (CIGRE-32), o sistema de 300 barras com os limites de geração de potência reativa nas barras de geração não suporta o caso base ( $\sigma = 1$ ). Dessa forma, realizou-se o FCC com  $\sigma \in (0, 1)$ . As curvas PV para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema podem ser observadas nas figuras 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57, 4.58, 4.59 e 4.60. Já as figuras 4.61 e 4.62 ilustram apenas as barras de geração (*slack + PV*).

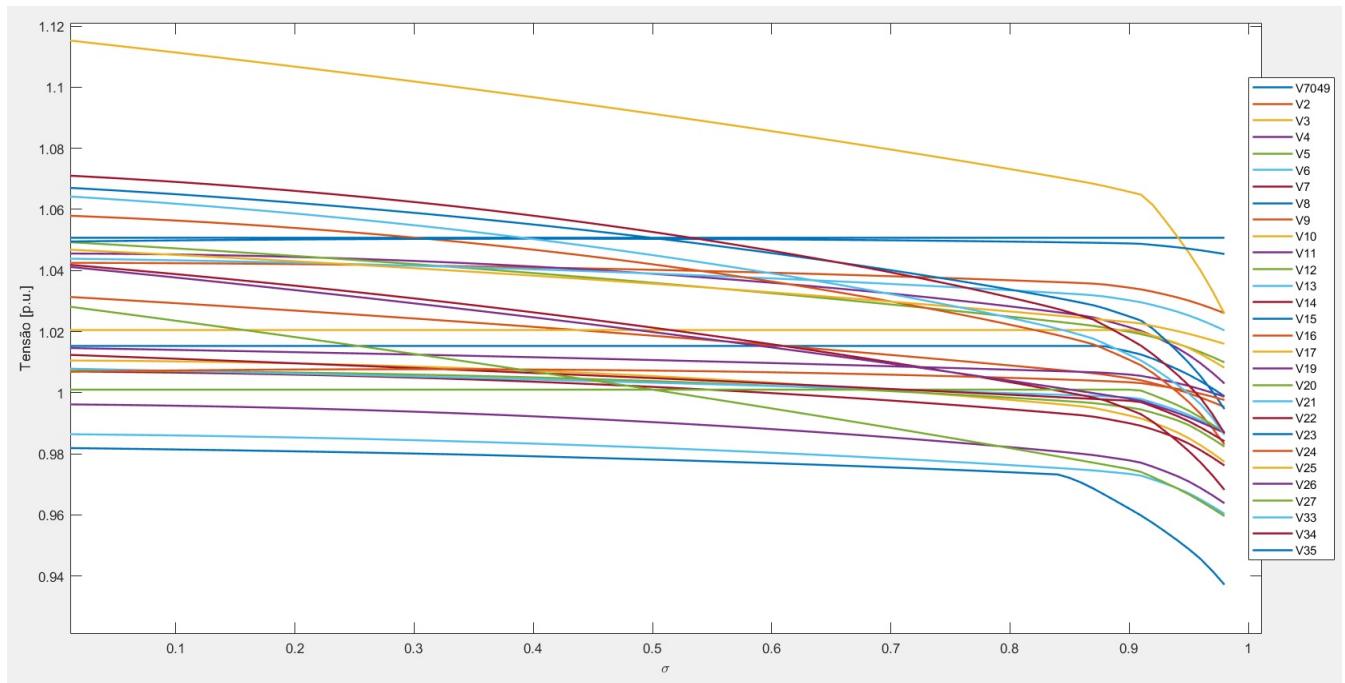


Figura 4.51: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (1)

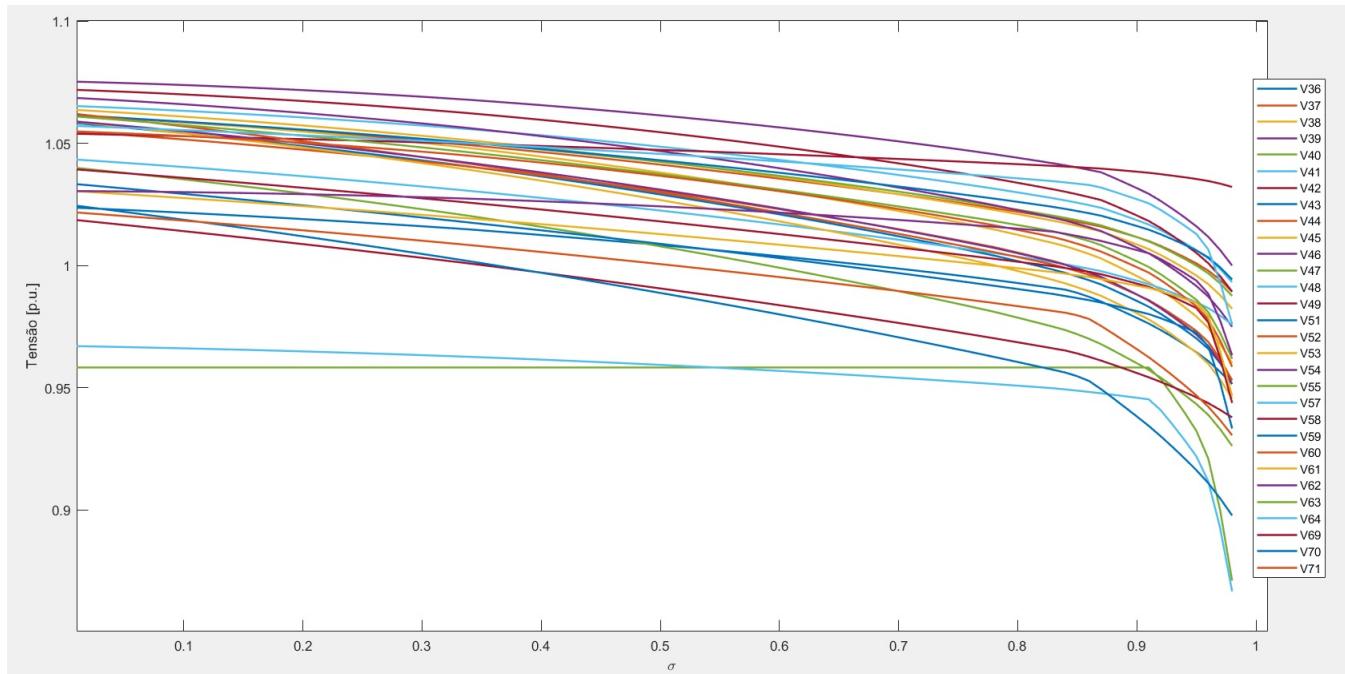


Figura 4.52: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (2)

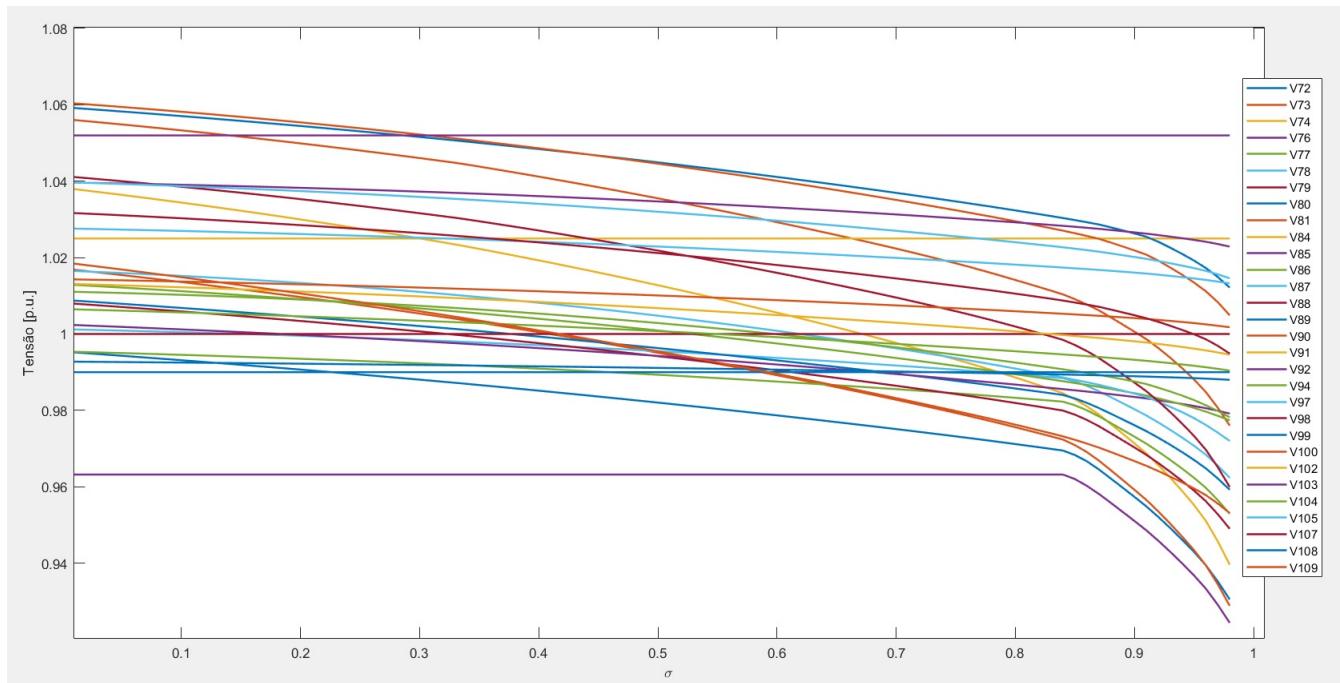


Figura 4.53: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (3)

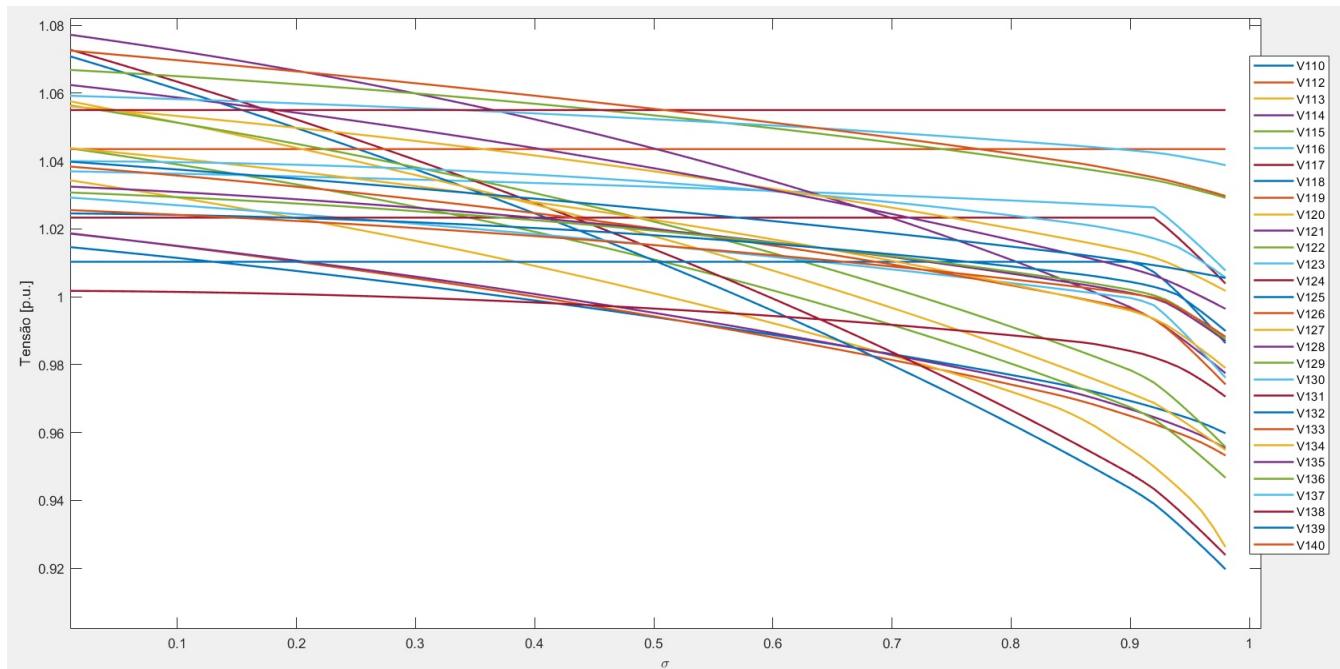


Figura 4.54: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (4)

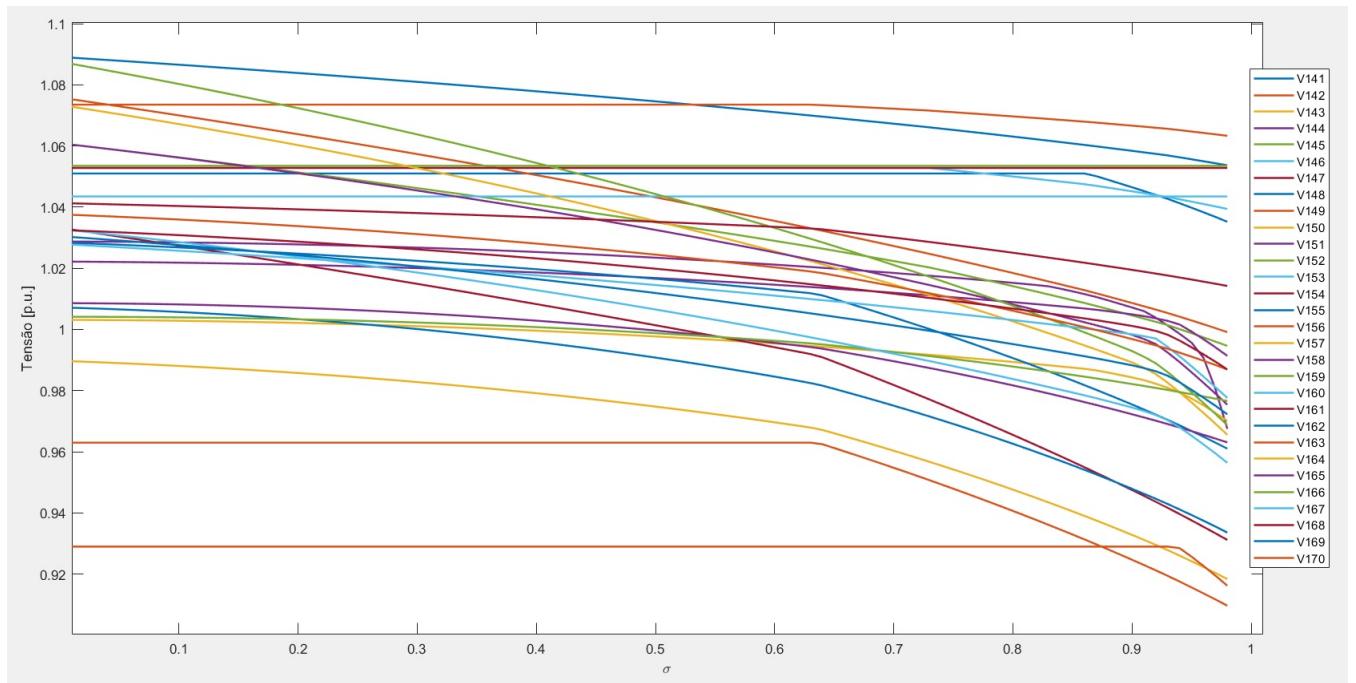


Figura 4.55: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (5)

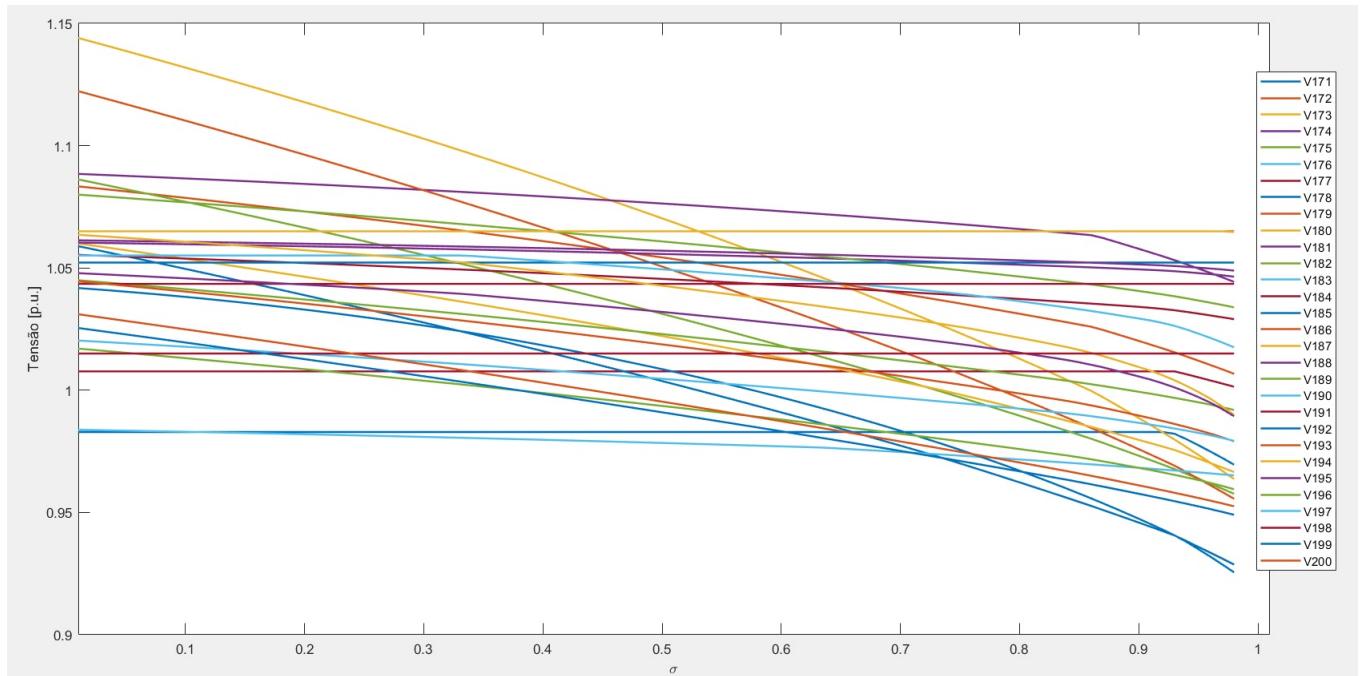


Figura 4.56: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (6)

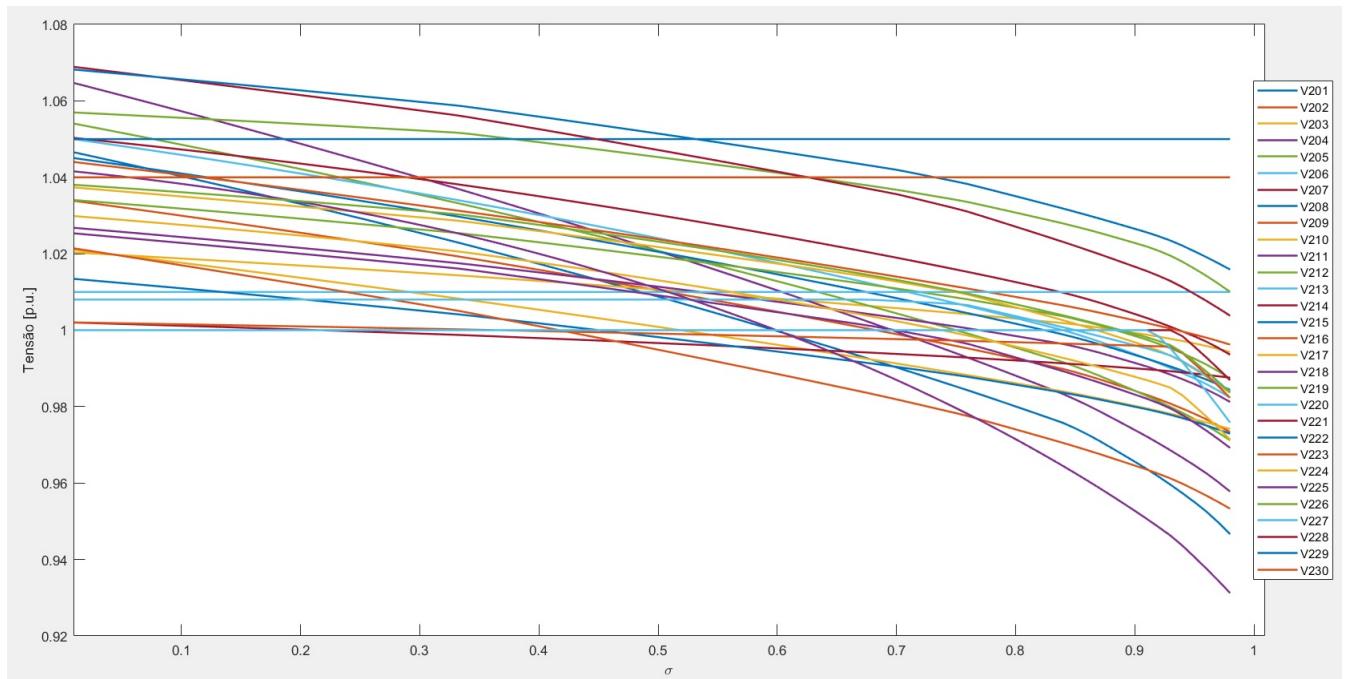


Figura 4.57: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (7)

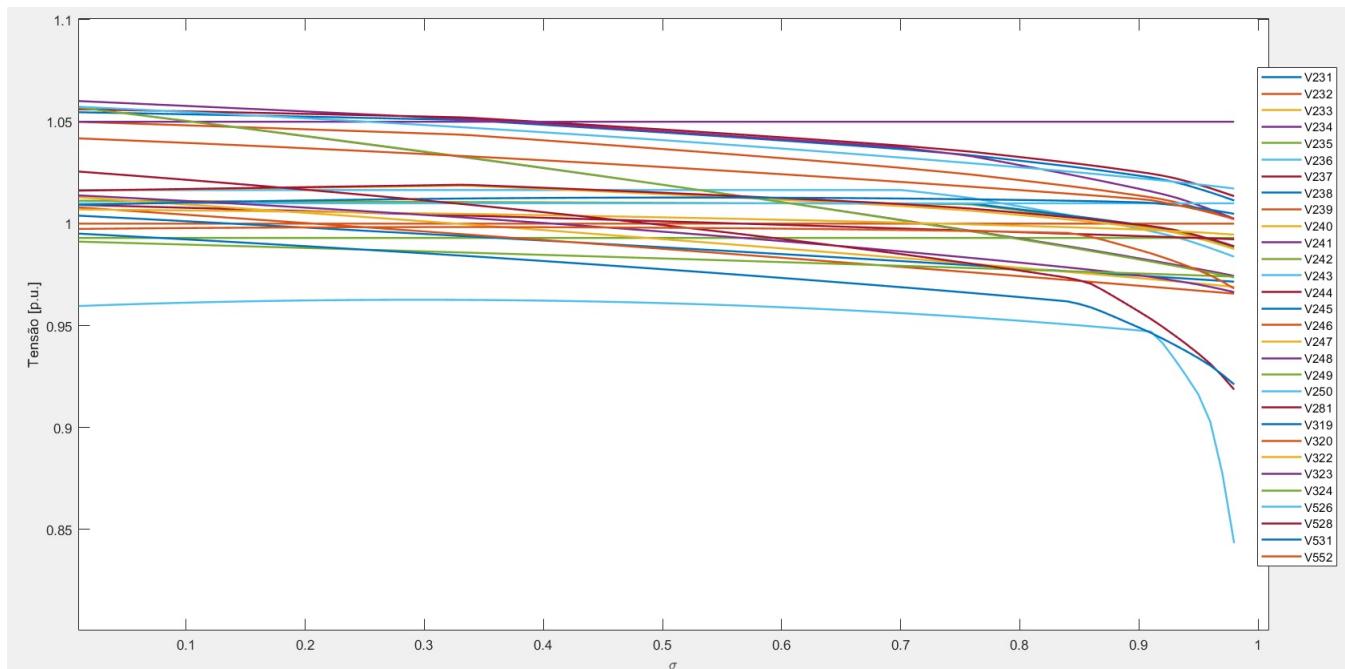


Figura 4.58: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (8)

