

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Suzana Silva Pinto

Comparação da Função Energia com Curvas
P-V e Q-V na
Análise de Estabilidade de Tensão

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza

Coorientador: Dr. Fritz Walter Mohn

Abril de 2013

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Suzana Silva Pinto

Comparação da Função Energia com Curvas

P-V e Q-V na

Análise de Estabilidade de Tensão

Dissertação aprovada por banca examinadora em
30 de Abril de 2013, conferindo ao autor o título de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza (Orientador)

Dr. Luiz Claudio de Araujo Ferreira

Prof. Dr. Benedito Isaías Lima Lopes

Itajubá 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

P659c

Pinto, Suzana Silva

Comparação da Função Energia com Curvas P-V e Q-V na
Análise de Estabilidade de Tensão / Suzana Silva Pinto. -- Itajubá,
(MG): [s.n.], 2013.

106 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza

Coorientador: Dr. Fritz Walter Mohn.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Estabilidade. 2. Curva P-V. 3. Curva Q-V. I. Souza, Antonio
Carlos Zambroni de, orient. II. Mohn, Fritz Walter, coorient. III.
Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

Agradecimentos

Pelo grande apoio, agradeço à meus pais, que sempre me ajudaram além de grandes modelos de dedicação e incansáveis buscadores de conhecimento.

Agradeço à minha filha pela eterna companhia e amor incondicionais.

Ao Rogério, pelo carinho e companheirismo em todas as horas.

Ao professor Antonio Carlos Zambroni pela paciência e compreensão, além das horas de dedicação à arte de ensinar.

A Fritz Walter Mohn e Eliane De Lorenci pelo apoio técnico, acompanhamento e base de estudo, e que gentilmente cederam os programas para os cálculos apresentados neste trabalho.

Ao professor Luiz Barreira Martinez por incentivar e acreditar na minha capacidade técnica.

Ao professor Antônio Hermeto pelo exemplo de dedicação ao ensino.

Aos professores e funcionários da UNIFEI pela diária dedicação à educação.

Meus amigos, obrigada pelo apoio e carinho.

Aos colegas de trabalho, obrigada pela paciência.

Resumo

A necessidade de manter o sistema em operação com níveis cada vez maiores de carga, torna-se evidente que o estudo da capacidade de carregamento do sistema deva ser mais detalhado. Inúmeros estudos demonstram a importância de se determinar o ponto de colapso e a necessidade de identificar as barras críticas, susceptíveis a levar o sistema completo a esse colapso. O controle de tensão nessas barras pode não ser suficiente já que a capacidade de transmissão de potência entre barras deve ser considerada e que, no caso de sistemas já sobrecarregados essa capacidade se apresenta bastante reduzida.

Como motivação deste trabalho, está a necessidade de melhorar a análise de sistemas existentes. Essa melhora se caracteriza por uma verificação do estado geral de carregamento do sistema e sua capacidade de transmissão de potência por área analisada, utilizando-se de métodos já consagrados.

Para determinação da margem de carga do sistema durante o aumento de seu carregamento foi utilizada a curva P-V, e para determinação da barra crítica foi utilizado o método do vetor tangente. Como complemento da avaliação do estado geral da capacidade de transmissão, foram utilizadas outras duas propostas: o uso da curva Q-V e o estudo da Função Energia.

Abstract

The need to keep the system operating with increasing levels of load, it becomes obvious that the capacity of the study system load should be more detailed. Numerous studies demonstrate the importance of determining the point of collapse and the need to identify critical buses, likely to bring the whole system to that collapse. The control voltage on these buses may not be enough since the capacity of power transmission must be considered and that in the case of systems already overloaded capacity that presents greatly reduced.

As motivation for this work is the need to improve the analysis of existing systems. This improvement is characterized by an examination of the overall system load and its ability to transmit power per area analyzed, using methods already established.

To determine the margin of system during the loading, the PV curve was used and the critical bus was determined using the tangent vector. To complement the assessment of the general state of the transmission capacity, were used two other proposals: the use of QV curve and the study of the Energy Function.

Sumário

Lista de Símbolos	9
-------------------------	---

Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas.....	14
Introdução.....	16
Metodologia.....	17
Organização do Trabalho	18
Capítulo 1 – Estabilidade de Tensão.....	19
1.1 – Histórico de Perturbações	19
1.2 – Conceitos.....	20
1.3 – Tipos de Estabilidade	21
1.3.1 – Análise Dinâmica.....	21
1.3.2 – Análise Estática.....	23
Capítulo 2 – Análise Estática	24
2.1 – Introdução	24
2.2 – Modelagem do Sistema.....	25
2.3 – Sistema de 2 Barras	26
2.4 – Identificação da Barra Crítica	29
2.5 – Diagrama de Bifurcação	32
2.6 – Curva P-V	35
2.6.1 – Método de Cálculo da Curva P-V	35
2.6.2 – Análise da Curva P-V	36
2.7 – Curva Q-V.....	38
2.7.1 – Método de Cálculo da Curva Q-V	38
2.7.2 – Análise da Curva Q-V.....	39
2.7.3 – Motivação para Estudo da Curva Q-V.....	42
Capítulo 3 – Função Energia.....	44
3.1 – Introdução	44
3.2 – Lyapunov e a Estabilidade	45
3.2.1 – Modelos de um Sistema	45