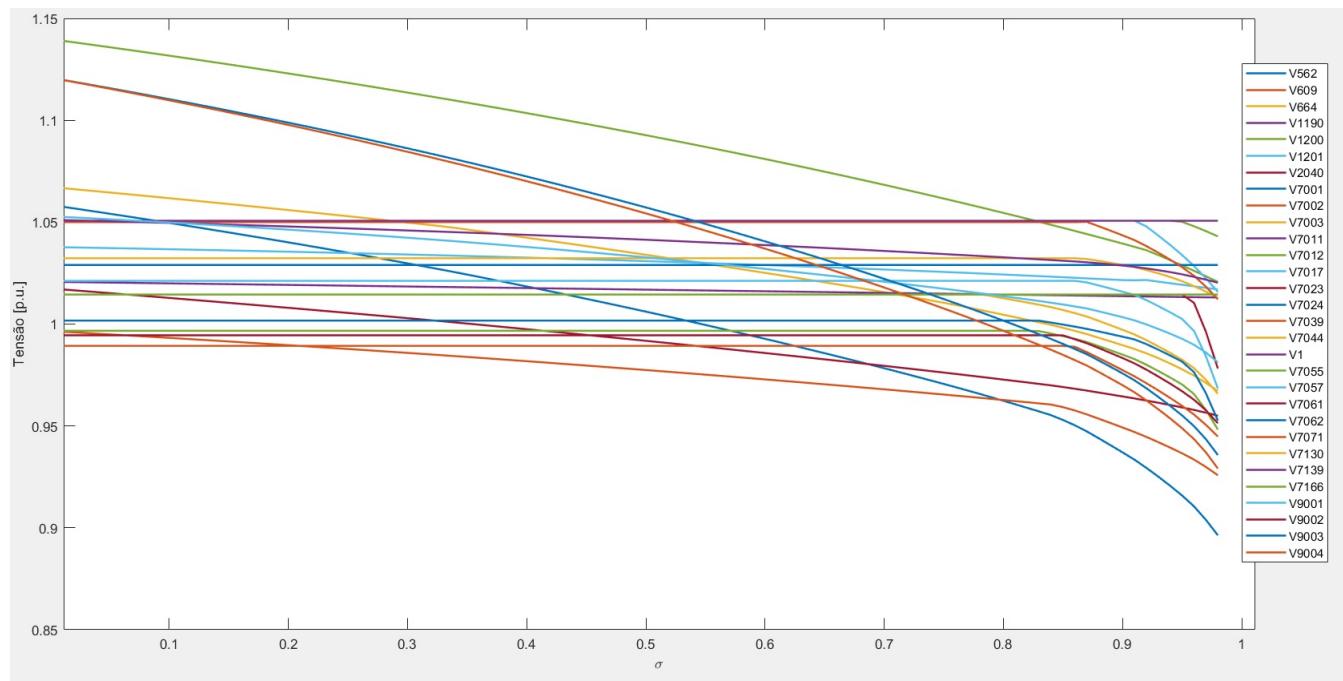


Figura 4.59: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (9)

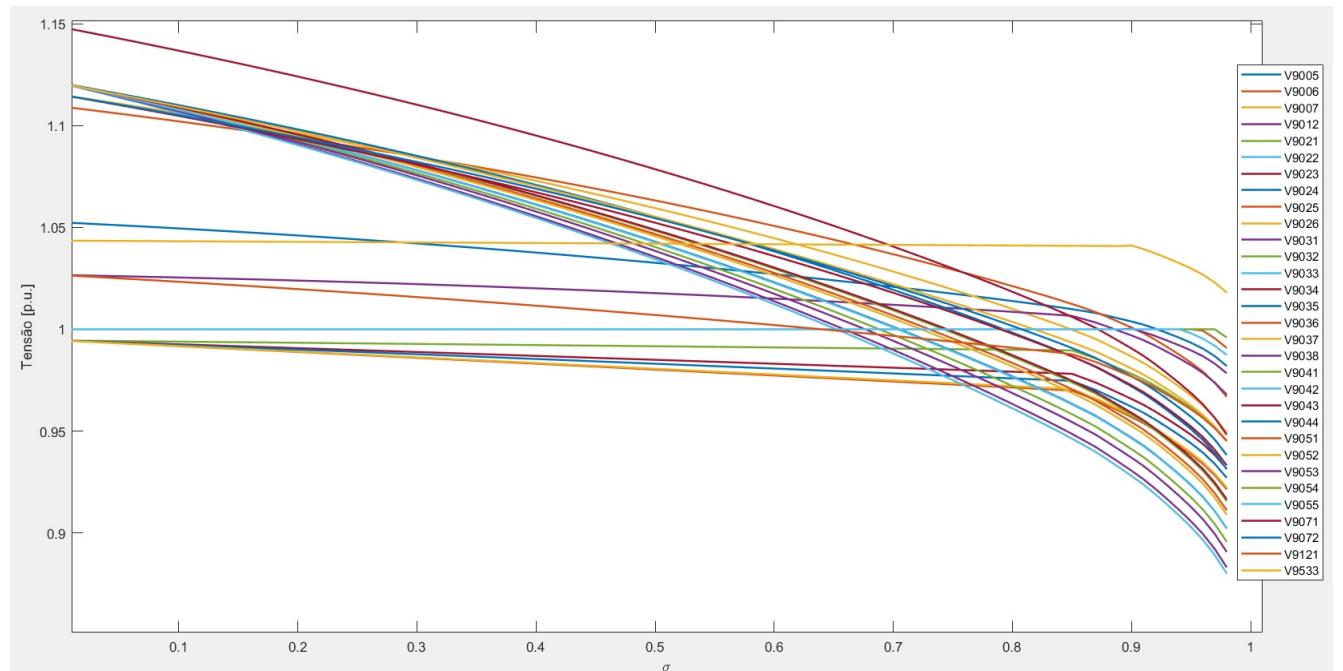


Figura 4.60: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (10)

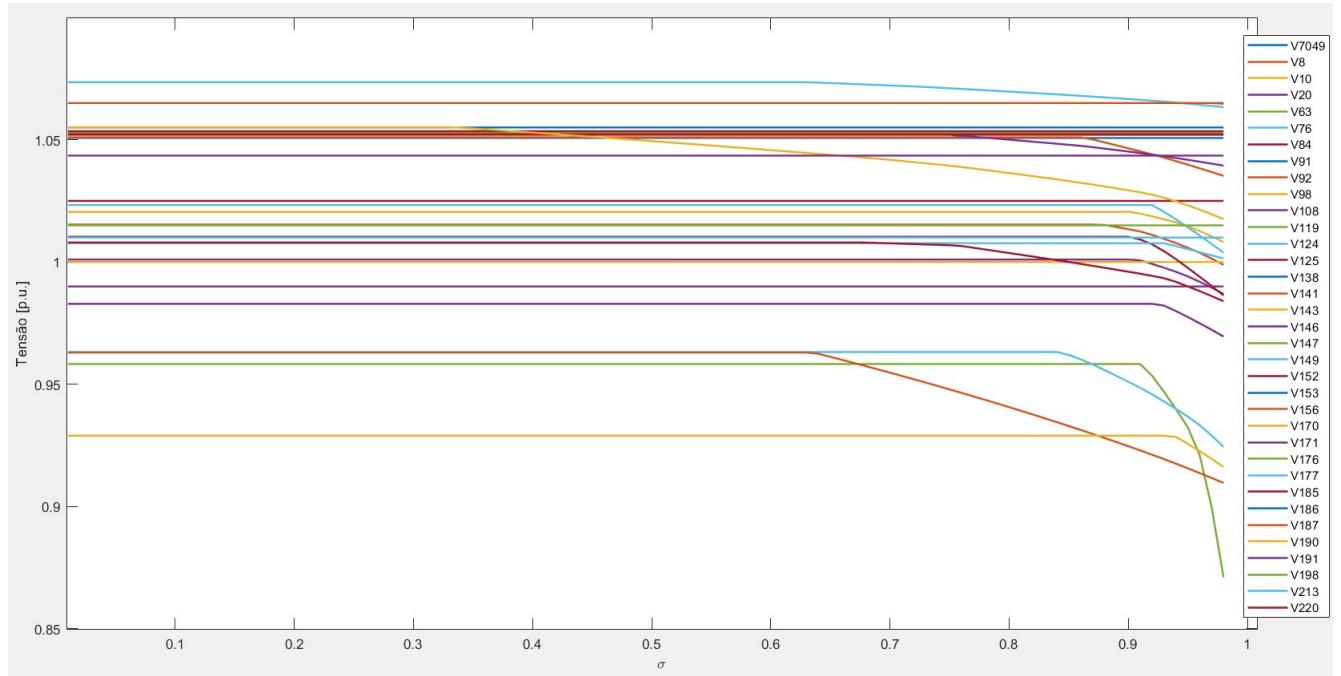


Figura 4.61: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis das barras de geração do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (1)

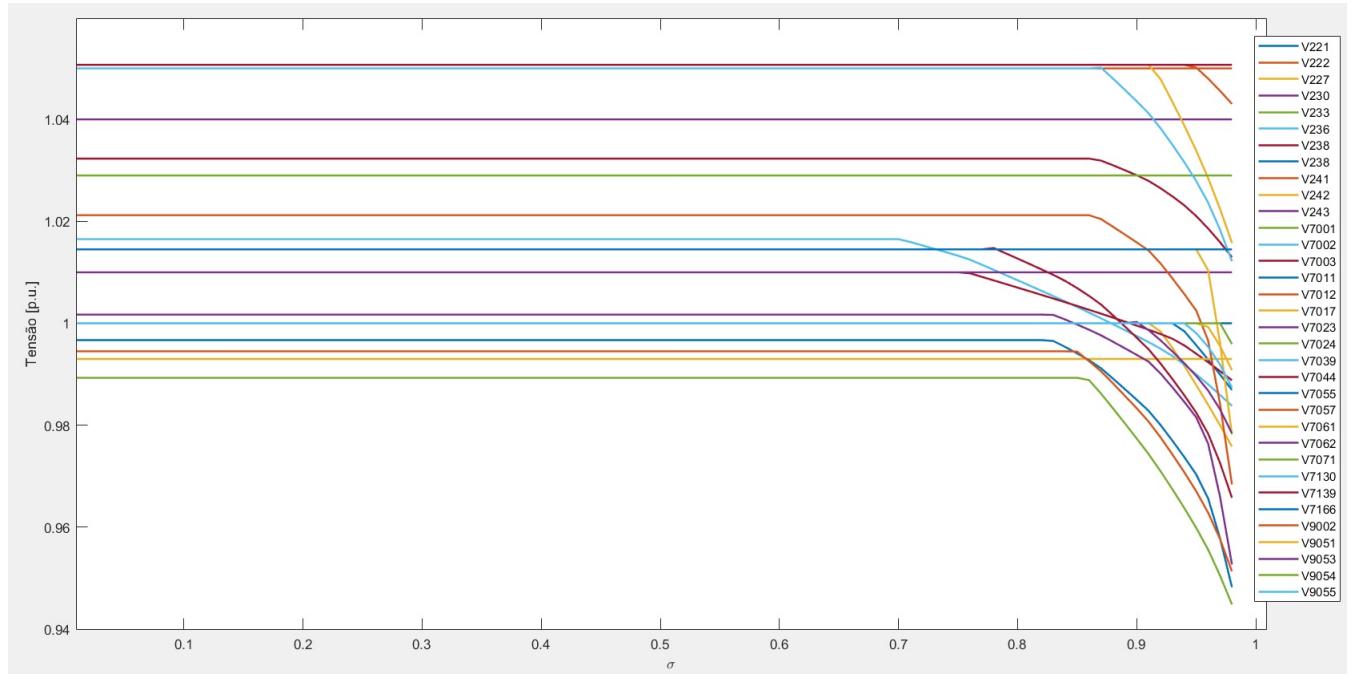


Figura 4.62: Curvas  $PV$  para os pontos de equilíbrio estáveis das barras de geração do sistema de 300 barras com limites de geração de potência reativa (2)

Em  $\sigma = 0,98$  o sistema atinge o ponto de máximo carregamento, caracterizando uma  $BSN$ . A partir desse ponto, o sistema não apresenta mais solução para  $\sigma > 0,98$ . Por fim, o estado do sistema no ponto de máximo carregamento pode ser observado na

Tabela 4.29.

Tabela 4.29: Estado do sistema no ponto de máximo carregamento ( $\sigma = 0,98$ ) com limites de geração de potência reativa - Sistema de 300 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7049	3	1.0507	0	46.3413	157.2419	0	0	0
2	0	1.026	27.6679	0	0	54.88	14.7	0
3	0	0.97738	26.7933	0	0	19.6	0	0
4	0	1.003	24.4608	0	0	0	0	0
5	0	1.0099	24.8686	0	0	345.94	127.4	0
6	0	1.0204	26.9819	0	0	117.6	40.18	0
7	0	0.97616	26.4032	0	0	0	0	0
8	0	0.99883	21.9256	-4.9915	10	56.84	13.72	0
9	0	0.99531	22.8983	0	0	94.08	42.14	0
10	0	1.0082	21.3789	-4.9915	20	145.04	32.34	0
11	0	0.99868	22.3701	0	0	81.34	20.58	0
12	0	0.98233	25.3483	0	0	0	0	0
13	0	0.9871	19.3989	0	0	56.84	9.8	0
14	0	0.9682	13.6525	0	0	156.8	58.8	0
15	0	0.99464	8.8006	0	0	124.166	22.54	0
16	0	0.98306	15.4473	0	0	0	0	0
17	0	1.0259	4.0587	0	0	549.78	215.6	0
19	0	0.96382	20.7808	0	0	0	0	0
20	0	0.98696	17.5046	-9.983	20	583.1	117.6	0
21	0	0.96036	21.585	0	0	75.46	0.98	0
22	0	0.98408	18.0209	0	0	79.38	22.54	0
23	0	1.0454	23.9538	0	0	20.58	6.86	0
24	0	0.99762	26.0704	0	0	0	0	0
25	0	1.016	21.5245	0	0	44.1	11.76	0
26	0	0.98683	18.426	0	0	27.44	8.82	0
27	0	0.9596	15.227	0	0	67.62	12.74	0
33	0	0.98625	1.5842	0	0	53.9	5.88	0
34	0	0.98671	8.0851	0	0	0	0	0
35	0	0.93716	-8.1582	0	0	0	0	0
36	0	0.95151	-4.8605	0	0	0	0	0
37	0	0.98925	0.8612	0	0	83.3	31.36	0
38	0	0.98231	0.81221	0	0	151.9	17.64	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
39	0	1	10.7068	0	0	0	0	0
40	0	0.98757	0.52906	0	0	45.08	-20.58	0
41	0	0.99321	2.7703	0	0	84.28	0	0
42	0	0.98937	8.9006	0	0	0	0	0
43	0	0.95299	-1.8125	0	0	38.22	8.82	0
44	0	0.95301	-1.1165	0	0	191.1	28.42	0
45	0	0.96008	2.2596	0	0	0	0	0
46	0	0.97495	5.1731	0	0	0	0	0
47	0	0.92622	-6.6576	0	0	56.84	11.564	0
48	0	0.97583	-1.4133	0	0	40.18	18.62	0
49	0	1.0322	-0.30359	0	0	90.16	25.48	0
51	0	0.99427	1.0724	0	0	-4.9	4.9	0
52	0	0.9531	0.30634	0	0	59.78	27.44	0
53	0	0.94568	-2.5887	0	0	67.62	2.94	0
54	0	0.95158	-0.92655	0	0	9.8	0.98	0
55	0	0.9619	2.2811	0	0	21.56	9.8	0
57	0	0.97597	9.6788	0	0	96.04	19.6	0
58	0	0.94381	12.744	0	0	13.72	0.98	0
59	0	0.93337	13.8084	0	0	213.64	103.88	0
60	0	0.95857	8.6835	0	0	0	0	0
61	0	0.94666	15.9212	0	0	222.46	107.8	0
62	0	0.96329	18.9286	0	0	0	0	0
63	0	0.87112	-0.1641	0	25	68.6	29.4	0
64	0	0.86675	5.4202	0	0	0	0	0
69	0	0.9379	-7.5888	0	0	0	0	0
70	0	0.89779	-18.3062	0	0	54.88	19.6	0
71	0	0.93059	-12.5999	0	0	113.68	37.24	0
72	0	0.9305	-10.0276	0	0	55.86	18.62	0
73	0	0.92884	-8.4057	0	0	219.52	69.58	0
74	0	0.93959	-4.5447	0	0	0	0	0
76	0	0.92437	-9.0656	0	35	203.84	104.86	0
77	0	0.95292	-7.3644	0	0	72.52	27.44	0
78	0	0.96232	-6.454	0	0	0	0	0
79	0	0.94899	-7.3754	0	0	47.04	13.72	0
80	0	0.95921	-6.9633	0	0	27.44	6.86	0
81	0	0.97602	-0.5653	0	0	0	0	0
84	2	1.025	0.63423	374.3641	212.1414	36.26	12.74	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
85	0	0.97917	-1.3695	0	0	0	0	0
86	0	0.97738	2.5324	0	0	0	0	0
87	0	0.972	10.1737	0	0	0	0	0
88	0	0.95994	-3.0601	0	0	0	0	0
89	0	1.0121	4.249	0	0	43.316	0	0
90	0	1.0049	2.7829	0	0	64.68	0	0
91	2	1.052	6.5104	154.7372	76.0398	17.052	0	0
92	2	1.052	8.8183	289.5083	58.2749	15.484	0	0
94	0	0.97819	8.1694	0	0	59.094	0	0
97	0	1.0133	2.9354	0	0	39.102	0	0
98	2	1	1.7136	67.8847	0.96346	65.366	0	0
99	0	0.988	-4.1971	0	0	81.83	0	0
100	0	1.0018	1.8878	0	0	0	0	0
102	0	0.9946	1.2306	0	0	76.244	0	0
103	0	1.0229	3.4195	0	0	31.36	0	0
104	0	0.99042	-0.97306	0	0	8.428	0	0
105	0	1.0146	2.404	0	0	48.608	0	0
107	0	0.99487	-0.86275	0	0	4.508	0	0
108	2	0.99	-4.2151	116.8016	59.6826	109.858	0	0
109	0	0.95311	-9.7407	0	0	30.086	0	0
110	0	0.95976	-8.5139	0	0	61.74	0	0
112	0	0.95324	-11.8445	0	0	19.208	0	0
113	0	0.92625	-9.0254	0	0	25.676	0	0
114	0	0.95531	-11.6754	0	0	17.836	0	0
115	0	0.94667	9.7192	0	0	0	0	0
116	0	1.0077	10.6974	0	0	0	0	0
117	0	0.92389	18.7545	0	0	0	0	3.25
118	0	0.91973	19.373	0	0	13.818	637	0
119	2	1.0435	28.8484	1926.7274	1118.423	0	0	0
120	0	0.95484	14.9898	0	0	761.46	210.7	0.55
121	0	0.97746	10.8571	0	0	524.3	53.9	0
122	0	0.95573	8.8087	0	0	224.518	11.564	0
123	0	0.97614	5.4196	0	0	76.44	1.372	0
124	0	1.0039	9.8618	239.593	120	270.872	58.114	0
125	0	0.98633	4.1069	0	200	504.504	81.046	0
126	0	0.97415	9.7341	0	0	56.742	4.998	0
127	0	0.97899	11.8688	0	0	373.184	36.26	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
128	0	0.98693	17.3748	0	0	0	0	0
129	0	0.98752	17.7509	0	0	0	0	0
130	0	1.0056	26.6774	0	0	0	0	0
131	0	0.97057	26.5137	0	0	0	0	0
132	0	0.98991	24.2969	0	0	0	0	0
133	0	0.98823	16.8455	0	0	0	0	0
134	0	1.0017	14.5439	0	0	0	0	0
135	0	0.99642	15.9538	0	0	165.816	40.768	0
136	0	1.0292	24.5387	0	0	54.096	17.836	0
137	0	1.0388	21.204	0	0	268.128	97.804	0
138	2	1.055	16.3608	-192.1736	275.4482	810.166	132.496	0
139	0	1.0055	19.295	0	0	583.1	81.634	0
140	0	1.0297	19.3091	0	0	379.946	112.406	0
141	0	1.0352	22.9882	280.5235	75	142.1	56.84	0
142	0	0.99912	19.6447	0	0	55.37	24.01	0
143	2	1.0435	26.0506	694.8198	285.2731	87.71	34.79	0
144	0	0.96751	19.4806	0	0	0	0	0
145	0	0.99463	22.3051	0	0	23.52	13.72	0
146	0	1.0394	27.0427	83.8576	35	0	0	0
147	2	1.0528	31.0381	216.632	-1.338	0	0	0
148	0	1.0537	22.393	0	0	61.74	24.5	0
149	0	1.0633	27.4996	102.8253	50	0	0	0
150	0	0.97008	26.7955	0	0	0	0	0
151	0	0.99137	25.2787	0	0	0	0	0
152	2	1.0535	32.2785	371.3692	29.9377	16.66	8.82	0
153	2	1.0435	33.6292	215.6337	74.0627	0	0	0
154	0	0.93118	21.1734	0	0	68.6	4.9	0.345
155	0	0.96103	30.4994	0	0	196	49	0
156	0	0.90968	28.7635	0	15	73.5	49	0
157	0	0.96558	11.2056	0	0	121.03	-23.814	0
158	0	0.97541	11.6924	0	0	0	0	0
159	0	0.96873	13.4086	0	0	32.34	16.17	0
160	0	0.97761	10.6786	0	0	0	0	0
161	0	1.0142	32.2657	0	0	34.3	14.7	0
162	0	0.93358	43.8064	0	0	83.3	23.52	0
163	0	0.98691	25.9889	0	0	0	0.392	0
164	0	0.91838	33.7715	0	0	0	0	-2.12

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
165	0	0.96307	52.3136	0	0	0	0	0
166	0	0.97661	56.4393	0	0	0	0	-1.03
167	0	0.95639	15.0507	0	0	293.902	93.786	0
168	0	0.98694	17.3539	0	0	0	0	0
169	0	0.97225	15.4934	0	0	0	0	0
170	0	0.91621	21.3097	204.6524	90	472.164	200.9	0
171	0	0.96953	12.3373	0	150	748.328	285.278	0
172	0	1.0067	16.6844	0	0	25.97	0	0
173	0	0.96368	9.9327	0	0	160.23	42.14	0.53
174	0	1.0443	20.2181	0	0	0	0	0
175	0	0.95763	15.2335	0	0	172.48	81.34	0
176	2	1.0522	27.119	227.6134	60.284	4.9	3.92	0
177	0	1.0014	23.1499	83.8576	35	27.44	11.76	0
178	0	0.9287	15.8853	0	0	418.852	170.128	0
179	0	0.95559	13.0628	0	0	72.52	28.42	0.45
180	0	0.96653	19.3655	0	0	68.11	48.314	0
181	0	1.0464	21.3272	0	0	71.932	0	0
182	0	1.0339	18.5915	0	0	235.886	87.22	0
183	0	0.96516	30.2705	0	0	39.2	3.92	0
184	0	1.029	15.7638	0	0	134.064	16.268	0
185	2	1.0522	18.243	199.6609	78.688	0	0	0
186	2	1.065	24.8255	1197.9652	356.4562	58.604	23.814	0
187	0	1.0647	24.0465	1197.9652	400	58.604	23.814	0
188	0	1.0489	21.9341	0	0	178.948	42.728	0
189	0	0.99193	-7.5273	0	0	6.86	1.96	0
190	0	1.0175	-0.6567	474.1946	300	0	0	-1.5
191	2	1.0435	34.6645	1969.6545	747.1866	479.22	51.94	0
192	0	0.92551	10.8576	0	0	784	70.56	0
193	0	0.97911	-7.9029	0	0	0	0	0
194	0	0.98986	0.082301	0	0	0	0	0
195	0	0.98935	-1.7316	0	0	0	0	0
196	0	0.95949	-6.8491	0	0	9.8	2.94	0
197	0	0.97929	-5.2079	0	0	42.14	13.72	0
198	2	1.015	-2.1426	423.281	170.7767	62.72	20.58	0
199	0	0.94905	-7.4116	0	0	34.3	11.76	0
200	0	0.95255	-7.1993	0	0	26.46	11.76	0
201	0	0.94665	-9.3383	0	0	40.18	13.72	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
202	0	0.97333	-6.6568	0	0	37.24	12.74	0
203	0	0.99428	-3.7865	0	0	41.16	13.72	0
204	0	0.95777	-7.5206	0	0	70.56	23.52	0
205	0	0.97119	-7.9238	0	0	0	-4.9	0
206	0	0.98236	-9.8419	0	0	11.76	1.96	0
207	0	0.99358	-10.1191	0	0	-20.58	-13.916	0
208	0	0.98436	-8.0954	0	0	6.86	1.96	0
209	0	0.99623	-7.3165	0	0	37.24	12.74	0
210	0	0.97415	-5.6923	0	0	0	0	0
211	0	0.98122	-4.6446	0	0	94.08	6.86	0
212	0	0.98734	-3.6216	0	0	0	0	0
213	2	1.01	7.7533	271.5388	55.463	0	0	0
214	0	0.98757	1.8955	0	0	21.56	15.68	0
215	0	0.97291	-0.8137	0	0	46.06	25.48	0
216	0	0.9533	-2.9468	0	0	172.48	102.9	0
217	0	0.98359	-2.3081	0	0	98	73.5	0
218	0	0.9692	-2.7052	0	0	128.38	94.08	0
219	0	1.01	-1.2656	0	0	0	0	0
220	0	0.98397	-1.5567	99.8304	60	279.3	98	0
221	0	0.98692	-2.193	449.237	320	167.58	68.6	0
222	2	1.05	-3.1998	249.5761	253.0431	321.44	184.24	0
223	0	0.98231	-2.3881	0	0	419.44	227.36	0
224	0	0.97142	-1.147	0	0	169.54	97.02	0
225	0	0.93123	10.6005	0	0	401.8	39.2	0
226	0	0.98376	-1.2912	0	0	0	0	0
227	0	0.97582	-7.4051	302.4862	300	527.24	361.62	0
228	0	1.0038	-0.81082	0	0	218.54	145.04	0
229	0	1.0159	0.18765	0	0	94.08	45.08	0
230	2	1.04	6.4444	344.415	146.2105	0	0	0
231	0	1.0114	-1.2645	0	0	155.82	104.86	-3
232	0	1.0021	-3.3419	0	0	439.04	140.14	0
233	2	1	-6.0181	299.4913	209.0347	395.92	207.76	0
234	0	1.0025	-0.75071	0	0	560.56	239.12	0
235	0	0.98784	-0.85526	0	0	263.62	153.86	0
236	0	0.98379	5.124	598.9826	300	0	0	0
237	0	1.0135	-1.1518	0	0	0	0	0
238	0	0.98881	-0.7739	249.5761	200	249.9	146.02	-1.5

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
239	2	1	4.3666	549.0674	198.3061	0	0	0
240	0	0.98759	-0.14818	0	0	0	0	-1.4
241	2	1.05	3.5483	574.4543	253.6391	0	0	0
242	2	0.993	1.8713	169.7117	90.9933	0	0	0
243	2	1.01	0.20887	83.8576	51.4257	7.84	2.94	0
244	0	0.99236	-0.73134	0	0	0	0	0
245	0	0.97153	-1.4338	0	0	59.78	29.4	0
246	0	0.96565	-2.2614	0	0	75.46	32.34	0
247	0	0.96898	-2.2692	0	0	59.78	29.4	0
248	0	0.97439	-6.0264	0	0	28.42	13.72	0.456
249	0	0.97365	-6.4437	0	0	28.42	13.72	0
250	0	1.0172	-4.6156	0	0	-22.54	-16.66	0
281	0	0.98895	-0.07146	0	0	-32.438	-28.812	0
319	0	1.0048	21.5474	0	0	113.484	-23.52	0
320	0	1.0023	17.9325	0	0	2.352	-12.348	0
322	0	0.99459	-1.25	0	0	2.352	-3.822	0
323	0	0.96642	3.0443	0	0	-14.602	25.97	0
324	0	0.97402	-7.287	0	0	24.206	-1.176	0
526	0	0.8433	-20.401	0	0	142.394	-34.202	0
528	0	0.91862	-20.9553	0	0	27.538	-20.09	0
531	0	0.92113	-11.756	0	0	13.72	2.45	0
552	0	0.96819	-5.6699	0	0	-10.878	-1.372	0
562	0	0.89636	-11.1531	0	0	49.49	17.052	0
609	0	0.92582	-11.3688	0	0	29.008	0.588	0
664	0	0.96721	2.5462	0	0	-111.426	75.166	0
1190	0	1.013	27.6113	0	0	98.3038	28.5866	0
1200	0	1.0207	16.2202	0	0	-98	33.4866	0
1201	0	1.017	9.0422	0	0	0	0	0
2040	0	0.95505	3.5065	0	0	0	0	0
7001	2	1.0507	31.0152	466.2081	183.3223	0	0	0
7002	2	1.0507	32.4142	621.9436	160.3374	0	0	0
7003	0	1.013	34.1818	1207.9483	420	0	0	0
7011	2	1.0145	24.9113	233.6032	88.6398	0	0	0
7012	0	1.043	31.8415	371.3692	224	0	0	0
7017	0	1.0158	6.8821	329.4404	350	0	0	0
7023	2	1.0507	26.1701	184.6863	27.8158	0	0	0
7024	2	1.029	32.6873	409.3048	135.3752	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_G(MW)$	$Q_G$ (Mvar)	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7039	0	1.0122	19.353	499.1522	200	0	0	0
7044	0	0.96578	2.8246	36.9373	42	0	0	0
1	0	1.0203	26.1431	0	0	88.2	48.02	0
7055	0	0.94823	7.5005	44.9237	25	0	0	0
7057	0	0.96838	14.7579	164.7202	90	0	0	0
7061	0	0.97816	21.8122	399.3217	150	0	0	0
7062	0	0.95268	26.5634	399.3217	150	0	0	0
7071	0	0.94484	-7.6161	115.8033	87	0	0	0
7130	2	1.0507	40.3039	1289.8092	399.4027	0	0	0
7139	2	1.0507	25.6368	698.813	322.9454	0	0	0
7166	2	1.0145	61.3619	552.0623	273.3664	0	0	0
9001	0	0.98122	0.83959	0	0	0	0	0
9002	0	0.95132	-8.7948	-4.1929	2	0	0	0
9003	0	0.93571	-8.9045	0	0	2.6558	0.9212	0.024
9004	0	0.9291	-9.0478	0	0	0.8428	0.2744	0
9005	0	0.98195	0.75236	0	0	0	0	0
9006	0	0.96686	-5.4255	0	0	0	0	0
9007	0	0.9493	-7.2807	0	0	0	0	0
9012	0	0.96789	-5.4422	0	0	0	0	0
9021	0	0.94547	-9.0263	0	0	4.655	1.5288	0
9022	0	0.92138	-11.652	0	0	1.4994	0.5194	0
9023	0	0.93153	-9.3352	0	0	0	0	0
9024	0	0.92709	-11.4115	0	0	1.323	0.4606	0
9025	0	0.92145	-10.4265	0	0	0.441	0.1568	0
9026	0	0.92232	-10.3346	0	0	0.441	0.1568	0
9031	0	0.88314	-14.4345	0	0	1.8032	0.6272	0
9032	0	0.89571	-13.2097	0	0	1.3622	0.4704	0
9033	0	0.88009	-14.7719	0	0	1.8522	0.637	0
9034	0	0.94826	-10.3547	0	0	1.519	0.5292	0.0172
9035	0	0.90225	-12.5136	0	0	1.6268	0.5684	0
9036	0	0.9112	-12.1428	0	0	2.9694	0.98	0
9037	0	0.90897	-11.9005	0	0	1.8228	0.6272	0
9038	0	0.89072	-13.8026	0	0	2.5284	0.8722	0
9041	0	0.9156	-10.6007	0	0	0.9898	0.343	0
9042	0	0.90211	-11.8095	0	0	0.7938	0.2744	0
9043	0	0.91654	-10.7872	0	0	1.568	0.5096	0
9044	0	0.93131	-9.006	0	0	0	0	0



# Capítulo 5

## Considerações Finais

No período referente a esse relatório, foram realizados estudos com a finalidade de descrever o comportamento dos sistemas de transmissão de energia elétrica comumente referenciados na literatura correlata conforme os sistemas são carregados. Todos os sistemas apresentaram o comportamento esperado de acordo com a descrição feita em (AVALOS et al., 2008). O estado do sistema no ponto de máximo carregamento também foi obtido, juntamente com o perfil da magnitude do determinante da matriz Jacobiana associada ao sistema, que facilita a visualização do tipo de bifurcação que induziu o colapso do sistema.

Além disso, foi detalhada a abordagem do problema de Fluxo de Carga utilizando a modelagem da barra *slack* distribuída, juntamente com o elo de corrente contínua e seus modos de operação.

Por fim, foi descrita a simulação presente no artigo intitulado *A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow*, que descreve uma abordagem em dois estágios para resolver o problema de Fluxo de Potência Ótimo com restrições de tensão e estabilidade/segurança.



# Bibliografia

AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE transactions on Power Systems*, Ieee, v. 7, n. 1, p. 416–423, 1992.

ALVES, D. A. et al. Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação. [sn], 2000.

ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C. *Computer analysis of power systems*. [S.l.]: Wiley Online Library, 1990.

AVALOS, R. J.; CANIZARES, C. A.; MILANO, F.; CONEJO, A. J. Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, IEEE, v. 56, n. 1, p. 210–223, 2008.

BERNARDES, J. *Corrente contínua é melhor na transmissão a longa distância*. 2020. [⟨http://www.usp.br/agen/?p=207540⟩](http://www.usp.br/agen/?p=207540). Acesso em 19 nov. 2020.

CAÑIZARES, C. A. Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 61–68, 1995.

CANIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L. Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 1–8, 1993.

CUTSEM, T. V. A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 6, n. 1, p. 145–156, 1991.

FILHO, J. A. P. Modelagem e incorporação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência. *Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UFJF*, 2000.

FILHO, J. A. P.; COSTA, V. M. D.; OLIVEIRA, M. L. D.; JUNIOR, S. G. Modelagem do elo de corrente continua de itaipu para estudos de regime permanente. *IX SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 2004.

IBA, K.; SUZUKI, H.; EGAWA, M.; WATANABE, T. Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 584–593, 1991.

IRISARRI, G.; WANG, X.; TONG, J.; MOKHTARI, S. Maximum loadability of power systems using interior point nonlinear optimization method. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 162–172, 1997.

ITAIPU. *Integração ao sistema brasileiro*. 2020. <<https://www.itaipu.gov.br/energia/integracao-ao-sistema-brasileiro>>. Acesso em 19 nov. 2020.

JORDAN, D.; SMITH, P.; SMITH, P. *Nonlinear ordinary differential equations: an introduction for scientists and engineers*. [S.l.]: Oxford University Press on Demand, 2007. v. 10.

JR, H. P.; COLBORN, H. W.; COLEMAN, D.; MARRIAGE, E.; RICHARD, J.; RINDT, L.; RUBINO, L.; STAGG, G.; TRAUB, T.; VANDERGRIFT, J. et al. Common format for exchange of solved load flow data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, n. 6, p. 1916–1925, 1973.

KUNDUR, P. Power system stability. *Power system stability and control*, CRC Press New York, NY, USA, p. 7–1, 2007.

LAGE, G. G. *O fluxo de potência ótimo reativo com variáveis de controle discretas e restrições de atuação de dispositivos de controle de tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. [S.l.]: Ed Unicamp, 1999.

ROSEHART, W.; ROMAN, C.; SCHELLENBERG, A. Optimal power flow with complementarity constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 813–822, 2005.

SEYDEL, R. *Practical bifurcation and stability analysis*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. v. 5.

STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil, 1974.

STOTT, B. Decoupled newton load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 1955–1959, 1972.

STOTT, B.; ALSAC, O. Fast decoupled load flow. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 3, p. 859–869, 1974.

TINNEY, W. F.; HART, C. E. Power flow solution by newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, Ieee, n. 11, p. 1449–1460, 1967.

# Apêndice A

## Dados dos Sistemas

### A.0.1 Dados do sistema de 5 barras

O diagrama unifilar do sistema de 5 barras pode ser visto na Figura A.1.

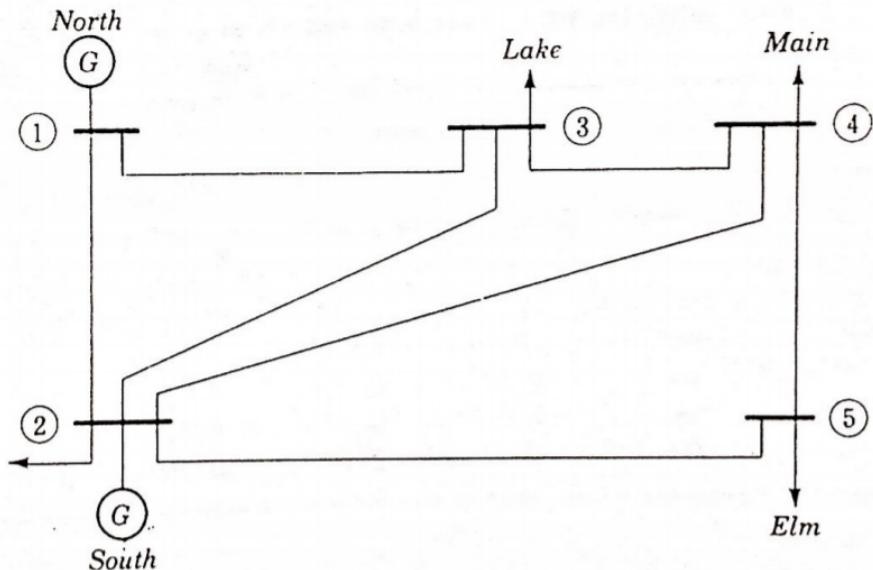


Figura A.1: Diagrama unifilar do sistema de 5 barras

Os dados iniciais do sistema de 5 barras podem ser vistos nas tabelas A.1 e A.2.

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	0	0	125	0	0
2	2	1	0	20	10	40	0	0
3	0	1	0	45	15	0	0	0
4	0	1	0	40	5	0	0	0
5	0	1	0	60	10	0	0	0

Tabela A.1: Dados das barras - Sistema 5 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$
1	2	0.02	0.06	0.06
1	3	0.08	0.24	0.05
2	3	0.06	0.18	0.04
2	4	0.06	0.18	0.04
2	5	0.04	0.12	0.03
3	4	0.01	0.03	0.02
4	5	0.08	0.24	0.05

Tabela A.2: Dados das linhas - Sistema 5 barras

### A.0.2 Dados do sistema de 6 barras

O diagrama unifilar do sistema de 6 barras pode ser visto na Figura A.2.

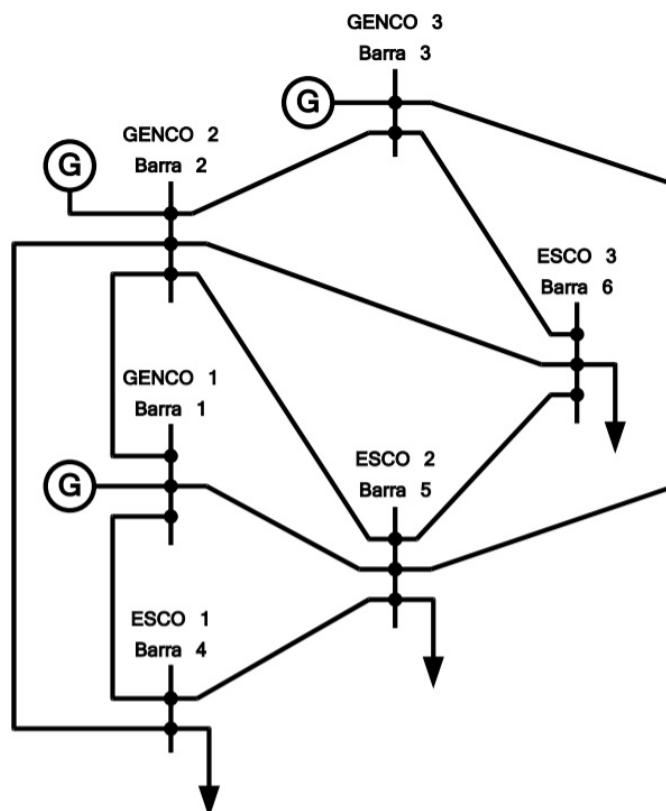


Figura A.2: Diagrama unifilar do sistema de 6 barras

Os dados iniciais do sistema de 6 barras podem ser vistos nas tabelas A.3 e A.4.

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.1	0	0	0	80	0	0
2	2	1.1	0	0	0	140	0	0
3	2	1.1	0	0	0	60	0	0
4	0	1	0	90	60	0	0	0
5	0	1	0	100	70	0	0	0
6	0	1	0	90	60	0	0	0

Tabela A.3: Dados das barras - Sistema 6 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$
1	2	0.1	0.2	0.04
1	4	0.05	0.2	0.04
1	5	0.08	0.3	0.06
2	3	0.05	0.25	0.06
2	4	0.05	0.1	0.02
2	5	0.1	0.3	0.04
2	6	0.07	0.2	0.05
3	5	0.12	0.26	0.05
3	6	0.02	0.1	0.02
4	5	0.2	0.4	0.08
5	6	0.1	0.3	0.06

Tabela A.4: Dados das linhas - Sistema 6 barras

### A.0.3 Dados do sistema de 14 barras

O diagrama unifilar do sistema de 14 barras pode ser visto na Figura A.3.

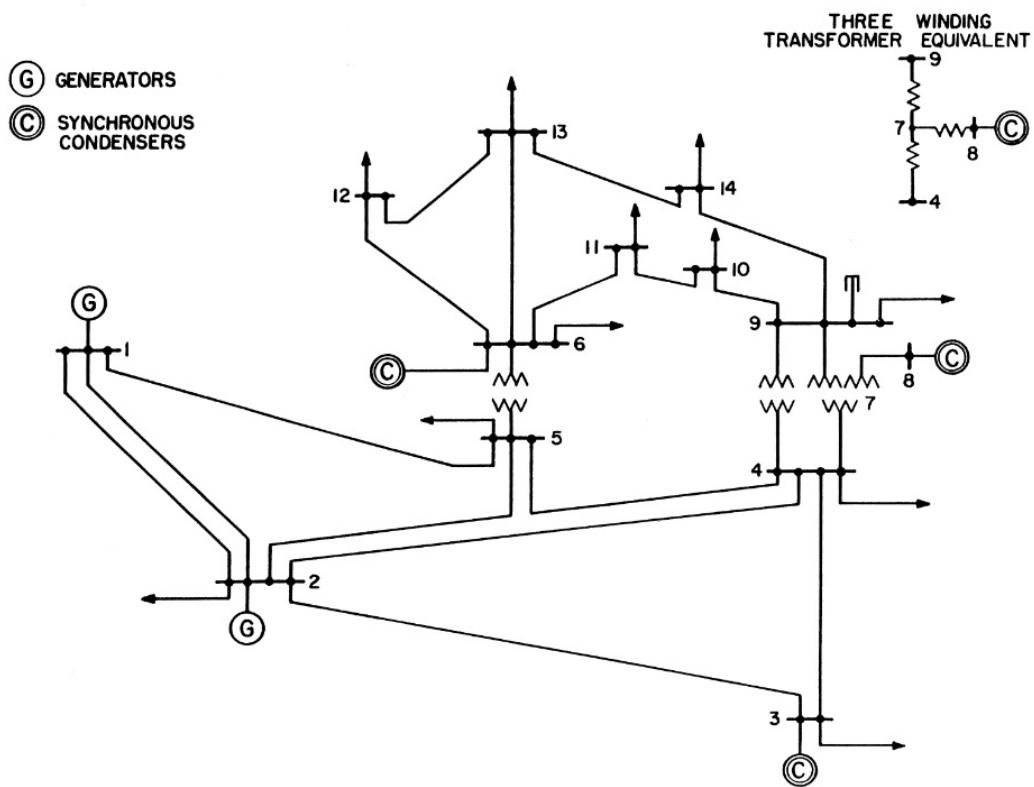


Figura A.3: Diagrama unifilar do sistema de 14 barras

Os dados iniciais do sistema de 14 barras podem ser vistos nas tabelas A.5 e A.6.