3.2.2 – Estabilidade.....	47
3.3 – Definição de Estabilidade por Lyapunov.....	48
3.3.1 – Primeiro Método de Lyapunov – Método da Linearização	49
3.3.2 – Segundo Método de Lyapunov – Método Direto	51
3.4 – Região de Estabilidade.....	55
3.5 – Função Energia	56
Capítulo 4 – Resultados.....	62
4.1 – Introdução	62
4.2 – Sistema de Teste de 2 Barras	62
4.3 – Sistema de Teste de 14 Barras do IEEE.....	65
4.4 – Sistema de Teste de 57 Barras do IEEE.....	82
Conclusões.....	93
Trabalhos Futuros.....	94
Bibliografia.....	95
Apêndice.....	99

Lista de Símbolos

$A = (\partial f / \partial x) =$ Primeiro termo do desenvolvimento de $f(x)$ em série de Taylor,
também representa a matriz Jacobiana de f

a_1 e a_2 = parâmetros parcela potência constante, cálculo de P e Q da carga ZIP

a_{ij} = constante Relação de Transformação do transformador conectado às barras i
e j (pu)

b_1 e b_2 = parâmetros parcela da corrente constante, cálculo de P e Q da carga ZIP

b_{ij} = Condutância Série da linha entre barras i e j , parte real de y_{ij} (pu)

B_{ij} = Condutância Série da linha entre barras i e j , parte real da matriz Y_{ij} (pu)

b_{ij}^{sh} = Condutância Série da linha entre barras i e j , parte real de y_{ij} (pu)

c_1 e c_2 = parâmetros parcela da impedância constante, cálculo de P e Q da carga ZIP

Dvei = variação de tensão entre o ponto inicial de carregamento 1pu e o ponto de
colapso;

Dve = variação de tensão entre o ponto inicial de carregamento 1pu e o ponto de
bifurcação;

Dvi = variação de tensão entre o ponto de bifurcação e o ponto de mínima tensão
antes do colapso;

EPB = Energia Potencial da Barra

f = Equação de Potência Ativa dos barramentos (pu)

$f(x)$ = Função genérica para um sistema

$f_{OS}(x)$ = Termos de ordem superior da série de Taylor

g = Equação de Potência Reativa dos barramentos/ V^{-1} (pu)

g_{ij} = Susceptância Série da linha entre barras i e j , parte imaginária de y_{ij} (pu)

G_{ij} = Susceptância Série da linha entre barras i e j , parte imaginária da matriz
 Y_{ij} (pu)

J = Jacobiano do Fluxo de Potência

k	= fator de passo
MQ	= Margem de Potência Reativa obtida pelo traçado da curva Q-V (MVAR)
n	= número de barras do sistema estudado (pu)
n_P e n_Q	= sensibilidades de P e Q às variações de V
P	= Potência Ativa momentânea (pu)
P_0	= Potência Ativa inicial considerada para cálculo (pu)
P_l	= Potência Ativa de carga-load (pu)
P_g	= Potência Ativa gerada (pu)
P_i	= Potência Ativa da barra i (pu)
Q	= Potência Reativa momentânea (pu)
Q_0	= Potência Reativa inicial considerada para cálculo (pu)
Q_f	= Potência Reativa de falta (pu)
Q_g	= Potência Reativa gerada (pu)
Q_i	= Potência Reativa da barra i (pu)
Q_l	= Potência Reativa de carga-load (pu)
Q^{sh}	= Potência Reativa Shunt conectada à barra relacionada (pu)
r_{ij}	= Resistência em série da linha entre barras i e j (pu)
SEP	= Stable Equilibrium Point
x	= Ponto de equilíbrio de um sistema autônomo
x	= é um parâmetro representativo das variáveis de estado (tensões e ângulos)
x_e	= Pontos de Equilíbrio de um sistema linearizado
x^s	= solução estável em $[\theta^s, V^s]$ ou SEP
x^u	= é a solução instável em $[\theta^s, V^s]$ ou UEP
t_i	= Vetor Tangente
UEP	= Unstable Equilibrium Point