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	0	0	219	0	0
2	2	1.045	0	21.7	12.7	40	0	0
3	2	1.01	0	94.2	19	0	0	0
4	0	1	0	47.8	-3.9	0	0	0
5	0	1	0	7.6	1.6	0	0	0
6	2	1.07	0	11.2	7.5	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	29.5	16.6	0	0	0.19
10	0	1	0	9	5.8	0	0	0
11	0	1	0	3.5	1.8	0	0	0
12	0	1	0	6.1	1.6	0	0	0
13	0	1	0	13.5	5.8	0	0	0
14	0	1	0	14.9	5	0	0	0

Tabela A.5: Dados das barras - Sistema 14 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	0
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	0
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	0
2	4	0.05811	0.17632	0.034	0
2	5	0.05695	0.17388	0.0346	0
3	4	0.06701	0.17103	0.0128	0
4	5	0.01335	0.04211	0	0
4	7	0	0.20912	0	0.978
4	9	0	0.55618	0	0.969
5	6	0	0.25202	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	0
6	12	0.12291	0.25581	0	0
6	13	0.06615	0.13027	0	0
7	8	0	0.17615	0	0
7	9	0	0.11001	0	0
9	10	0.03181	0.0845	0	0
9	14	0.12711	0.27038	0	0
10	11	0.08205	0.19207	0	0
12	13	0.22092	0.19988	0	0
13	14	0.17093	0.34802	0	0

Tabela A.6: Dados das linhas - Sistema 14 barras

#### A.0.4 Dados do sistema de 30 barras

O diagrama unifilar do sistema de 30 barras pode ser visto na Figura A.4.

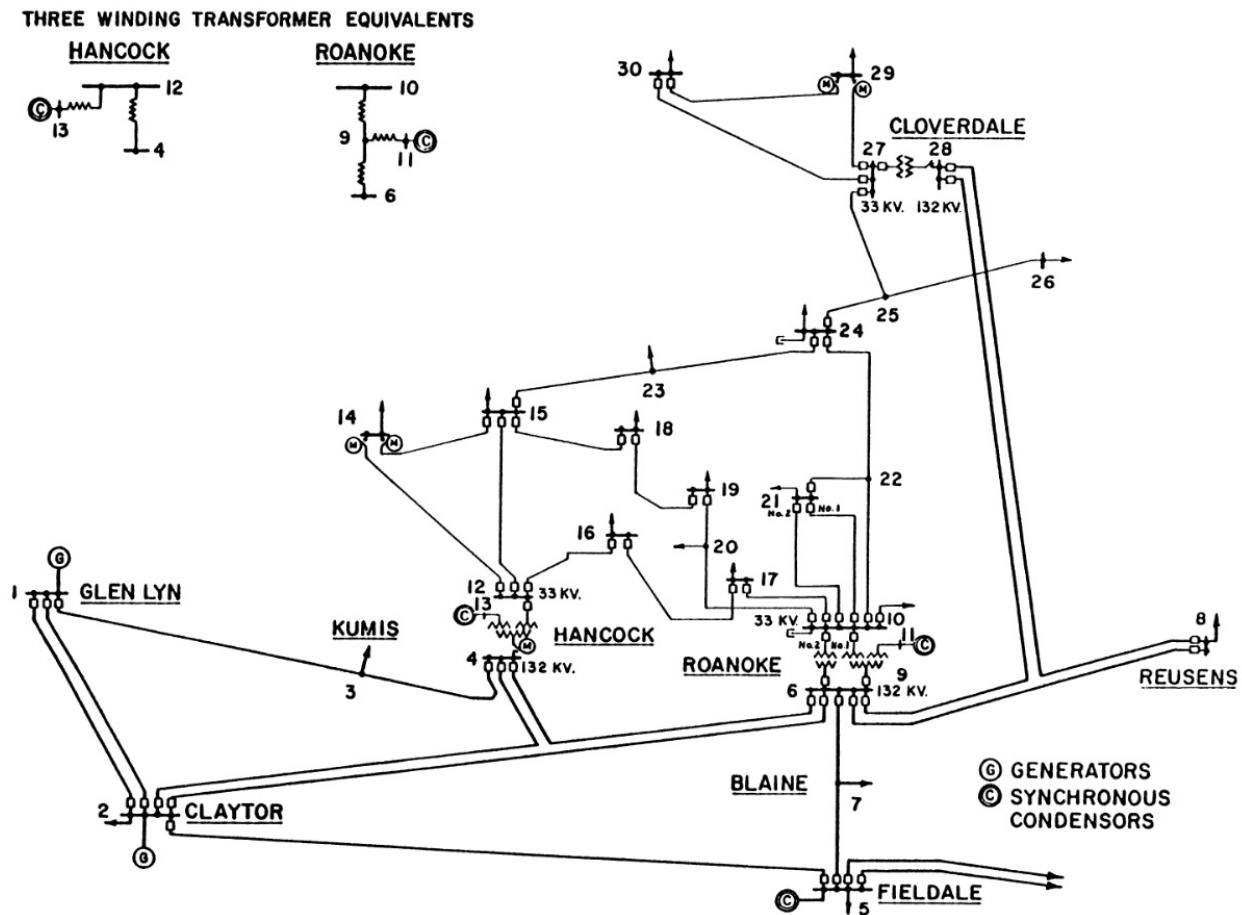


Figura A.4: Diagrama unifilar do sistema de 30 barras

Os dados iniciais do sistema de 30 barras podem ser vistos nas tabelas A.7 e A.8.

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.06	0	0	0	243.4	0	0
2	2	1.043	0	21.7	12.7	40	0	0
3	0	1	0	2.4	1.2	0	0	0
4	0	1	0	7.6	1.6	0	0	0
5	2	1.01	0	94.2	19	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	22.8	10.9	0	0	0
8	2	1.01	0	30	30	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	5.8	2	0	0	0.19
11	2	1.082	0	0	0	0	0	0
12	0	1	0	11.2	7.5	0	0	0
13	2	1.071	0	0	0	0	0	0
14	0	1	0	6.2	1.6	0	0	0
15	0	1	0	8.2	2.5	0	0	0
16	0	1	0	3.5	1.8	0	0	0
17	0	1	0	9	5.8	0	0	0
18	0	1	0	3.2	0.9	0	0	0
19	0	1	0	9.5	3.4	0	0	0
20	0	1	0	2.2	0.7	0	0	0
21	0	1	0	17.5	11.2	0	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0
23	0	1	0	3.2	1.6	0	0	0
24	0	1	0	8.7	6.7	0	0	0.043
25	0	1	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	3.5	2.3	0	0	0
27	0	1	0	0	0	0	0	0
28	0	1	0	0	0	0	0	0
29	0	1	0	2.4	0.9	0	0	0
30	0	1	0	10.6	1.9	0	0	0

Tabela A.7: Dados das barras - Sistema 30 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	0
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	0
2	4	0.057	0.1737	0.0368	0
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	0
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	0
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	0
4	6	0.0119	0.0414	0.009	0
4	12	0	0.256	0	0.932
5	7	0.046	0.116	0.0204	0
6	7	0.0267	0.082	0.017	0
6	8	0.012	0.042	0.009	0
6	9	0	0.208	0	0.978
6	10	0	0.556	0	0.969
6	28	0.0169	0.0599	0.013	0
8	28	0.0636	0.2	0.0428	0
9	10	0	0.11	0	0
9	11	0	0.208	0	0
10	17	0.0324	0.0845	0	0
10	20	0.0936	0.209	0	0
10	21	0.0348	0.0749	0	0
10	22	0.0727	0.1499	0	0
12	13	0	0.14	0	0
12	14	0.1231	0.2559	0	0
12	15	0.0662	0.1304	0	0
12	16	0.0945	0.1987	0	0
14	15	0.221	0.1997	0	0
15	18	0.1073	0.2185	0	0
15	23	0.1	0.202	0	0
16	17	0.0524	0.1923	0	0
18	19	0.0639	0.1292	0	0
19	20	0.034	0.068	0	0
21	22	0.0116	0.0236	0	0
22	24	0.115	0.179	0	0
23	24	0.132	0.27	0	0
24	25	0.1885	0.3292	0	0
25	26	0.2544	0.38	0	0
25	27	0.1093	0.2087	0	0
27	29	0.2198	0.4153	0	0
27	30	0.3202	0.6027	0	0
28	27	0	0.396	0	0.968
29	30	0.2399	0.4533	0	0

Tabela A.8: Dados das linhas - Sistema 30 barras

### A.0.5 Dados do sistema de 41 barras (CIGRE-32)

O diagrama unifilar do sistema de 41 barras pode ser visto na Figura A.5.

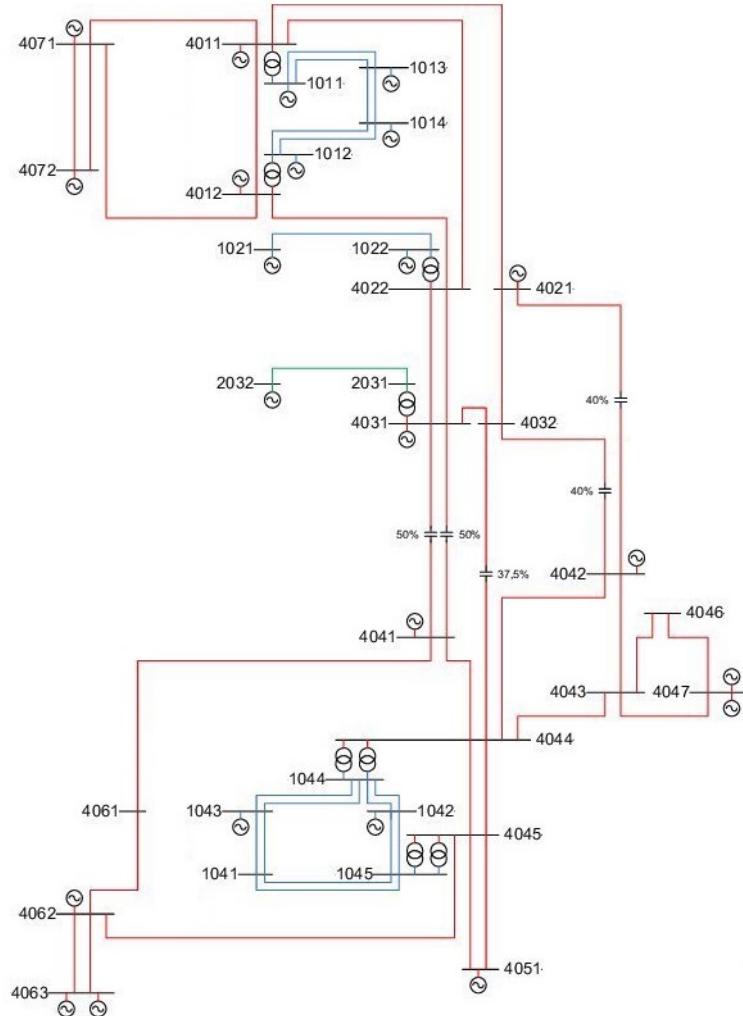


Figura A.5: Diagrama unifilar do sistema de 41 barras

Os dados iniciais do sistema de 41 barras podem ser vistos nas tabelas A.9 e A.10.

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
4011	3	1.1	0	0	0	-12.17	0	0
4071	2	1.1	0	300	100	469.98	0	0
4072	2	1.1	0	2000	500	1332.97	0	0
4012	2	1.1	0	0	0	600.58	0	0
4021	2	1.1	0	0	0	281.99	0	0
4031	2	1.1	0	0	0	328.99	0	0
4042	2	1.1	0	0	0	657.98	0	0
4041	2	1.1	0	0	0	281.99	0	0
4062	2	1.1	0	0	0	563.98	0	0
4063	2	1.1	0	0	0	1127.97	0	0
4051	2	1	0	0	0	657.98	0	0
4047	2	1.1	0	0	0	769.58	0	0
2032	2	1.1	0	200	50	798.98	0	0
1013	2	1.1	0	100	40	543.18	0	0
1012	2	1.1	0	300	100	751.98	0	0
1014	2	1.1	0	0	0	421.09	0	0
1022	2	1.1	0	280	95	234.99	0	0
1021	2	1.1	0	0	0	563.98	0	0
1043	2	1.1	0	230	100	187.99	0	0
1042	2	1.1	0	300	80	375.99	0	0
4022	0	1	0	0	0	0	0	0
4032	0	1	0	0	0	0	0	0
4043	0	1	0	0	0	0	0	0
4044	0	1	0	0	0	0	0	0
4045	0	1	0	0	0	0	0	0
4046	0	1	0	0	0	0	0	0
4061	0	1	0	0	0	0	0	0
2031	0	1	0	100	30	0	0	0
1011	0	1	0	200	80	0	0	0
1041	0	1	0	600	200	0	0	0
1044	0	1	0	800	300	0	0	0
1045	0	1	0	700	250	0	0	0
42	0	1	0	400	125.7	0	0	0
41	0	1	0	540	128.8	0	0	0
62	0	1	0	300	80.02	0	0	0
63	0	1	0	590	256.2	0	0	0
51	0	1	0	800	253.2	0	0	0
47	0	1	0	100	45.19	0	0	0
43	0	1	0	900	238.8	0	0	0
46	0	1	0	700	193.7	0	0	0
61	0	1	0	500	112.3	0	0	0

Tabela A.9: Dados das barras - Sistema 41 barras

Tabela A.10: Dados das linhas - Sistema 41 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
4011	4012	0.001	0.008	0.2	1
4011	4021	0.006	0.06	1.79	1
4011	4022	0.004	0.04	1.195	1
4011	4071	0.005	0.045	1.395	1
4012	4022	0.004	0.035	1.045	1
4012	4071	0.005	0.05	1.49	1
4021	4032	0.004	0.04	1.195	1
4021	4042	0.01	0.06	2.985	1
4031	4022	0.002	0.02	0.6	1
4031	4032	0.001	0.01	0.3	1
4031	4041	0.003	0.02	1.195	1
4042	4032	0.01	0.04	1.99	1
4032	4044	0.006	0.05	2.385	1
4041	4044	0.003	0.03	0.895	1
4041	4061	0.006	0.045	1.295	1
4042	4043	0.002	0.015	0.495	1
4042	4044	0.002	0.02	0.595	1
4043	4044	0.001	0.01	0.3	1
4043	4046	0.001	0.01	0.3	1
4043	4047	0.002	0.02	0.595	1
4044	4045	0.001	0.01	0.3	1
4045	4051	0.002	0.02	0.6	1
4045	4062	0.011	0.08	2.385	1
4046	4047	0.001	0.015	0.495	1
4061	4062	0.0015	0.015	0.45	1
4062	4063	0.0015	0.015	0.45	1
4071	4072	0.0015	0.015	1.5	1
2031	2032	0.00599	0.045	0.025	1
1011	1013	0.00503	0.03491	0.065	1
1012	1014	0.0071	0.04497	0.085	1
1013	1014	0.00349	0.02503	0.05	1
1021	1022	0.01503	0.1	0.145	1
1041	1043	0.00503	0.03	0.06	1
1041	1045	0.00751	0.06	0.12	1
1042	1044	0.01899	0.14	0.285	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
1042	1045	0.05	0.3	0.565	1
1043	1044	0.00503	0.04	0.075	1
1011	4011	0	0.008	0	1.1
1012	4012	0	0.008	0	1.1
1022	4022	0	0.012	0	1.1
1044	4044	0	0.005	0	1.1
1045	4045	0	0.005	0	1.1
2031	4031	0	0.012	0	1.1
4042	42	0	0.013	0	1.05
4041	41	0	0.01	0	1.012
4047	47	0	0.04	0	0.988
4043	43	0	0.007	0	0.952
4046	46	0	0.01	0	0.952
4051	51	0	0.007	0	0.952
4061	61	0	0.013	0	1.05
4062	62	0	0.02	0	1.05
4063	63	0	0.01	0	1.05

### A.0.6 Dados do sistema de 57 barras

Os dados iniciais do sistema de 57 barras podem ser vistos nas tabelas A.11 e A.12.

Tabela A.11: Dados das barras - Sistema 57 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.04	0	55	17	450.8	0	0
2	2	1.01	0	3	88	0	0	0
3	2	0.985	0	41	21	40	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	13	4	0	0	0
6	2	0.98	0	75	2	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0
8	2	1.005	0	150	22	450	0	0
9	2	0.98	0	121	26	0	0	0
10	0	1	0	5	2	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0
12	2	1.015	0	377	24	310	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
13	0	1	0	18	2.3	0	0	0
14	0	1	0	10.5	5.3	0	0	0
15	0	1	0	22	5	0	0	0
16	0	1	0	43	3	0	0	0
17	0	1	0	42	8	0	0	0
18	0	1	0	27.2	9.8	0	0	0.1
19	0	1	0	3.3	0.6	0	0	0
20	0	1	0	2.3	1	0	0	0
21	0	1	0	0	0	0	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0
23	0	1	0	6.3	2.1	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0
25	0	1	0	6.3	3.2	0	0	0.059
26	0	1	0	0	0	0	0	0
27	0	1	0	9.3	0.5	0	0	0
28	0	1	0	4.6	2.3	0	0	0
29	0	1	0	17	2.6	0	0	0
30	0	1	0	3.6	1.8	0	0	0
31	0	1	0	5.8	2.9	0	0	0
32	0	1	0	1.6	0.8	0	0	0
33	0	1	0	3.8	1.9	0	0	0
34	0	1	0	0	0	0	0	0
35	0	1	0	6	3	0	0	0
36	0	1	0	0	0	0	0	0
37	0	1	0	0	0	0	0	0
38	0	1	0	14	7	0	0	0
39	0	1	0	0	0	0	0	0
40	0	1	0	0	0	0	0	0
41	0	1	0	6.3	3	0	0	0
42	0	1	0	7.1	4.4	0	0	0
43	0	1	0	2	1	0	0	0
44	0	1	0	12	1.8	0	0	0
45	0	1	0	0	0	0	0	0
46	0	1	0	0	0	0	0	0
47	0	1	0	29.7	11.6	0	0	0
48	0	1	0	0	0	0	0	0
49	0	1	0	18	8.5	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
50	0	1	0	21	10.5	0	0	0
51	0	1	0	18	5.3	0	0	0
52	0	1	0	4.9	2.2	0	0	0
53	0	1	0	20	10	0	0	0.063
54	0	1	0	4.1	1.4	0	0	0
55	0	1	0	6.8	3.4	0	0	0
56	0	1	0	7.6	2.2	0	0	0
57	0	1	0	6.7	2	0	0	0

Tabela A.12: Dados das linhas - Sistema 57 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
1	2	0.0083	0.028	0.0645	1
2	3	0.0298	0.085	0.0409	1
3	4	0.0112	0.0366	0.019	1
4	5	0.0625	0.132	0.0129	1
4	6	0.043	0.148	0.0174	1
6	7	0.02	0.102	0.0138	1
6	8	0.0339	0.173	0.0235	1
8	9	0.0099	0.0505	0.0274	1
9	10	0.0369	0.1679	0.022	1
9	11	0.0258	0.0848	0.0109	1
9	12	0.0648	0.295	0.0386	1
9	13	0.0481	0.158	0.0203	1
13	14	0.0132	0.0434	0.0055	1
13	15	0.0269	0.0869	0.0115	1
1	15	0.0178	0.091	0.0494	1
1	16	0.0454	0.206	0.0273	1
1	17	0.0238	0.108	0.0143	1
3	15	0.0162	0.053	0.0272	1
4	18	0	0.555	0	0.97
4	18	0	0.43	0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0062	1
7	8	0.0139	0.0712	0.0097	1
10	12	0.0277	0.1262	0.0164	1
11	13	0.0223	0.0732	0.0094	1
12	13	0.0178	0.058	0.0302	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
12	16	0.018	0.0813	0.0108	1
12	17	0.0397	0.179	0.0238	1
14	15	0.0171	0.0547	0.0074	1
18	19	0.461	0.685	0	1
19	20	0.283	0.434	0	1
21	20	0	0.7767	0	1.043
21	22	0.0736	0.117	0	1
22	23	0.0099	0.0152	0	1
23	24	0.166	0.256	0.0042	1
24	25	0	1.182	0	1
24	25	0	1.23	0	1
24	26	0	0.0473	0	1.043
26	27	0.165	0.254	0	1
27	28	0.0618	0.0954	0	1
28	29	0.0418	0.0587	0	1
7	29	0	0.0648	0	0.967
25	30	0.135	0.202	0	1
30	31	0.326	0.497	0	1
31	32	0.507	0.755	0	1
32	33	0.0392	0.036	0	1
34	32	0	0.953	0	0.975
34	35	0.052	0.078	0.0016	1
35	36	0.043	0.0537	0.0008	1
36	37	0.029	0.0366	0	1
37	38	0.0651	0.1009	0.001	1
37	39	0.0239	0.0379	0	1
36	40	0.03	0.0466	0	1
22	38	0.0192	0.0295	0	1
11	41	0	0.749	0	0.955
41	42	0.207	0.352	0	1
41	43	0	0.412	0	1
38	44	0.0289	0.0585	0.001	1
15	45	0	0.1042	0	0.955
14	46	0	0.0735	0	0.9
46	47	0.023	0.068	0.0016	1
47	48	0.0182	0.0233	0	1
48	49	0.0834	0.129	0.0024	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
49	50	0.0801	0.128	0	1
50	51	0.1386	0.22	0	1
10	51	0	0.0712	0	0.93
13	49	0	0.191	0	0.895
29	52	0.1442	0.187	0	1
52	53	0.0762	0.0984	0	1
53	54	0.1878	0.232	0	1
54	55	0.1732	0.2265	0	1
11	43	0	0.153	0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.002	1
40	56	0	1.195	0	0.958
56	41	0.553	0.549	0	1
56	42	0.2125	0.354	0	1
39	57	0	1.355	0	0.98
57	56	0.174	0.26	0	1
38	49	0.115	0.177	0.0015	1
38	48	0.0312	0.0482	0	1
9	55	0	0.1205	0	0.94

### A.0.7 Dados do sistema de 118 barras

O diagrama unifilar do sistema de 118 barras pode ser visto na Figura A.6.

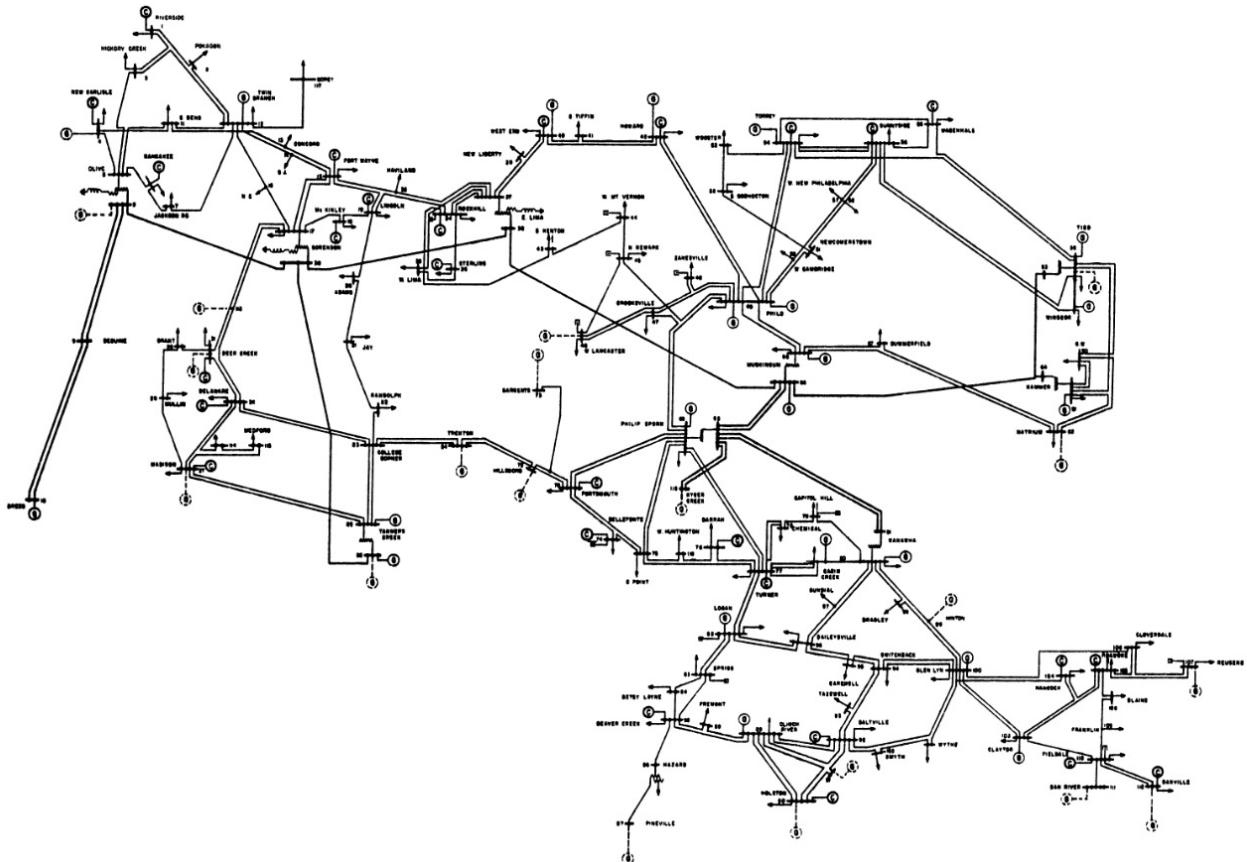


Figura A.6: Diagrama unifilar do sistema de 118 barras

Os dados iniciais do sistema de 118 barras podem ser vistos nas tabelas A.13 e A.14.

Tabela A.13: Dados das barras - Sistema 57 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
1	3	1.035	0	0	0	381	0	0
2	0	1	0	20	9	0	0	0
3	0	1	0	39	10	0	0	0
4	2	0.998	0	30	12	-9	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	-0.4
6	2	0.99	0	52	22	0	0	0
7	0	1	0	19	2	0	0	0
8	2	1.015	0	0	0	-28	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0
10	2	1.05	0	0	0	450	0	0
11	0	1	0	70	23	0	0	0
12	2	0.99	0	47	10	85	0	0
13	0	1	0	34	16	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
14	0	1	0	14	1	0	0	0
15	2	0.97	0	90	30	0	0	0
16	0	1	0	25	10	0	0	0
17	0	1	0	11	3	0	0	0
18	2	0.973	0	60	34	0	0	0
19	2	0.963	0	45	25	0	0	0
20	0	1	0	18	3	0	0	0
21	0	1	0	14	8	0	0	0
22	0	1	0	10	5	0	0	0
23	0	1	0	7	3	0	0	0
24	2	0.992	0	0	0	-13	0	0
25	2	1.05	0	0	0	220	0	0
26	2	1.015	0	0	0	314	0	0
27	2	0.968	0	62	13	-9	0	0
28	0	1	0	17	7	0	0	0
29	0	1	0	24	4	0	0	0
30	0	1	0	0	0	0	0	0
31	2	0.967	0	43	27	7	0	0
32	2	0.964	0	59	23	0	0	0
33	0	1	0	23	9	0	0	0
34	2	0.986	0	59	26	0	0	0.14
35	0	1	0	33	9	0	0	0
36	2	0.98	0	31	17	0	0	0
37	0	1	0	0	0	0	0	-0.25
38	0	1	0	0	0	0	0	0
39	0	1	0	27	11	0	0	0
40	2	0.97	0	20	23	-46	0	0
41	0	1	0	37	10	0	0	0
42	2	0.985	0	37	23	-59	0	0
43	0	1	0	18	7	0	0	0
44	0	1	0	16	8	0	0	0.1
45	0	1	0	53	22	0	0	0.1
46	2	1.005	0	28	10	19	0	0.1
47	0	1	0	34	0	0	0	0
48	0	1	0	20	11	0	0	0.15
49	2	1.025	0	87	30	204	0	0
50	0	1	0	17	4	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
51	0	1	0	17	8	0	0	0
52	0	1	0	18	5	0	0	0
53	0	1	0	23	11	0	0	0
54	2	0.955	0	113	32	48	0	0
55	2	0.952	0	63	22	0	0	0
56	2	0.954	0	84	18	0	0	0
57	0	1	0	12	3	0	0	0
58	0	1	0	12	3	0	0	0
59	2	0.985	0	277	113	155	0	0
60	0	1	0	78	3	0	0	0
61	2	0.995	0	0	0	160	0	0
62	2	0.998	0	77	14	0	0	0
63	0	1	0	0	0	0	0	0
64	0	1	0	0	0	0	0	0
65	2	1.005	0	0	0	391	0	0
66	2	1.05	0	39	18	392	0	0
67	0	1	0	28	7	0	0	0
68	0	1	0	0	0	0	0	0
69	2	0.955	0	51	27	0	0	0
70	2	0.984	0	66	20	0	0	0
71	0	1	0	0	0	0	0	0
72	2	0.98	0	0	0	-12	0	0
73	2	0.991	0	0	0	-6	0	0
74	2	0.958	0	68	27	0	0	0.12
75	0	1	0	47	11	0	0	0
76	2	0.943	0	68	36	0	0	0
77	2	1.006	0	61	28	0	0	0
78	0	1	0	71	26	0	0	0
79	0	1	0	39	32	0	0	0.2
80	2	1.04	0	130	26	477	0	0
81	0	1	0	0	0	0	0	0
82	0	1	0	54	27	0	0	0.2
83	0	1	0	20	10	0	0	0.1
84	0	1	0	11	7	0	0	0
85	2	0.985	0	24	15	0	0	0
86	0	1	0	21	10	0	0	0
87	2	1.015	0	0	0	4	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
88	0	1	0	48	10	0	0	0
89	2	1.005	0	0	0	607	0	0
90	2	0.985	0	78	42	-85	0	0
91	2	0.98	0	0	0	-10	0	0
92	2	0.993	0	65	10	0	0	0
93	0	1	0	12	7	0	0	0
94	0	1	0	30	16	0	0	0
95	0	1	0	42	31	0	0	0
96	0	1	0	38	15	0	0	0
97	0	1	0	15	9	0	0	0
98	0	1	0	34	8	0	0	0
99	2	1.01	0	0	0	-42	0	0
100	2	1.017	0	37	18	252	0	0
101	0	1	0	22	15	0	0	0
102	0	1	0	5	3	0	0	0
103	2	1.001	0	23	16	40	0	0
104	2	0.971	0	38	25	0	0	0
105	2	0.965	0	31	26	0	0	0.2
106	0	1	0	43	16	0	0	0
107	2	0.952	0	28	12	-22	0	0.06
108	0	1	0	2	1	0	0	0
109	0	1	0	8	3	0	0	0
110	2	0.973	0	39	30	0	0	0.06
111	2	0.98	0	0	0	36	0	0
112	2	0.975	0	25	13	-43	0	0
113	2	0.993	0	0	0	-6	0	0
114	0	1	0	8	3	0	0	0
115	0	1	0	22	7	0	0	0
116	2	1.005	0	0	0	-184	0	0
117	0	1	0	20	8	0	0	0
118	0	1	0	33	15	0	0	0

Tabela A.14: Dados das linhas - Sistema 57 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
69	2	0.0303	0.0999	0.0127	1
69	3	0.0129	0.0424	0.00541	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
4	5	0.00176	0.00798	0.00105	1
3	5	0.0241	0.108	0.0142	1
5	6	0.0119	0.054	0.00713	1
6	7	0.00459	0.0208	0.00275	1
8	9	0.00244	0.0305	0.581	1
8	5	0	0.0267	0	0.985
9	10	0.00258	0.0322	0.615	1
4	11	0.0209	0.0688	0.00874	1
5	11	0.0203	0.0682	0.00869	1
11	12	0.00595	0.0196	0.00251	1
2	12	0.0187	0.0616	0.00786	1
3	12	0.0484	0.16	0.0203	1
7	12	0.00862	0.034	0.00437	1
11	13	0.02225	0.0731	0.00938	1
12	14	0.0215	0.0707	0.00908	1
13	15	0.0744	0.2444	0.03134	1
14	15	0.0595	0.195	0.0251	1
12	16	0.0212	0.0834	0.0107	1
15	17	0.0132	0.0437	0.0222	1
16	17	0.0454	0.1801	0.0233	1
17	18	0.0123	0.0505	0.00649	1
18	19	0.01119	0.0493	0.00571	1
19	20	0.0252	0.117	0.0149	1
15	19	0.012	0.0394	0.00505	1
20	21	0.0183	0.0849	0.0108	1
21	22	0.0209	0.097	0.0123	1
22	23	0.0342	0.159	0.0202	1
23	24	0.0135	0.0492	0.0249	1
23	25	0.0156	0.08	0.0432	1
26	25	0	0.0382	0	0.96
25	27	0.0318	0.163	0.0882	1
27	28	0.01913	0.0855	0.0108	1
28	29	0.0237	0.0943	0.0119	1
30	17	0	0.0388	0	0.96
8	30	0.00431	0.0504	0.257	1
26	30	0.00799	0.086	0.454	1
17	31	0.0474	0.1563	0.01995	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
29	31	0.0108	0.0331	0.00415	1
23	32	0.0317	0.1153	0.05865	1
31	32	0.0298	0.0985	0.01255	1
27	32	0.0229	0.0755	0.00963	1
15	33	0.038	0.1244	0.01597	1
19	34	0.0752	0.247	0.0316	1
35	36	0.00224	0.0102	0.00134	1
35	37	0.011	0.0497	0.00659	1
33	37	0.0415	0.142	0.0183	1
34	36	0.00871	0.0268	0.00284	1
34	37	0.00256	0.0094	0.00492	1
38	37	0	0.0375	0	0.935
37	39	0.0321	0.106	0.0135	1
37	40	0.0593	0.168	0.021	1
30	38	0.00464	0.054	0.211	1
39	40	0.0184	0.0605	0.00776	1
40	41	0.0145	0.0487	0.00611	1
40	42	0.0555	0.183	0.0233	1
41	42	0.041	0.135	0.0172	1
43	44	0.0608	0.2454	0.03034	1
34	43	0.0413	0.1681	0.02113	1
44	45	0.0224	0.0901	0.0112	1
45	46	0.04	0.1356	0.0166	1
46	47	0.038	0.127	0.0158	1
46	48	0.0601	0.189	0.0236	1
47	49	0.0191	0.0625	0.00802	1
42	49	0.0715	0.323	0.043	1
42	49	0.0715	0.323	0.043	1
45	49	0.0684	0.186	0.0222	1
48	49	0.0179	0.0505	0.00629	1
49	50	0.0267	0.0752	0.00937	1
49	51	0.0486	0.137	0.0171	1
51	52	0.0203	0.0588	0.00698	1
52	53	0.0405	0.1635	0.02029	1
53	54	0.0263	0.122	0.0155	1
49	54	0.073	0.289	0.0369	1
49	54	0.0869	0.291	0.0365	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
54	55	0.0169	0.0707	0.0101	1
54	56	0.00275	0.00955	0.00366	1
55	56	0.00488	0.0151	0.00187	1
56	57	0.0343	0.0966	0.0121	1
50	57	0.0474	0.134	0.0166	1
56	58	0.0343	0.0966	0.0121	1
51	58	0.0255	0.0719	0.00894	1
54	59	0.0503	0.2293	0.0299	1
56	59	0.0825	0.251	0.02845	1
56	59	0.0803	0.239	0.0268	1
55	59	0.04739	0.2158	0.02823	1
59	60	0.0317	0.145	0.0188	1
59	61	0.0328	0.15	0.0194	1
60	61	0.00264	0.0135	0.00728	1
60	62	0.0123	0.0561	0.00734	1
61	62	0.00824	0.0376	0.0049	1
63	59	0	0.0386	0	0.96
63	64	0.00172	0.02	0.108	1
64	61	0	0.0268	0	0.985
38	65	0.00901	0.0986	0.523	1
64	65	0.00269	0.0302	0.19	1
49	66	0.018	0.0919	0.0124	1
49	66	0.018	0.0919	0.0124	1
62	66	0.0482	0.218	0.0289	1
62	67	0.0258	0.117	0.0155	1
65	66	0	0.037	0	0.935
66	67	0.0224	0.1015	0.01341	1
65	68	0.00138	0.016	0.319	1
47	1	0.0844	0.2778	0.03546	1
49	1	0.0985	0.324	0.0414	1
68	1	0	0.037	0	0.935
1	70	0.03	0.127	0.061	1
24	70	0.00221	0.4115	0.05099	1
70	71	0.00882	0.0355	0.00439	1
24	72	0.0488	0.196	0.0244	1
71	72	0.0446	0.18	0.02222	1
71	73	0.00866	0.0454	0.00589	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
70	74	0.0401	0.1323	0.01684	1
70	75	0.0428	0.141	0.018	1
1	75	0.0405	0.122	0.062	1
74	75	0.0123	0.0406	0.00517	1
76	77	0.0444	0.148	0.0184	1
1	77	0.0309	0.101	0.0519	1
75	77	0.0601	0.1999	0.02489	1
77	78	0.00376	0.0124	0.00632	1
78	79	0.00546	0.0244	0.00324	1
77	80	0.017	0.0485	0.0236	1
77	80	0.0294	0.105	0.0114	1
79	80	0.0156	0.0704	0.00935	1
68	81	0.00175	0.0202	0.404	1
81	80	0	0.037	0	0.935
77	82	0.0298	0.0853	0.04087	1
82	83	0.0112	0.03665	0.01898	1
83	84	0.0625	0.132	0.0129	1
83	85	0.043	0.148	0.0174	1
84	85	0.0302	0.0641	0.00617	1
85	86	0.035	0.123	0.0138	1
86	87	0.02828	0.2074	0.02225	1
85	88	0.02	0.102	0.0138	1
85	89	0.0239	0.173	0.0235	1
88	89	0.0139	0.0712	0.00967	1
89	90	0.0518	0.188	0.0264	1
89	90	0.0238	0.0997	0.053	1
90	91	0.0254	0.0836	0.0107	1
89	92	0.0099	0.0505	0.0274	1
89	92	0.0393	0.1581	0.0207	1
91	92	0.0387	0.1272	0.01634	1
92	93	0.0258	0.0848	0.0109	1
92	94	0.0481	0.158	0.0203	1
93	94	0.0223	0.0732	0.00938	1
94	95	0.0132	0.0434	0.00555	1
80	96	0.0356	0.182	0.0247	1
82	96	0.0162	0.053	0.0272	1
94	96	0.0269	0.0869	0.0115	1

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$
80	97	0.0183	0.0934	0.0127	1
80	98	0.0238	0.108	0.0143	1
80	99	0.0454	0.206	0.0273	1
92	100	0.0648	0.295	0.0236	1
94	100	0.0178	0.058	0.0302	1
95	96	0.0171	0.0547	0.00737	1
96	97	0.0173	0.0885	0.012	1
98	100	0.0397	0.179	0.0238	1
99	100	0.018	0.0813	0.0108	1
100	101	0.0277	0.1262	0.0164	1
92	102	0.0123	0.0559	0.00732	1
101	102	0.0246	0.112	0.0147	1
100	103	0.016	0.0525	0.0268	1
100	104	0.0451	0.204	0.02705	1
103	104	0.0466	0.1584	0.02035	1
103	105	0.0535	0.1625	0.0204	1
100	106	0.0605	0.229	0.031	1
104	105	0.00994	0.0378	0.00493	1
105	106	0.014	0.0547	0.00717	1
105	107	0.053	0.183	0.0236	1
105	108	0.0261	0.0703	0.00922	1
106	107	0.053	0.183	0.0236	1
108	109	0.0105	0.0288	0.0038	1
103	110	0.03906	0.1813	0.02305	1
109	110	0.0278	0.0762	0.0101	1
110	111	0.022	0.0755	0.01	1
110	112	0.0247	0.064	0.031	1
17	113	0.00913	0.0301	0.00384	1
32	113	0.0615	0.203	0.0259	1
32	114	0.0135	0.0612	0.00814	1
27	115	0.0164	0.0741	0.00986	1
114	115	0.0023	0.0104	0.00138	1
68	116	0.00034	0.00405	0.082	1
12	117	0.0329	0.14	0.0179	1
75	118	0.0145	0.0481	0.00599	1
76	118	0.0164	0.0544	0.00678	1

### A.0.8 Dados do sistema de 300 barras

Os diagramas unifilares do sistema de 300 barras podem ser vistos nas figuras A.7, A.8 e A.9.

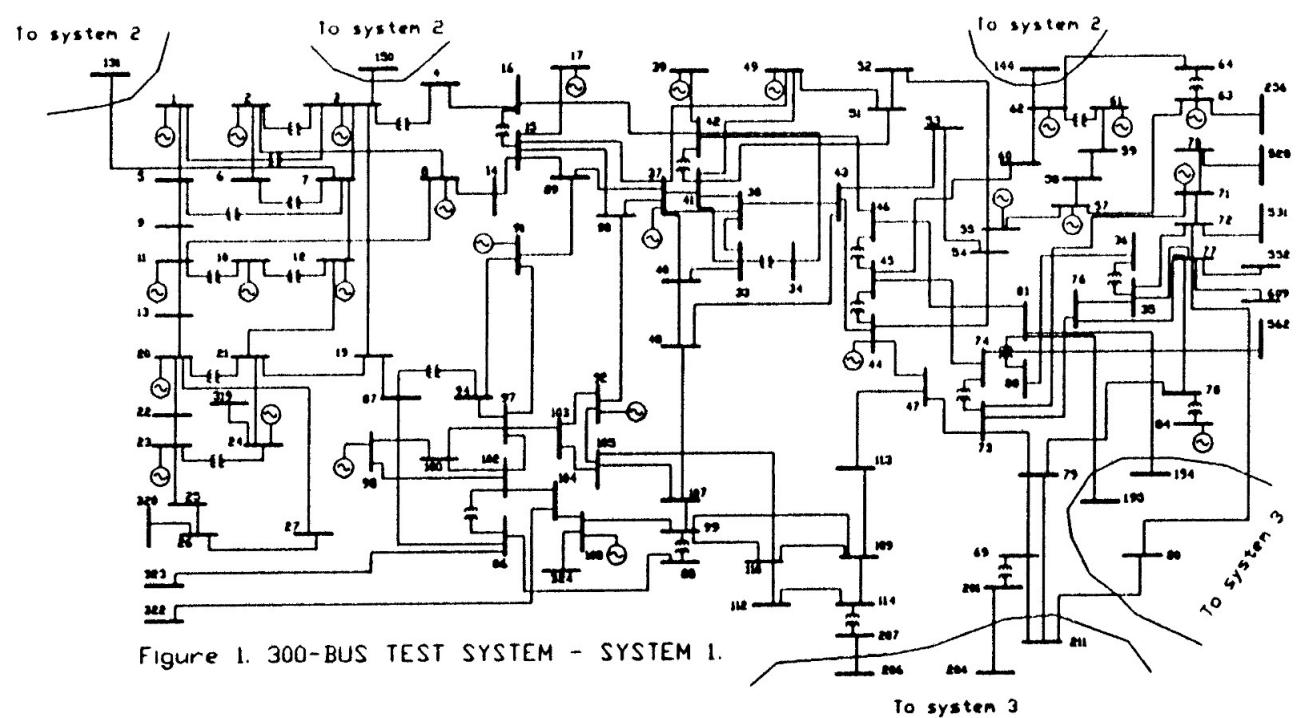


Figura A.7: Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 1

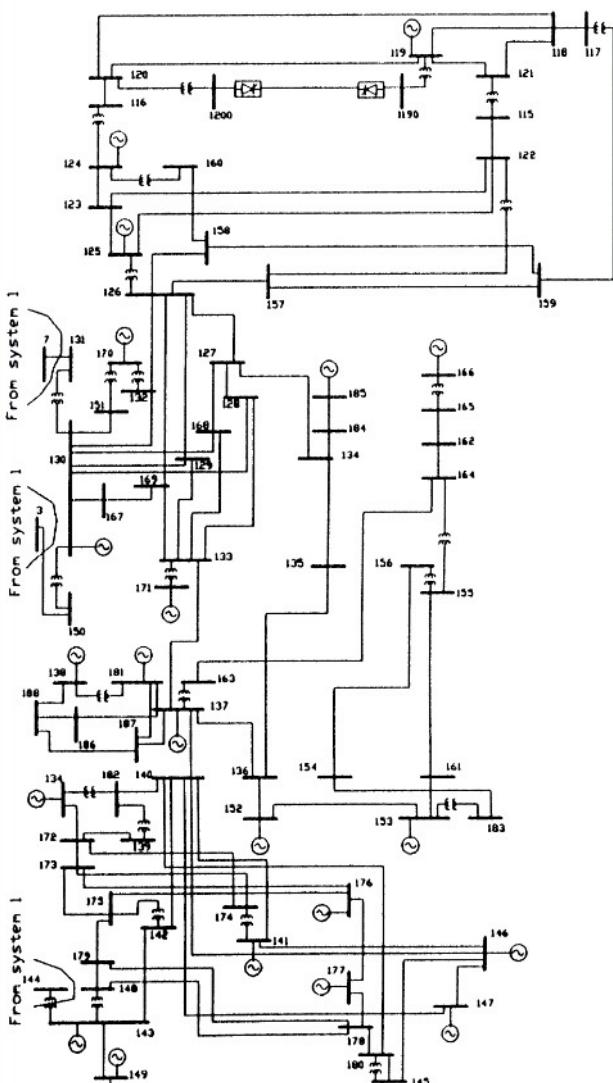


Figure 2. 300-BUS TEST SYSTEM - SYSTEM 2.

Figura A.8: Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 2

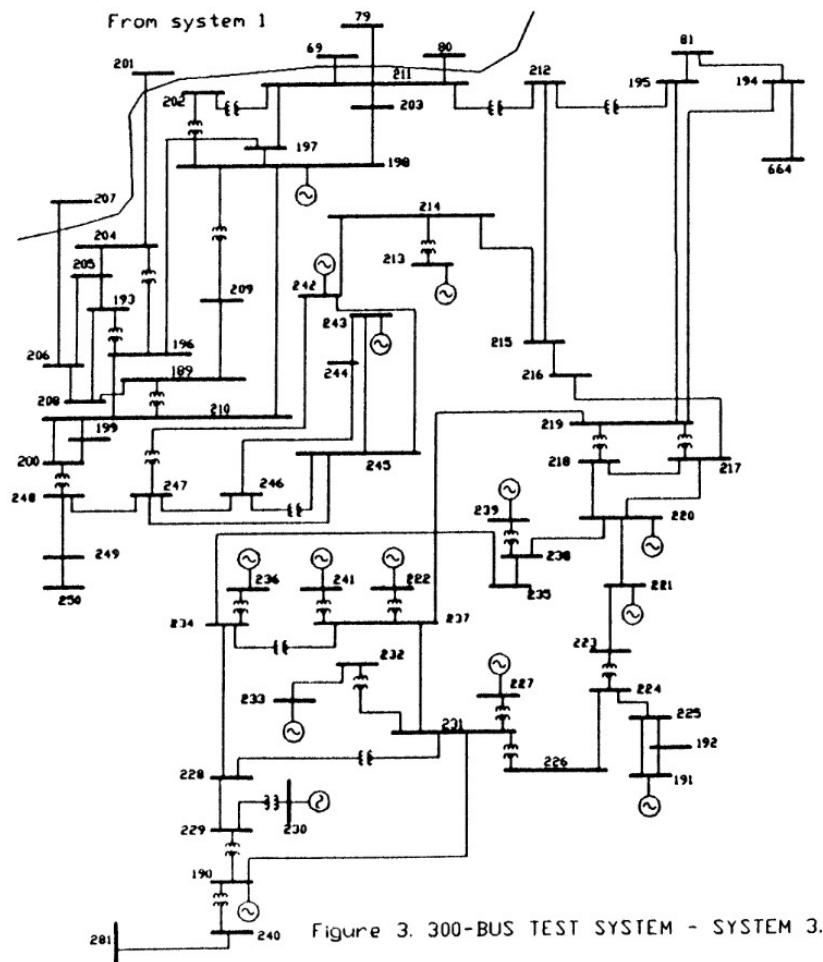


Figura A.9: Diagrama unifilar do sistema de 300 barras - Parte 3

Os dados iniciais do sistema de 300 barras podem ser vistos nas tabelas A.15 e A.16.

Tabela A.15: Dados das barras - Sistema 300 barras

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L(Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
7049	3	1.0507	0	0	0	46.42	0	0
2	0	1	0	56	15	0	0	0
3	0	1	0	20	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	353	130	0	0	0
6	0	1	0	120	41	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0
8	2	1.0153	0	58	14	-5	0	0
9	0	1	0	96	43	0	0	0
10	2	1.0205	0	148	33	-5	0	0
11	0	1	0	83	21	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
12	0	1	0	0	0	0	0	0
13	0	1	0	58	10	0	0	0
14	0	1	0	160	60	0	0	0
15	0	1	0	126.7	23	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0	0	0
17	0	1	0	561	220	0	0	0
19	0	1	0	0	0	0	0	0
20	2	1.001	0	595	120	-10	0	0
21	0	1	0	77	1	0	0	0
22	0	1	0	81	23	0	0	0
23	0	1	0	21	7	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0
25	0	1	0	45	12	0	0	0
26	0	1	0	28	9	0	0	0
27	0	1	0	69	13	0	0	0
33	0	1	0	55	6	0	0	0
34	0	1	0	0	0	0	0	0
35	0	1	0	0	0	0	0	0
36	0	1	0	0	0	0	0	0
37	0	1	0	85	32	0	0	0
38	0	1	0	155	18	0	0	0
39	0	1	0	0	0	0	0	0
40	0	1	0	46	-21	0	0	0
41	0	1	0	86	0	0	0	0
42	0	1	0	0	0	0	0	0
43	0	1	0	39	9	0	0	0
44	0	1	0	195	29	0	0	0
45	0	1	0	0	0	0	0	0
46	0	1	0	0	0	0	0	0
47	0	1	0	58	11.8	0	0	0
48	0	1	0	41	19	0	0	0
49	0	1	0	92	26	0	0	0
51	0	1	0	-5	5	0	0	0
52	0	1	0	61	28	0	0	0
53	0	1	0	69	3	0	0	0
54	0	1	0	10	1	0	0	0
55	0	1	0	22	10	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
57	0	1	0	98	20	0	0	0
58	0	1	0	14	1	0	0	0
59	0	1	0	218	106	0	0	0
60	0	1	0	0	0	0	0	0
61	0	1	0	227	110	0	0	0
62	0	1	0	0	0	0	0	0
63	2	0.9583	0	70	30	0	0	0
64	0	1	0	0	0	0	0	0
69	0	1	0	0	0	0	0	0
70	0	1	0	56	20	0	0	0
71	0	1	0	116	38	0	0	0
72	0	1	0	57	19	0	0	0
73	0	1	0	224	71	0	0	0
74	0	1	0	0	0	0	0	0
76	2	0.9632	0	208	107	0	0	0
77	0	1	0	74	28	0	0	0
78	0	1	0	0	0	0	0	0
79	0	1	0	48	14	0	0	0
80	0	1	0	28	7	0	0	0
81	0	1	0	0	0	0	0	0
84	2	1.025	0	37	13	375	0	0
85	0	1	0	0	0	0	0	0
86	0	1	0	0	0	0	0	0
87	0	1	0	0	0	0	0	0
88	0	1	0	0	0	0	0	0
89	0	1	0	44.2	0	0	0	0
90	0	1	0	66	0	0	0	0
91	2	1.052	0	17.4	0	155	0	0
92	2	1.052	0	15.8	0	290	0	0
94	0	1	0	60.3	0	0	0	0
97	0	1	0	39.9	0	0	0	0
98	2	1	0	66.7	0	68	0	0
99	0	1	0	83.5	0	0	0	0
100	0	1	0	0	0	0	0	0
102	0	1	0	77.8	0	0	0	0
103	0	1	0	32	0	0	0	0
104	0	1	0	8.6	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
105	0	1	0	49.6	0	0	0	0
107	0	1	0	4.6	0	0	0	0
108	2	0.99	0	112.1	0	117	0	0
109	0	1	0	30.7	0	0	0	0
110	0	1	0	63	0	0	0	0
112	0	1	0	19.6	0	0	0	0
113	0	1	0	26.2	0	0	0	0
114	0	1	0	18.2	0	0	0	0
115	0	1	0	0	0	0	0	0
116	0	1	0	0	0	0	0	0
117	0	1	0	0	0	0	0	3.25
118	0	1	0	14.1	650	0	0	0
119	2	1.0435	0	0	0	1930	0	0
120	0	1	0	777	215	0	0	0.55
121	0	1	0	535	55	0	0	0
122	0	1	0	229.1	11.8	0	0	0
123	0	1	0	78	1.4	0	0	0
124	2	1.0233	0	276.4	59.3	240	0	0
125	2	1.0103	0	514.8	82.7	0	0	0
126	0	1	0	57.9	5.1	0	0	0
127	0	1	0	380.8	37	0	0	0
128	0	1	0	0	0	0	0	0
129	0	1	0	0	0	0	0	0
130	0	1	0	0	0	0	0	0
131	0	1	0	0	0	0	0	0
132	0	1	0	0	0	0	0	0
133	0	1	0	0	0	0	0	0
134	0	1	0	0	0	0	0	0
135	0	1	0	169.2	41.6	0	0	0
136	0	1	0	55.2	18.2	0	0	0
137	0	1	0	273.6	99.8	0	0	0
138	2	1.055	0	826.7	135.2	-192.5	0	0
139	0	1	0	595	83.3	0	0	0
140	0	1	0	387.7	114.7	0	0	0
141	2	1.051	0	145	58	281	0	0
142	0	1	0	56.5	24.5	0	0	0
143	2	1.0435	0	89.5	35.5	696	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
144	0	1	0	0	0	0	0	0
145	0	1	0	24	14	0	0	0
146	2	1.0528	0	0	0	84	0	0
147	2	1.0528	0	0	0	217	0	0
148	0	1	0	63	25	0	0	0
149	2	1.0735	0	0	0	103	0	0
150	0	1	0	0	0	0	0	0
151	0	1	0	0	0	0	0	0
152	2	1.0535	0	17	9	372	0	0
153	2	1.0435	0	0	0	216	0	0
154	0	1	0	70	5	0	0	0.345
155	0	1	0	200	50	0	0	0
156	2	0.963	0	75	50	0	0	0
157	0	1	0	123.5	-24.3	0	0	0
158	0	1	0	0	0	0	0	0
159	0	1	0	33	16.5	0	0	0
160	0	1	0	0	0	0	0	0
161	0	1	0	35	15	0	0	0
162	0	1	0	85	24	0	0	0
163	0	1	0	0	0.4	0	0	0
164	0	1	0	0	0	0	0	-2.12
165	0	1	0	0	0	0	0	0
166	0	1	0	0	0	0	0	-1.03
167	0	1	0	299.9	95.7	0	0	0
168	0	1	0	0	0	0	0	0
169	0	1	0	0	0	0	0	0
170	2	0.929	0	481.8	205	205	0	0
171	2	0.9829	0	763.6	291.1	0	0	0
172	0	1	0	26.5	0	0	0	0
173	0	1	0	163.5	43	0	0	0.53
174	0	1	0	0	0	0	0	0
175	0	1	0	176	83	0	0	0
176	2	1.0522	0	5	4	228	0	0
177	2	1.0077	0	28	12	84	0	0
178	0	1	0	427.4	173.6	0	0	0
179	0	1	0	74	29	0	0	0.45
180	0	1	0	69.5	49.3	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
181	0	1	0	73.4	0	0	0	0
182	0	1	0	240.7	89	0	0	0
183	0	1	0	40	4	0	0	0
184	0	1	0	136.8	16.6	0	0	0
185	2	1.0522	0	0	0	200	0	0
186	2	1.065	0	59.8	24.3	1200	0	0
187	2	1.065	0	59.8	24.3	1200	0	0
188	0	1	0	182.6	43.6	0	0	0
189	0	1	0	7	2	0	0	0
190	2	1.0551	0	0	0	475	0	-1.5
191	2	1.0435	0	489	53	1973	0	0
192	0	1	0	800	72	0	0	0
193	0	1	0	0	0	0	0	0
194	0	1	0	0	0	0	0	0
195	0	1	0	0	0	0	0	0
196	0	1	0	10	3	0	0	0
197	0	1	0	43	14	0	0	0
198	2	1.015	0	64	21	424	0	0
199	0	1	0	35	12	0	0	0
200	0	1	0	27	12	0	0	0
201	0	1	0	41	14	0	0	0
202	0	1	0	38	13	0	0	0
203	0	1	0	42	14	0	0	0
204	0	1	0	72	24	0	0	0
205	0	1	0	0	-5	0	0	0
206	0	1	0	12	2	0	0	0
207	0	1	0	-21	-14.2	0	0	0
208	0	1	0	7	2	0	0	0
209	0	1	0	38	13	0	0	0
210	0	1	0	0	0	0	0	0
211	0	1	0	96	7	0	0	0
212	0	1	0	0	0	0	0	0
213	2	1.01	0	0	0	272	0	0
214	0	1	0	22	16	0	0	0
215	0	1	0	47	26	0	0	0
216	0	1	0	176	105	0	0	0
217	0	1	0	100	75	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L (Mvar)$	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
218	0	1	0	131	96	0	0	0
219	0	1	0	0	0	0	0	0
220	2	1.008	0	285	100	100	0	0
221	2	1	0	171	70	450	0	0
222	2	1.05	0	328	188	250	0	0
223	0	1	0	428	232	0	0	0
224	0	1	0	173	99	0	0	0
225	0	1	0	410	40	0	0	0
226	0	1	0	0	0	0	0	0
227	2	1	0	538	369	303	0	0
228	0	1	0	223	148	0	0	0
229	0	1	0	96	46	0	0	0
230	2	1.04	0	0	0	345	0	0
231	0	1	0	159	107	0	0	-3
232	0	1	0	448	143	0	0	0
233	2	1	0	404	212	300	0	0
234	0	1	0	572	244	0	0	0
235	0	1	0	269	157	0	0	0
236	2	1.0165	0	0	0	600	0	0
237	0	1	0	0	0	0	0	0
238	2	1.01	0	255	149	250	0	-1.5
239	2	1	0	0	0	550	0	0
240	0	1	0	0	0	0	0	-1.4
241	2	1.05	0	0	0	575.43	0	0
242	2	0.993	0	0	0	170	0	0
243	2	1.01	0	8	3	84	0	0
244	0	1	0	0	0	0	0	0
245	0	1	0	61	30	0	0	0
246	0	1	0	77	33	0	0	0
247	0	1	0	61	30	0	0	0
248	0	1	0	29	14	0	0	0.456
249	0	1	0	29	14	0	0	0
250	0	1	0	-23	-17	0	0	0
281	0	1	0	-33.1	-29.4	0	0	0
319	0	1	0	115.8	-24	0	0	0
320	0	1	0	2.4	-12.6	0	0	0
322	0	1	0	2.4	-3.9	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L$ (Mvar)	$P_G(MW)$	$Q_G(Mvar)$	$b_k^{sh}(p.u.)$
323	0	1	0	-14.9	26.5	0	0	0
324	0	1	0	24.7	-1.2	0	0	0
526	0	1	0	145.3	-34.9	0	0	0
528	0	1	0	28.1	-20.5	0	0	0
531	0	1	0	14	2.5	0	0	0
552	0	1	0	-11.1	-1.4	0	0	0
562	0	1	0	50.5	17.4	0	0	0
609	0	1	0	29.6	0.6	0	0	0
664	0	1	0	-113.7	76.7	0	0	0
1190	0	1	0	100.31	29.17	0	0	0
1200	0	1	0	-100	34.17	0	0	0
1201	0	1	0	0	0	0	0	0
2040	0	1	0	0	0	0	0	0
7001	2	1.0507	0	0	0	467	0	0
7002	2	1.0507	0	0	0	623	0	0
7003	2	1.0323	0	0	0	1210	0	0
7011	2	1.0145	0	0	0	234	0	0
7012	2	1.0507	0	0	0	372	0	0
7017	2	1.0507	0	0	0	330	0	0
7023	2	1.0507	0	0	0	185	0	0
7024	2	1.029	0	0	0	410	0	0
7039	2	1.05	0	0	0	500	0	0
7044	2	1.0145	0	0	0	37	0	0
1	0	1	0	90	49	0	0	0
7055	2	0.9967	0	0	0	45	0	0
7057	2	1.0212	0	0	0	165	0	0
7061	2	1.0145	0	0	0	400	0	0
7062	2	1.0017	0	0	0	400	0	0
7071	2	0.9893	0	0	0	116	0	0
7130	2	1.0507	0	0	0	1292	0	0
7139	2	1.0507	0	0	0	700	0	0
7166	2	1.0145	0	0	0	553	0	0
9001	0	1	0	0	0	0	0	0
9002	2	0.9945	0	0	0	-4.2	0	0
9003	0	1	0	2.71	0.94	0	0	0.024
9004	0	1	0	0.86	0.28	0	0	0
9005	0	1	0	0	0	0	0	0

Barra ( $k$ )	Tipo	$V(p.u.)$	$\theta(^{\circ})$	$P_L(MW)$	$Q_L(\text{Mvar})$	$P_G(MW)$	$Q_G(\text{Mvar})$	$b_k^{sh}(p.u.)$
9006	0	1	0	0	0	0	0	0
9007	0	1	0	0	0	0	0	0
9012	0	1	0	0	0	0	0	0
9021	0	1	0	4.75	1.56	0	0	0
9022	0	1	0	1.53	0.53	0	0	0
9023	0	1	0	0	0	0	0	0
9024	0	1	0	1.35	0.47	0	0	0
9025	0	1	0	0.45	0.16	0	0	0
9026	0	1	0	0.45	0.16	0	0	0
9031	0	1	0	1.84	0.64	0	0	0
9032	0	1	0	1.39	0.48	0	0	0
9033	0	1	0	1.89	0.65	0	0	0
9034	0	1	0	1.55	0.54	0	0	0.0172
9035	0	1	0	1.66	0.58	0	0	0
9036	0	1	0	3.03	1	0	0	0
9037	0	1	0	1.86	0.64	0	0	0
9038	0	1	0	2.58	0.89	0	0	0
9041	0	1	0	1.01	0.35	0	0	0
9042	0	1	0	0.81	0.28	0	0	0
9043	0	1	0	1.6	0.52	0	0	0
9044	0	1	0	0	0	0	0	0
9051	2	1	0	0	0	-35.81	0	0
9052	0	1	0	30	23	0	0	0
9053	2	1	0	0	0	-26.48	0	0
9054	2	1	0	0	0	50	0	0
9055	2	1	0	0	0	8	0	0
9071	0	1	0	1.02	0.35	0	0	0
9072	0	1	0	1.02	0.35	0	0	0
9121	0	1	0	3.8	1.25	0	0	0
9533	0	1	0	1.19	0.41	0	0	0

Tabela A.16: Dados das linhas - Sistema 300 barras

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
31	266	6e-05	0.00046	0	1.0082	0
266	270	0.0008	0.00348	0	1	0
266	271	0.02439	0.43682	0	0.9668	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
266	273	0.03624	0.64898	0	0.9796	0
270	292	0.01578	0.37486	0	1.0435	0
270	293	0.01578	0.37486	0	0.9391	0
270	294	0.01602	0.38046	0	1.0435	0
270	295	0	0.152	0	1.0435	0
270	296	0	0.8	0	1.0435	0
271	272	0.05558	0.24666	0	1	0
271	268	0.11118	0.49332	0	1	0
271	268	0.11118	0.49332	0	1	0
273	267	0.07622	0.43286	0	1	0
273	267	0.07622	0.43286	0	1	0
267	274	0.0537	0.07026	0	1	0
274	276	1.1068	0.95278	0	1	0
274	275	0.44364	2.8152	0	1	0
267	277	0.50748	3.2202	0	1	0
276	278	0.66688	3.944	0	1	0
276	279	0.6113	3.6152	0	1	0
272	297	0.4412	2.9668	0	1	0
272	298	0.30792	2.057	0	1	0
272	268	0.0558	0.24666	0	1	0
268	280	0.73633	4.6724	0	1	0
268	281	0.76978	4.8846	0	1	0
268	282	0.75732	4.8056	0	1	0
268	291	0.07378	0.06352	0	1	0
291	269	0.03832	0.02894	0	1	0
269	288	0.36614	2.456	0	1	0
269	289	1.0593	5.4536	0	1	0
269	290	0.1567	1.6994	0	1	0
268	283	0.13006	1.3912	0	1	0
268	284	0.54484	3.4572	0	1	0
268	285	0.15426	1.6729	0	1	0
268	286	0.3849	2.5712	0	1	0
268	287	0.4412	2.9668	0	1	0
273	299	0.23552	0.99036	0	1	0
294	300	0	0.75	0	0.9583	0
257	5	0.001	0.006	0	1	0
2	6	0.001	0.009	0	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
2	8	0.006	0.027	0.027	1	0
3	7	0	0.003	0	1	0
3	18	0.008	0.069	0.0695	1	0
3	129	0.001	0.007	0	1	0
4	16	0.002	0.019	0.5635	1	0
5	9	0.006	0.029	0.009	1	0
7	12	0.001	0.009	0.035	1	0
7	110	0.001	0.007	0.007	1	0
8	11	0.013	0.0595	0.0165	1	0
8	14	0.013	0.042	0.0405	1	0
9	11	0.006	0.027	0.0065	1	0
11	13	0.008	0.034	0.009	1	0
12	20	0.002	0.015	0.059	1	0
13	19	0.006	0.034	0.008	1	0
14	15	0.014	0.042	0.0485	1	0
15	31	0.065	0.248	0.0605	1	0
15	74	0.099	0.248	0.0175	1	0
15	75	0.096	0.363	0.024	1	0
16	36	0.002	0.022	0.64	1	0
18	20	0.002	0.018	0.018	1	0
18	72	0.013	0.08	0.0755	1	0
19	21	0.016	0.033	0.0075	1	0
19	26	0.069	0.186	0.049	1	0
20	23	0.004	0.034	0.14	1	0
21	22	0.052	0.111	0.025	1	0
22	24	0.019	0.039	0.009	1	0
23	231	0.007	0.068	0.067	1	0
24	25	0.036	0.071	0.017	1	0
25	26	0.045	0.12	0.0325	1	0
25	232	0.043	0.13	0.007	1	0
27	28	0	0.063	0	1	0
27	32	0.0025	0.012	0.0065	1	0
27	34	0.006	0.029	0.01	1	0
27	35	0.007	0.043	0.013	1	0
28	36	0.001	0.008	0.021	1	0
29	60	0.012	0.06	0.004	1	0
29	63	0.006	0.014	0.001	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
29	64	0.01	0.029	0.0015	1	0
30	73	0.004	0.027	0.0215	1	0
31	32	0.008	0.047	0.004	1	0
31	34	0.022	0.064	0.0035	1	0
31	35	0.01	0.036	0.01	1	0
31	43	0.017	0.081	0.024	1	0
31	74	0.102	0.254	0.0165	1	0
31	75	0.047	0.127	0.008	1	0
32	35	0.008	0.037	0.01	1	0
32	37	0.032	0.087	0.02	1	0
33	36	0.0006	0.0064	0.202	1	0
34	42	0.026	0.154	0.011	1	0
35	36	0	0.029	0	1	0
35	43	0.065	0.191	0.01	1	0
35	44	0.031	0.089	0.018	1	0
36	40	0.002	0.014	0.403	1	0
37	38	0.026	0.072	0.0175	1	0
37	42	0.095	0.262	0.016	1	0
37	46	0.013	0.039	0.008	1	0
38	41	0.027	0.084	0.0195	1	0
38	47	0.028	0.084	0.0185	1	0
39	52	0.007	0.041	0.156	1	0
39	62	0.009	0.054	0.2055	1	0
40	68	0.005	0.042	0.345	1	0
41	61	0.052	0.145	0.0365	1	0
41	92	0.043	0.118	0.0065	1	0
42	87	0.025	0.062	0.0035	1	0
43	44	0.031	0.094	0.0215	1	0
44	45	0.037	0.109	0.0245	1	0
45	48	0.027	0.08	0.018	1	0
46	47	0.025	0.073	0.0175	1	0
47	48	0.035	0.103	0.0235	1	0
48	49	0.065	0.169	0.041	1	0
49	50	0.046	0.08	0.018	1	0
49	55	0.159	0.537	0.0355	1	0
50	51	0.009	0.026	0.0025	1	0
51	53	0.002	0.013	0.0075	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
52	54	0.009	0.065	0.2425	1	0
54	56	0.016	0.105	0.1015	1	0
54	123	0.001	0.007	0.0065	1	0
55	236	0.0265	0.172	0.013	1	0
57	190	0.051	0.232	0.014	1	0
57	66	0.051	0.157	0.0115	1	0
58	59	0.032	0.1	0.031	1	0
58	237	0.02	0.1234	0.014	1	0
59	60	0.036	0.131	0.034	1	0
59	61	0.034	0.099	0.0235	1	0
60	64	0.018	0.087	0.0055	1	0
60	238	0.0256	0.193	0	1	0
61	63	0.021	0.057	0.015	1	0
61	66	0.018	0.052	0.009	1	0
62	73	0.004	0.027	0.025	1	0
62	240	0.0286	0.2013	0.1895	1	0
63	64	0.016	0.043	0.002	1	0
64	65	0.001	0.006	0.0035	1	0
64	67	0.014	0.07	0.019	1	0
64	239	0.0891	0.2676	0.0145	1	0
64	241	0.0782	0.2127	0.011	1	0
65	66	0.006	0.022	0.0055	1	0
65	69	0	0.036	0	1	0
66	190	0.099	0.375	0.0255	1	0
67	190	0.022	0.107	0.029	1	0
68	173	0.0035	0.033	0.265	1	0
68	174	0.0035	0.033	0.265	1	0
70	71	0.008	0.064	0.064	1	0
71	72	0.012	0.093	0.0915	1	0
71	234	0.006	0.048	0.046	1	0
74	76	0.047	0.119	0.007	1	0
75	77	0.032	0.174	0.012	1	0
76	78	0.1	0.253	0.0155	1	0
76	79	0.022	0.077	0.0195	1	0
77	84	0.019	0.144	0.0085	1	0
77	86	0.017	0.092	0.006	1	0
78	79	0.278	0.427	0.0215	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
79	82	0.022	0.053	0.0035	1	0
79	83	0.038	0.092	0.006	1	0
79	84	0.048	0.122	0.0075	1	0
80	82	0.024	0.064	0.0035	1	0
80	83	0.034	0.121	0.0075	1	0
81	87	0.053	0.135	0.0085	1	0
81	88	0.002	0.004	0.001	1	0
81	89	0.045	0.354	0.022	1	0
81	90	0.05	0.174	0.011	1	0
82	83	0.016	0.038	0.002	1	0
83	85	0.043	0.064	0.0135	1	0
84	86	0.019	0.062	0.004	1	0
85	88	0.076	0.13	0.022	1	0
85	233	0.044	0.124	0.0075	1	0
86	87	0.012	0.088	0.0055	1	0
86	90	0.157	0.4	0.0235	1	0
88	235	0.074	0.208	0.013	1	0
89	90	0.07	0.184	0.0105	1	0
89	92	0.1	0.274	0.0155	1	0
89	93	0.109	0.393	0.018	1	0
90	91	0.142	0.404	0.025	1	0
91	93	0.017	0.042	0.003	1	0
94	101	0.0036	0.0199	0.002	1	0
95	99	0.002	0.1049	0.0005	1	0
96	97	0.0001	0.0018	0.0085	1	0
97	98	0	0.0271	0	1	0
97	245	0	0.6163	0	1	0
245	99	0	-0.3697	0	1	0
97	100	0.0022	0.2915	0	1	0
98	99	0	0.0339	0	1	0
98	100	0	0.0582	0	1	0
101	102	0.0808	0.2344	0.0145	1	0
101	104	0.0965	0.3669	0.027	1	0
102	103	0.036	0.1076	0.0585	1	0
102	104	0.0476	0.1414	0.0745	1	0
104	105	0.0006	0.0197	0	1	0
105	106	0.0059	0.0405	0.125	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
105	108	0.0115	0.1106	0.0925	1	0
105	111	0.0198	0.1688	0.1605	1	0
105	136	0.005	0.05	0.165	1	0
105	137	0.0077	0.0538	0.1675	1	0
105	148	0.0165	0.1157	0.0855	1	0
106	107	0.0059	0.0577	0.0475	1	0
106	113	0.0049	0.0336	0.104	1	0
106	147	0.0059	0.0577	0.0475	1	0
107	109	0.0078	0.0773	0.063	1	0
107	112	0.0026	0.0193	0.015	1	0
108	109	0.0076	0.0752	0.061	1	0
108	112	0.0021	0.0186	0.015	1	0
109	111	0.0016	0.0164	0.013	1	0
109	130	0.0017	0.0165	0.013	1	0
109	146	0.0079	0.0793	0.0635	1	0
109	147	0.0078	0.0784	0.0625	1	0
112	116	0.0017	0.0117	0.1445	1	0
112	147	0.0026	0.0193	0.015	1	0
112	148	0.0021	0.0186	0.015	1	0
112	150	0.0002	0.0101	0	1	0
113	114	0.0043	0.0293	0.09	1	0
113	163	0.0039	0.0381	0.129	1	0
114	115	0.0091	0.0623	0.1925	1	0
115	116	0.0125	0.089	0.27	1	0
115	131	0.0056	0.039	0.4765	1	0
116	119	0.0015	0.0114	0.142	1	0
116	160	0.0005	0.0034	0.0105	1	0
116	165	0.0007	0.0151	0.063	1	0
116	167	0.0005	0.0034	0.0105	1	0
118	151	0.0562	0.2248	0.0405	1	0
119	120	0.012	0.0836	0.0615	1	0
119	121	0.0152	0.1132	0.342	1	0
119	124	0.0468	0.3369	0.2595	1	0
119	125	0.043	0.3031	0.2315	1	0
119	126	0.0489	0.3492	0.269	1	0
119	161	0.0013	0.0089	0.0595	1	0
120	125	0.0291	0.2267	0.171	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
121	122	0.006	0.057	0.3835	1	0
122	124	0.0075	0.0773	0.0595	1	0
122	128	0.0127	0.0909	0.0675	1	0
124	125	0.0085	0.0588	0.0435	1	0
124	128	0.0218	0.1511	0.1115	1	0
125	126	0.0073	0.0504	0.037	1	0
127	157	0.0523	0.1526	0.037	1	0
127	158	0.1371	0.3919	0.038	1	0
131	132	0.0137	0.0957	0.0705	1	0
132	140	0.0055	0.0288	0.095	1	0
133	135	0.1746	0.3161	0.02	1	0
133	162	0.0804	0.3054	0.0225	1	0
134	140	0.011	0.0568	0.194	1	0
136	138	0.0008	0.0098	0.0345	1	0
137	138	0.0029	0.0285	0.095	1	0
137	139	0.0066	0.0448	0.1385	1	0
141	143	0.0024	0.0326	0.118	1	0
141	144	0.0018	0.0245	0.831	1	0
142	143	0.0044	0.0514	1.7985	1	0
144	145	0.0002	0.0123	0	1	0
146	148	0.0018	0.0178	0.0145	1	0
151	152	0.0669	0.4843	0.0315	1	0
151	153	0.0558	0.221	0.0155	1	0
152	153	0.0807	0.3331	0.0245	1	0
152	154	0.0739	0.3071	0.0215	1	0
152	155	0.1799	0.5017	0.0345	1	0
154	155	0.0904	0.3626	0.024	1	0
154	158	0.077	0.3092	0.027	1	0
155	156	0.0251	0.0829	0.0235	1	0
156	157	0.0222	0.0847	0.025	1	0
157	158	0.0498	0.1855	0.0145	1	0
157	159	0.0061	0.029	0.042	1	0
160	117	0.0004	0.0202	0	1	0
160	166	0.0004	0.0083	0.0575	1	0
163	164	0.0025	0.0245	0.082	1	0
165	167	0.0007	0.0086	0.0575	1	0
166	167	0.0007	0.0086	0.0575	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
167	117	0.0004	0.0202	0	1	0
168	187	0.033	0.095	0	1	0
168	188	0.046	0.069	0	1	0
169	210	0.0004	0.0022	3.1	1	0
169	219	0	0.0275	0	1	0
170	171	0.003	0.048	0	1	0
171	204	0.002	0.009	0	1	0
172	184	0.045	0.063	0	1	0
172	187	0.048	0.127	0	1	0
173	198	0.0031	0.0286	0.25	1	0
173	242	0.0024	0.0355	0.18	1	0
174	198	0.0031	0.0286	0.25	1	0
175	176	0.014	0.04	0.002	1	0
175	189	0.03	0.081	0.005	1	0
176	177	0.01	0.06	0.0045	1	0
176	190	0.015	0.04	0.003	1	0
177	181	0.332	0.688	0	1	0
177	182	0.009	0.046	0.0125	1	0
177	189	0.02	0.073	0.004	1	0
177	190	0.034	0.109	0.016	1	0
178	179	0.076	0.135	0.0045	1	0
178	189	0.04	0.102	0.0025	1	0
179	189	0.081	0.128	0.007	1	0
180	183	0.124	0.183	0	1	0
182	190	0.01	0.059	0.004	1	0
183	184	0.046	0.068	0	1	0
184	185	0.302	0.446	0	1	0
185	186	0.073	0.093	0	1	0
185	187	0.24	0.421	0	1	0
191	194	0.0139	0.0778	0.043	1	0
192	193	0.0025	0.038	0	1	0
193	194	0.0017	0.0185	0.01	1	0
193	221	0.0015	0.0108	0.001	1	0
194	195	0.0045	0.0249	0.013	1	0
195	196	0.004	0.0497	0.009	1	0
196	197	0	0.0456	0	1	0
196	198	0.0005	0.0177	0.01	1	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
196	199	0.0027	0.0395	0.416	1	0
198	216	0.0003	0.0018	2.6	1	0
199	197	0.0037	0.0484	0.215	1	0
199	200	0.001	0.0295	0.2515	1	0
199	217	0.0016	0.0046	0.201	1	0
200	202	0.0003	0.0013	0.5	1	0
201	216	0.0014	0.0514	0.165	1	0
203	204	0.01	0.064	0.24	1	0
203	205	0.0019	0.0081	0.43	1	0
204	170	0.001	0.061	0	1	0
205	210	0.0005	0.0212	0	1	0
206	210	0.0009	0.0472	0.093	1	0
207	208	0.0019	0.0087	0.64	1	0
207	210	0.0026	0.0917	0	1	0
207	213	0.0013	0.0288	0.405	1	0
208	169	0	0.0626	0	1	0
210	211	0.0002	0.0069	0.682	1	0
210	216	0.0001	0.0006	1.785	1	0
211	212	0.0017	0.0485	0	1	0
213	214	0.0002	0.0259	0.072	1	0
213	216	0.0006	0.0272	0	1	0
214	217	0.0002	0.0006	0.4	1	0
220	216	0.0005	0.0154	0	1	0
219	230	0.0003	0.0043	0.0045	1	0
221	224	0.0082	0.0851	0	1	0
221	226	0.0112	0.0723	0	1	0
222	223	0.0127	0.0355	0	1	0
222	224	0.0326	0.1804	0	1	0
223	225	0.0195	0.0551	0	1	0
224	225	0.0157	0.0732	0	1	0
224	226	0.036	0.2119	0	1	0
225	226	0.0268	0.1285	0	1	0
226	227	0.0428	0.1215	0	1	0
227	228	0.0351	0.1004	0	1	0
228	229	0.0616	0.1857	0	1	0
3	257	0	0.052	0	0.947	0
3	2	0	0.052	0	0.956	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
3	4	0	0.005	0	0.971	0
7	5	0	0.039	0	0.948	0
7	6	0	0.039	0	0.959	0
10	11	0	0.089	0	1.046	0
12	10	0	0.053	0	0.985	0
15	17	0.0194	0.0311	0	0.9561	0
16	15	0.001	0.038	0	0.971	0
20	19	0	0.014	0	0.952	0
23	22	0	0.064	0	0.943	0
30	29	0	0.047	0	1.01	0
39	38	0	0.02	0	1.008	0
39	40	0	0.021	0	1	0
54	53	0	0.059	0	0.975	0
55	56	0	0.038	0	1.017	0
61	62	0	0.0244	0	1	0
68	73	0	0.02	0	1	0
70	81	0	0.048	0	1	0
71	83	0	0.048	0	1	0
72	78	0	0.046	0	1.015	0
93	186	0	0.149	0	0.967	0
95	103	0.0052	0.0174	0	1.01	0
100	94	0	0.028	0	1.05	0
101	136	0.0005	0.0195	0	1	0
109	110	0	0.018	0	1.0522	0
109	129	0	0.014	0	1.0522	0
111	149	0.001	0.0402	0	1.05	0
120	153	0.0024	0.0603	0	0.975	0
121	154	0.0024	0.0498	-0.0435	1	0
122	123	0	0.0833	0	1.035	0
122	127	0.0013	0.0371	0	0.9565	0
124	159	0.0005	0.0182	0	1	0
130	149	0.001	0.0392	0	1.05	0
132	162	0.0027	0.0639	0	1.073	0
134	135	0.0008	0.0256	0	1.05	0
138	96	0	0.016	0	1.0506	0
139	103	0.0012	0.0396	0	0.975	0
142	116	0.0013	0.0384	-0.0285	0.98	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
143	134	0.0009	0.0231	-0.0165	0.956	0
161	118	0.0003	0.0131	0	1.05	0
168	189	0	0.252	0	1.03	0
172	175	0	0.237	0	1.03	0
174	191	0.0008	0.0366	0	0.985	0
179	227	0	0.22	0	1	0
180	57	0	0.098	0	1.03	0
181	190	0	0.128	0	1.01	0
183	246	0.02	0.204	-0.006	1.05	0
188	177	0.026	0.211	0	1.03	0
190	191	0.003	0.0122	0	1	0
197	198	0.001	0.0354	-0.005	0.97	0
202	203	0.0012	0.0195	-0.182	1	0
208	209	0.001	0.0332	0	1.02	0
213	215	0.0005	0.016	0	1.07	0
217	218	0.0005	0.016	0	1.02	0
175	246	0.0001	0.02	0	1	-11.40
98	243	0.001	0.023	0	1.0223	0
99	244	0	0.023	0	0.9284	0
248	2	0.001	0.0146	0	1	0
249	3	0	0.01054	0	1	0
260	53	0	0.0238	0	1	0
261	54	0	0.03214	0	0.95	0
265	145	0	0.0154	0	1	0
254	23	0	0.0289	0	1	0
247	257	0	0.01953	0	1	0
263	109	0	0.0193	0	1	0
250	11	0	0.01923	0	1	0
253	22	0	0.023	0	1	0
1	43	0	0.0124	0	1	0
264	118	0	0.0167	0	1	0
251	12	0	0.0312	0	1	0
252	17	0	0.01654	0	0.942	0
255	33	0	0.03159	0	0.965	0
259	49	0	0.05347	0	0.95	0
256	38	0	0.18181	0	0.942	0
258	48	0	0.19607	0	0.942	0

$k$	$m$	$r(p.u.)$	$x(p.u.)$	$b_{km}^{sh}(p.u.)$	$tap$	$\phi(^{\circ})$
262	59	0	0.06896	0	0.9565	0

## Apêndice B

### Artigo SpliTech 2021

Este anexo traz a impressão do artigo submetido ao *6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies 2021* (SpliTech 2021) intitulado *A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow*. Esse congresso será de 8 a 11 de setembro de 2021 em Split e Bol (ilha de Brac), Croácia.

# A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow

Enza R. de Sampaio Ferreira  
*Departamento de Computação  
Universidade Federal do Piauí  
Teresina, Brazil  
enzasampaiof@hotmail.com*

Rafael M. Barros  
*Departamento de Computação  
Universidade Federal do Piauí  
Teresina, Brazil  
rfebarros@ufpi.edu.br*

Joaquim M. Gaspar  
*Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de São Carlos  
São Carlos, Brazil  
joaquimminarelligaspar@estudante.ufscar.br*

Guilherme G. Lage  
*Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de São Carlos  
São Carlos, Brazil  
glage@ufscar.br*

Ricardo A. L. Rabelo  
*Departamento de Computação  
Universidade Federal do Piauí  
Teresina, Brazil  
ricardoalr@ufpi.edu.br*

**Abstract**—Given the recent progresses in designing and implementing electricity market optimization-based tools to support power allocations that bridge the gap between supply and demand, the realistic modeling of optimal power flow-based auction systems provide transparent and higher transaction levels among market players, as well as more accurate locational marginal prices. Nevertheless, actual voltage stability/security representation in these auction systems remains an open question. Thus, this paper proposes a two-stage resolution framework for a nonlinear Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF)-based auction system. The first stage of the proposed framework consists in solving a single-period two-sided VSCOPF-based auction system model by a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which adjusts active power allocations and generator voltage magnitudes while verifying if the grid's technical-operational constraints are satisfied by power flow calculations. The system voltage stability/security is addressed in the second stage by a maximal loading problem solved by the Continuation Power Flow method. Then, if a minimal voltage stability/security margin condition is not satisfied, active power allocations and generator voltage magnitudes are readjusted by the PSO to comply with stable/secure power allocations. Results with a 6-bus test-system are presented to illustrate this proposal and, therefore, show the effectiveness of proposing a two-stage resolution framework for VSCOPF-based auction systems.

**Index Terms**—auction system, continuation power flow, optimal power flow, particle swarm optimization, voltage stability/security

## I. INTRODUCTION

The power sector has experienced major changes due to its process of deregulation around the world, and these changes are reflected in the design and mathematical modeling of electricity markets [1]–[3]. Auctions have been formally introduced in this sector as a transparent mechanism to attain

fair, open, timely and competitive procurement processes as such a deregulation is implemented [4].

In addition to fostering competition in the electricity sector among market players (producers and purchasers), electricity auctions for energy procurement allow for efficient and cost-effective power dispatch [5]. In this context, the use of Optimal Power Flow (OPF)-based tools have become of utmost importance, ensuring power balance and that technical, operational and voltage stability/security limits are fulfilled. However, the proper representation of voltage stability/security in such auction models is still an open question [6].

In [7], voltage stability/security constraints in a single-period OPF-based auction system for short-term energy procurement in hybrid electricity markets are modeled based on a artificial neural network functional approximation of the voltage stability/security boundaries; this approach demands the calculation of maximal loading points in the voltage stability/security boundary for training and validating of the artificial neural network, which demands a high computational effort. [8] and [6] propose voltage stability representation by means of voltage stability indices, namely the minimum singular value of the power system Jacobian and the tangent vector norm of Power Flow (PF) solution manifold, respectively, in a Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF) auction system for the short-term energy procurement in hybrid markets; however, such indices are difficult to predict given their nonlinear profile and assigning a general critical value to ensure minimal stability margins is too conservative and potentially lead to inappropriate price signals.

Many optimization techniques have been applied to solve

Optimal Power Flow (OPF) problems and can be divided into two groups: mathematical programming techniques and metaheuristics. Mathematical programming techniques are deterministic and usually use derivatives to determine the search direction to achieve the local optima. However, OPF consists of a class of large nonlinear and non-convex optimization problems in which more than one local optimum may exist. Furthermore, it is pointed out that the non-convex feasible region may still be disconnected [9]. Consequently, the use of stochastic methods that employ probabilistic rules to potentially achieve the global solution of optimization problems, namely metaheuristics, has gained popularity in order to overcome the limitations imposed by the inherent characteristics of OPFs to mathematical programming techniques. Among these metaheuristics, Particle Swarm Optimization (PSO) has shown good performance to solve OPF problems [10], [11], and it is used to address many complex optimization problems that are nonlinear, non-differentiable, and multimodal. One of its main advantages is the noticeable high convergence rate [12]–[14].

Therefore, the objective of this work is to propose a two-stage resolution framework for a nonlinear Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF)-based auction system. The first stage of the proposed framework consists in solving a single-period two-sided VSCOPF-based auction system model by a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which adjusts active power allocations and generator voltage magnitudes while verifying if the grid's technical -operational constraints are satisfied by power flow calculations. The system voltage stability/security is addressed in the second stage by a maximal loading problem solved by the Continuation Power Flow (CPF) method. Then, if a minimal voltage stability/security margin condition is not satisfied, active power allocations and generator voltage magnitudes are readjusted by the PSO to comply with stable/secure power allocations. Results with a 6-bus test-system are presented to illustrate this proposal and, therefore, show the effectiveness of proposing a two-stage resolution framework for VSCOPF-based auction systems.

The remainder of this work is organized as follows. Section II presents the modeling of the VSCOPF auction system and the system of algebraic equations and inequations from which the maximal loading is determined by the CPF. Section III features the two-stage proposed framework to solve such a VSCOPF. In Section IV, the numerical results for a 6-bus test-system are presented to validate our proposal. At last, the main conclusions of this work are highlighted in Section V.

## II. VSCOPF AUCTION SYSTEM MODELING

The modeling of the VSCOPF auction system and the system of algebraic equations and inequations from which the maximal loading is determined are presented below.

### A. VSCOPF-Based Auction System

The VSCOPF-based auction system considered in this paper aims at maximizing the social welfare, so that producers maximize their income from the allocation of supply bid blocks

while purchasers minimize the prices paid for their allocated demand bid blocks, subject to power balance, supply and demand bid limits and technical, operational and voltage stability/security constraints. Power system voltage stability/security is ensured by a constraint based on an implicit function that represents the maximal loading problem and takes as its argument the allocated bid blocks and voltage magnitudes in generation buses. Thus, considering a transmission grid with  $n_B$  buses and  $n_T$  transmission branches, the single-period two-sided VSCOPF auction system is formulated as:

$$\max_{P_S, P_D, Q_G, \delta, V} C_D^T P_D - C_S^T P_S \quad (1a)$$

$$\text{s.t:} \quad \Delta P(P_S, P_D, \delta, V) = 0, \quad (1b)$$

$$\Delta Q(P_D, Q_G, \delta, V) = 0, \quad (1c)$$

$$P_S^{\min} \leq P_S \leq P_S^{\max}, \quad (1d)$$

$$P_D^{\min} \leq P_D \leq P_D^{\max}, \quad (1e)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max}, \quad (1f)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}, \quad (1g)$$

$$\sigma(P_S, P_D, V_G) > 1, \quad (1h)$$

where  $P_S \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  is the nonnegative vector of supply power bid blocks in per unit (p.u.), with  $P_S^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $P_S^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  representing the lower and upper supply bid blocks limits, respectively;  $P_D \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  is the nonnegative vector of demand power bid blocks in p.u., with lower and upper limits given, respectively, by  $P_D^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $P_D^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$ ;  $Q_G \in \mathcal{R}^{n_B}$  is the vector of reactive power generation in p.u., with limits given by  $Q_G^{\min} \in \mathcal{R}^{n_B}$  and  $Q_G^{\max} \in \mathcal{R}^{n_B}$ ;  $\delta \in \mathcal{R}^{n_B}$  is the vector of voltage phase angles in radians (for the slack bus is set to 0 rad.);  $V \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  is the vector of voltage magnitudes in p.u. with limits given by  $V^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $V^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$ , where  $V_G \subset V$  is the vector of voltage magnitudes on generation buses and  $V_L \subset V$  is the vector of voltage magnitudes on load buses;  $C_S \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $C_D \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  are, respectively, the vectors of supply and demand price bids in \$/MWh;  $\Delta P : \mathcal{R}_+^{4n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $\Delta Q : \mathcal{R}_+^{4n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  are the vectors of active and reactive power balance, respectively;  $\sigma : \mathcal{R}^{3n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+$  is an adimensional implicit function defined in terms of  $P_S$ ,  $P_D$  and  $V_G$  that represents the power system critical loading associated with voltage stability/security boundaries and imposes that supply and demand acceptance blocks allow minimum levels of security.

In Equation (1b) and Equation (1c), the active and reactive power balances in bus  $k \in B$ , where  $B$  is the set of all system buses, are:

$$\Delta P_k = P_{G_k} + P_{S_k} - (P_{L_k} + P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} P_{km}(\delta, V), \quad (2)$$

$$\Delta Q_k = Q_{G_k} + (Q_{L_k} + K_{L_k} P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} Q_{km}(\delta, V), \quad (3)$$

where  $P_G \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  represents the active power outputs of must-run generators in p.u. and, therefore, does not participate in

market bidding;  $P_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  and  $Q_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  are the inelastic active and reactive loads in p.u. and do not take part in the market bidding;  $K_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  is a vector of adimensional parameters used to model the increase in reactive load in terms of  $P_D$  to maintain a constant power factor;  $\mathcal{K}$  is the set of buses indexes connected to the  $k \in B$  bus plus the  $k$  bus itself; and  $P_{km}$  and  $Q_{km}$  are the active and reactive power flows through transmission branch  $\{k, m\} \in T$ , where  $T$  is the ordered set of bus index pairs representing a transmission line or a transformer connecting one bus to another, given by:

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}), \quad (4)$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \delta_{km} - B_{km} \cos \delta_{km}), \quad (5)$$

where  $G_{km}$  and  $B_{km}$ , are respectively the real and imaginary parts of the element  $Y_{km}$  in the bus admittance matrix; and  $\delta_{km} = \delta_k - \delta_m$ .

In (1), the objective function (1a) is the social welfare. Constraints (1b) and (1c) are the PF equations. Constraints (1d) and (1e) limits the accepted power supply and demand bid blocks. Constraint (1f) denotes the limits of reactive power generation. Constraint (1g) limits the voltage magnitudes in all buses. At last, constraint (1h) is the voltage stability/security constraint defined by an implicit function of  $P_S$ ,  $P_D$  and  $V_G$ . This function represents the system maximal loading level with allocated supply and demand bid blocks and ensure that the accepted bid blocks allow minimal stability/security margins. The problem formulation to determine such a loading level is presented in the following.

### B. Power System Maximal Loading Problem

The voltage-stability/security constraint (1h) is an implicit function in terms of  $P_S$ ,  $P_D$  and  $V_G$ , which associates the system loading level with the state of the system at that point. It claims that the maximal (critical) loading  $\sigma$  must be bigger than 1, imposing that supply and demand blocks allow minimum levels of stability/security. The maximal loading is, thus, determined by the CPF, which consists in successively solving the following algebraic system of equations and inequations in a parameterized fashion (since, for  $n$  equalities, there are  $n + 1$  variables) [15]:

$$\Delta P^c(P_S, P_D, \sigma, K_G, \delta^c, V^c) = 0, \quad (6a)$$

$$\Delta Q^c(P_D, \sigma, Q_G^c, \delta^c, V^c) = 0, \quad (6b)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G^c \leq Q_G^{\max}, \quad (6c)$$

$$V^{\min} \leq V^c \leq V^{\max}, \quad (6d)$$

$$I^c(\delta^c, V^c) \leq I^{\max}, \quad (6e)$$

where the superscript  $c$  is used to differentiate functions and dependent variables in the auction system VSCOPF (1) from those in maximal loading problem (6);  $K_G$  is an adimensional scalar used to represent a distributed slack bus (it is assumed that the active power losses in the load flow calculation

are distributed among all generators in proportion to their respective power injections);  $I : \mathcal{R}^{2n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  is the vector of current line magnitude in p.u. in transmission branches, whose limits are given by  $I^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_T}$  in p.u. (thermal limits); and  $P_S$ ,  $P_D$  and  $V_G$  are the parameters in (6) determined in the VSCOPF auction system (1).

The maximal (critical) loading point in (6) is associated to the voltage magnitude, thermal and voltage stability limits.

In Equation (6a) and Equation (6b), respectively, the active and reactive power balances for the  $k \in B$  bus are:

$$\begin{aligned} \Delta P_k^c = & (\sigma + K_G)(P_{G_k} + P_{S_k}) - \sigma(P_{L_k} + P_{D_k}) - \\ & \sum_{m \in \mathcal{K}} P_{km}(\delta^c, V^c) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_k^c = & Q_{G_k}^c - \sigma(Q_{L_k} + K_{L_k} P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} Q_{km}(\delta^c, V^c) \end{aligned} \quad (8)$$

### III. PROPOSED APPROACH

This section presents the proposed two-stage framework to solve the proposed VSCOPF-based auction system by a PSO algorithm and the maximal loading problem by the CPF method. Furthermore, the proposed approach flowchart is summarized in Figs. 1 and 2.

#### A. Particle Swarm Optimization

The PSO is a population-based search method, in which there is a simulation of the social behavior of birds within a flock [16]. In it, individuals designated as particles follow a very simple behavior: imitating the success of neighboring individuals and their own successes, where each particle represents a potential solution [17]. It is initialized with a random group of particles and they move to seek the ideal position with the best solution for the objective function.

In the solution space, each particle occupies a given position and moves at a certain speed, using its own experience, in addition to the experience of all particles. This new position is a random combination of its previous speed and the current position, where, in each iteration, the position of each particle is updated by the best fitness value, namely  $P_{best}$ . Among these  $P_{best}$ , each particle knows the best value in the group, namely  $G_{best}$  [18], [19]. After a certain number of iterations, search points are expected to reach the global optimum.

The updated speed and position of the particles are determined according to (9) and (10):

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} = & W * V_i^k + c_1 * rand_1 * (P_{best_i} - X_i^k) \\ & + c_2 * rand_2 * (G_{best_i} - X_i^k) \end{aligned} \quad (9)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (10)$$

where  $V_i^k$  is the current velocity of particle  $i$  in iteration  $k$ ;  $V_i^{k+1}$  is the updated particle speed in iteration  $k + 1$ ;  $W$  is the weight of inertia and it is used to control the impact of the

previous speed story,  $rand_1$  and  $rand_2$  are random numbers between 0 and 1;  $P_{best,i}$  is the best value found by particle  $i$  up to iteration  $k$ ,  $G_{best,i}$  is the best particle  $i$  found in the group up to iteration  $k$ ;  $X_i^k$  is the current position of particle  $i$  in iteration  $k + 1$ ;  $X_i^{k+1}$  is the current position (modified search point) of particle  $i$  in iteration  $k + 1$ ;  $c_1$  and  $c_2$  are acceleration constants and represent the weighting factors of the acceleration terms that pull each particle to positions  $P_{best}$  and  $G_{best}$ .

### B. Continuation Power Flow

The CPF is an algorithm based on the successive resolution of the PF problem reformulated to include the loading parameter  $\sigma$  as in (2) and (3). With the addition of this parameter, the PF equations are solved in a parameterized fashion as a function of the increase of the loading parameter [15].

Thus, it is possible to find the maximal (critical) loading point ( $\sigma$ ), which characterizes the voltage collapse point. At this point, the stable and unstable equilibrium points merge, and this merging is mathematically represented by a bifurcation (either a saddle-node or a limit-induced bifurcation). From that point on, the set of the PF equations no longer has solutions [15].

The advantage of using the CPF over direct methods (optimization-based) as a way to determined the maximal loading is, besides being based on standard PF algorithms, to obtain additional information regarding the PF solution manifold accounting for technical and operational limits towards the maximal point.

### C. Approach Operation

The proposed framework is introduced in this subsection. First, the PSO is deployed to solve the VSCOPF and obtain the values for its decision variables that will, in the next stage, be used as parameters in the maximum loading problem. Fig. 1 describes the steps for solving the VSCOPF-based auction system.

In the first four steps, the PSO parameters are provided to solve the auction system and obtain the supply and demand bid allocations and the voltage magnitude in generation buses. Then, the PF is calculated to determine the social welfare. Thus, it is obtained the vectors of all dependent and independent variables and, therefore, the state associated with the best fitness is determined.

The Fig. 2 describes the maximal loading problem solved by the CPF method.

After obtaining the results from the VSCOPF-based auction system by the PSO algorithm, the vector with the best fitness is used as parameter in the maximal loading problem. Then, the critical loading value is determined by the CPF method. If a minimal voltage stability/security margin condition is not satisfied, active power allocations and generator voltage magnitudes are readjusted in another round of execution of the first stage to comply with stable/secure power allocations. This process continues while any constraint in the VSCOPF-based auction system is not met.

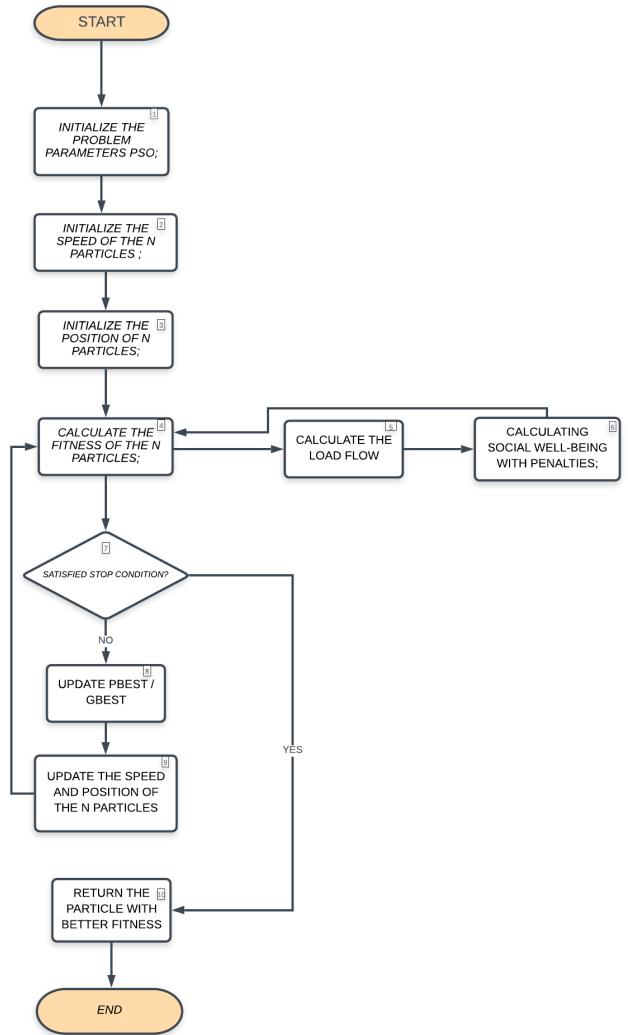


Fig. 1. Operation of the Proposed Approach of the PSO Auction System.

## IV. EXPERIMENTS AND RESULTS

This section presents numerical results and discussions to validate the proposed VSCOPF-based auction system and the CPF by means of a 6-bus test-system, where the bus, branch and security data are presented in [5].

### A. Case Study

In this case study, the proposed framework is deployed to analyze active power allocations by VSCOPF-based auction system when the voltage stability/security boundary is defined by the binding lower voltage magnitude limit in bus 5. In this analysis, the power base  $S^{base}$  is 100 MVA, the voltage base  $V^{base}$  is 500 kV and the upper and lower limits of voltage magnitudes are 0.90 p.u. and 1.10 p.u., respectively.

The parameters of the PSO in this analysis are: number of particles ( $n = 70$ ), weight of linearly decreasing inertia ( $w_0 = 1.0$  and  $w_f = 0.4$ ), cognitive acceleration component and social acceleration component ( $c_1 = 2.0$  and  $c_2 = 2.0$ ),

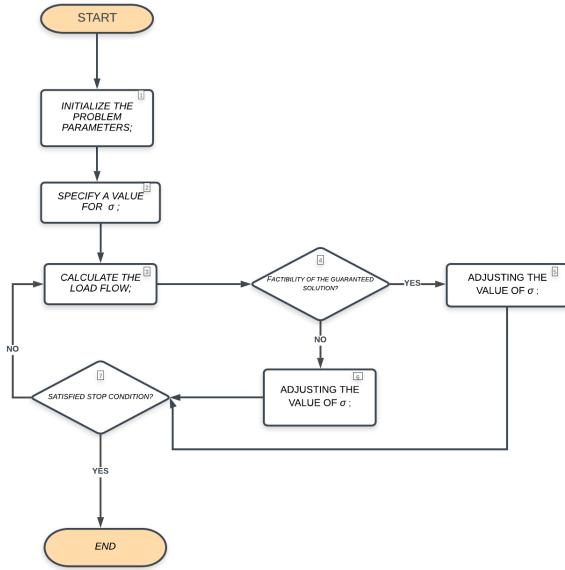


Fig. 2. Operation of the Proposed Continuation Power Flow Approach.

number of executions (30), error tolerance for the fitness function ( $10^4$ ), number of iterations and network star topology. The parameters of the CPF in this analysis are: error tolerance for PF convergence ( $10^{-6}$ ).

The statistical analyses that are performed are: calculation of the average of the executions for the objective function and decision variables, calculation of the mode for the values of the objective function and calculation of the standard deviation of the values of the objective function.

The results below are compared to the ones in [8]. Table I shows the results of the best solution for the applied metaheuristic and the above mentioned parameter settings.

TABLE I  
RESULT OF THE BEST SOLUTION FOR THE STUDY CASE

Participant[k]	$P_S$ [MW]	$P_D$ [MW]	$V$ [p.u.]	$Q_G$ [MVar]
1	0.000000	-	1.100000	44.7849
2	25.000000	-	1.100000	77.2048
3	20.000000	-	1.100000	73.9445
4	-	25.000000	1.021081	-
5	-	10.000000	1.012586	-
6	-	8.124160	1.038778	-
Social Welfare [\$]:122.1795240452				

Fig. 3 shows how random start particles converge towards the best solution, reaching a point of stagnation where all particles remain at that point.

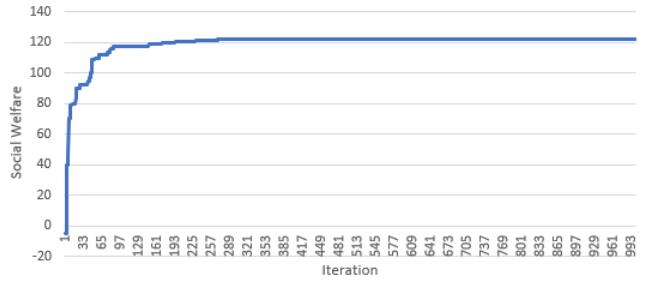


Fig. 3. Best Solution with PSO.

Fig. 4 presents the evaluation of executions. Notice that the standard deviation reaches zero when the particles converge to the same solution.

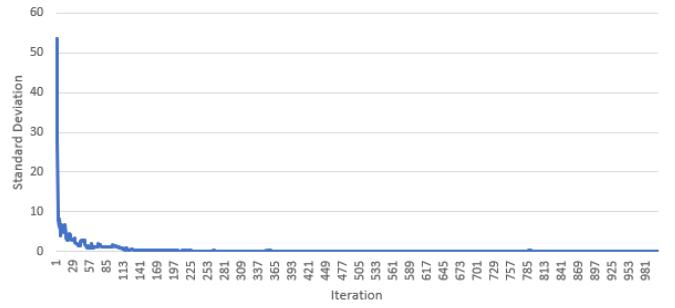


Fig. 4. Statistical Analysis of the Standard Deviation of Executions.

Fig. 5 features the average of the evaluations, showing that the particles always tend to converge to the best solution, following the behavior of their neighbors.

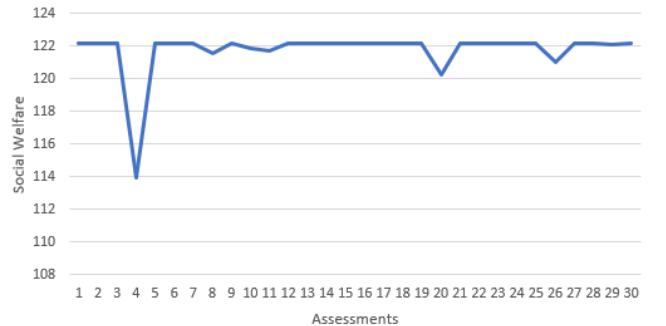


Fig. 5. Statistical Analysis of Average Executions.

In the best solution,  $\sigma = 1.66885$ , and it is possible to observe that bus 5 reached its lower voltage magnitude limit (0.90 p.u.), characterizing the maximal loading. The system state at the maximal loading is shown in Table II, and the PV curves determined by the CPF are presented in Fig. 6.

TABLE II  
SYSTEM STATE AT THE MAXIMAL LOADING ( $\sigma = 1.66885$ )

Bus	V (p.u.)	$\delta$ (deg.)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (Mvar)
1	1.1	0	156.22	140.17
2	1.0708	-0.79437	286.4	150
3	1.0686	-3.3798	138.86	150
4	0.9264	-6.4267	0	0
5	0.9000	-8.7959	0	0
6	0.9507	-7.9688	0	0
$K_G = 0.0669$				

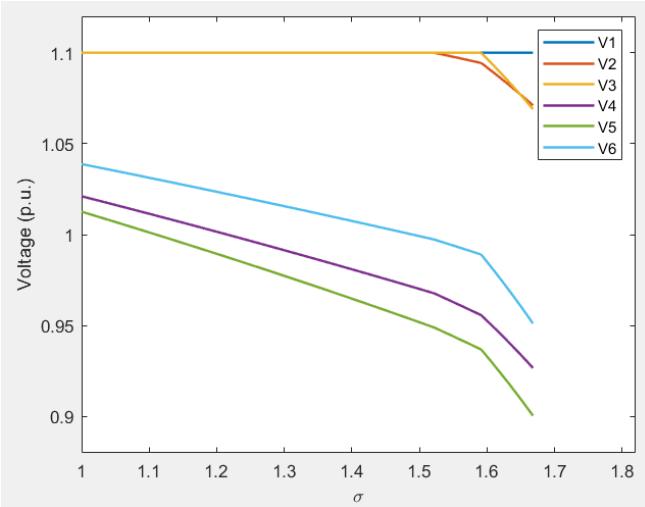


Fig. 6. PV curves with stable/secure equilibrium points for the 6-bus test system.

## V. CONCLUSIONS

This work presented a two-stage framework to account for voltage stability/security in OPF-based auction systems for the short-term energy procurement in hybrid electricity markets. The featured framework is based on the application of the PSO algorithm and the CPF method, which, in turn, are entirely based on PF calculations. As a result, the proposed framework provided stable, secure and accurate power allocations for supply and demand when compared to results in the correlate literature, and for the presented case study, this framework may be deemed effective and robust. Future work will consider different case studies in which voltage stability/security is associated with thermal limits and saddle-node and limit-induced bifurcations, as well as larger power systems.

## REFERENCES

- [1] S. Torres Franco and I. Duran, "Auction model simulator for the colombian electricity market," in *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA)*, 2018, pp. 1–5.
- [2] X. Xue, C. Zhou, Y. Zhu, Z. Li, and Y. Zeng, "Research on evaluation indicators system for electricity market in china," in *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2019, pp. 3095–3098.
- [3] I. MacGill, A. Bruce, and M. Zekulich, "Electricity market norms vs power system norms: the example of primary frequency response in the australian national electricity market," in *2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1–5.
- [4] L. Maurer and L. Barroso, *Electricity Auctions: An Overview of Efficient Practices*. The World Bank, 2011.
- [5] F. Milano, C. Canizares, and M. Invernizzi, "Multiobjective optimization for pricing system security in electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 596–604, 2003.
- [6] G. G. Lage, G. R. M. da Costa, and C. A. Cañizares, "Limitations of assigning general critical values to voltage stability indices in voltage-stability-constrained optimal power flows," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–6.
- [7] V. J. Gutierrez-Martinez, C. A. Cañizares, C. R. Fuerte-Esquivel, A. Pizano-Martinez, and X. Gu, "Neural-network security-boundary constrained optimal power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 63–72, 2011.
- [8] R. J. Avalos, C. A. Canizares, and M. F. Anjos, "A practical voltage-stability-constrained optimal power flow," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–6.
- [9] D. Lee, K. Turitsyn, D. K. Molzahn, and L. A. Roald, "Feasible path identification in optimal power flow with sequential convex restriction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3648–3659, 2020.
- [10] A. Bakirtzis, P. Biskas, C. Zoumas, and V. Petridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 229–236, 2002.
- [11] C. Roa-Sepulveda and B. Pavez-Lazo, "A solution to the optimal power flow using simulated annealing," in *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, vol. 2, 2001, pp. 5 pp. vol.2–.
- [12] L. Lai and J. Ma, "Power flow control in facts using evolutionary programming," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, vol. 1, 1995, pp. 109–.
- [13] C.-R. Wang, H.-J. Yuan, Z.-Q. Huang, J.-W. Zhang, and C.-J. Sun, "A modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal power flow problem," in *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 5, 2005, pp. 2885–2889 Vol. 5.
- [14] M. S. Kumari, G. Priyanka, and M. Sydulu, "Comparison of genetic algorithms and particle swarm optimization for optimal power flow including facts devices," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 1105–1110.
- [15] V. Ajjarapu and C. Christy, "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 416–423, 1992.
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- [17] B. Sharma and M. Pandit, "Security constrained optimal power flow employing particle swarm optimization," 03 2012.
- [18] L. Rafik, L. Slimani, and T. Bouktir, "Particle swarm optimization applied to the economic dispatch problem," *Journal of Electrical Systems*, vol. 2, 01 2006.
- [19] K. Mohamed, K. Rao, and K. N. Md Hasan, "Application of particle swarm optimization and its variants to interline power flow controllers and optimal power flow," 07 2010, pp. 1 – 6.