$V(x)$	= Função de Lyapunov
V	= Amplitude da Tensão momentânea da barra correspondente a P e Q (pu)
V_0	= Amplitude da Tensão da barra considerada para cálculo correspondente a P_0 e Q_0 (pu)
V_i	= Amplitude da Tensão momentânea da barra i correspondente a P_i e Q_i (pu)
V_i^s	= Amplitude da Tensão momentânea da barra i região estável da curva P-V(pu)
V_i^u	= Amplitude da Tensão momentânea da barra i região instável da curva P-V(pu)
ω	= Velocidade angulara (rad/s)
y_{ij}	= Admitância da linha entre barras i e j (pu)
θ	= Ângulo da tensão da barra (rad ou °)
θ_0	= Ângulo da tensão da barra para cálculo correspondente a P_0 e Q_0 (pu)
θ_i	= Ângulo da tensão da barra i correspondente a P_i e Q_i (pu)
θ_i^s	= Ângulo da tensão da barra i região estável da curva P-V(pu)
θ_i^u	= Ângulo da tensão da barra i região instável da curva P-V(pu)
$\mathcal{G}(x^s + x^u)$	= Função Energia para os pontos estável (x^s) e instável (x^u)
ε	= Região de vizinhança para avaliação de um ponto de equilíbrio
δ	= Região de vizinhança para avaliação de um ponto de equilíbrio, sendo que $\delta \subset \varepsilon$
λ	= é um parâmetro representativo da variação do carregamento
$\Delta\lambda_1$	= Passo Previsor

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Sistema de 2 Barras	26
FIGURA 2.2 – Gráfico da Barra 2 para Sistema de 2 barras a três carregamentos	27
FIGURA 2.3 – Método da Continuação	33
FIGURA 2.4 – Curva Típica P-V	36
FIGURA 2.5 – Análise das Curvas Q-V Geradas	40
FIGURA 2.6 – Relação das Curvas P-V e Q-V	41
FIGURA 2.7 – Curva Típica P-V	43
FIGURA 3.1 – Ilustração de Sistema Estável	48
FIGURA 3.2 – Ilustração de Sistema Assintoticamente Estável	49
FIGURA 3.3 – Ilustração de Sistema Assintoticamente Instável.....	49
FIGURA 3.4 – Representação Geométrica de uma Função de Lyapunov	52
FIGURA 3.5 – Bacia de Energia para Sistema Elétrico de Potência	57
FIGURA 3.6 – Energia Potencial de um Sistema	58
FIGURA 4.1 – Curva P-V – Caso Base para Barra 2 - Sistema 2 Barras	62
FIGURA 4.2 – Curva Q-V – Caso Base para Barra 2 - Sistema 2 Barras	63
FIGURA 4.3 – Curva Q-V – Caso 1pu e 2 pu para Barra 2 - Sistema 2 Barras	63
FIGURA 4.4 – Curva P-V – Caso Base para Sistema 14 Barras	65
FIGURA 4.5 – Curva Q-V – Caso Base para Sistema 14 Barras.....	68
FIGURA 4.6 – Função Energia – Caso Base Sistema 14 Barras – Energia Potencial por Barra e Energia potencial Total	72
FIGURA 4.7 – Função Energia – Caso Base Sistema 14 Barras – Energia Potencial por Barra	73
FIGURA 4.8 – Curva P-V – Caso Base para Barras Críticas do Sistema 57 Barras	83
FIGURA 4.9 – Curva Q-V – Caso Base para Barras Críticas do Sistema 57 Barras.....	84
FIGURA 4.10 – Curva Q-V – Caso Base para Barras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25 e 31 – Grupo 1 - Sistema 57 Barras.....	85
FIGURA 4.11 – Curva Q-V – Caso Base para Barras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25 e 31 – Grupo 2 – Sistema 57 Barras	85
FIGURA 4.12 – Curva Q-V – Caso Base para Barras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, e 31 – Grupo 3 – Sistema 57 Barras	86
FIGURA 4.13 – Curva Q-V – Caso Base para Barras 25, 31, 36, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46 e 47 – Grupo 4 – Sistema 57 Barras	86
FIGURA 4.14 – Curva Q-V – Caso Base para Barras 25, 31, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, e 55 – Grupo 5 – Sistema 57 Barras	87

FIGURA 4.15 – Curva P-V – Caso Base para Barras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25 e 31 – – Grupo 1 - Sistema 57 Barras.....	88
FIGURA 4.16 – Curva P-V – Caso Base para Barras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25 e 31 – Grupo 2 – Sistema 57 Barras	89
FIGURA 4.17 – Curva P-V – Caso Base para Barras 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, e 31 – Grupo 3 – Sistema 57 Barras	89
FIGURA 4.18 – Curva P-V – Caso Base para Barras 25, 31, 36, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46 e 47 – Grupo 4 – Sistema 57 Barras	90
FIGURA 4.19 – Curva P-V – Caso Base para Barras 25, 31, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, e 55 – Grupo 5– Sistema 57 Barras	90
FIGURA 4.20 – Sistema 57 Barras – Áreas Limite de Carregamento.....	91
FIGURA A.1 –Sistema de Teste de 2 Barras	99
FIGURA A.2 –Sistema 14 Barras IEEE.....	100
FIGURA A.3 –Sistema 57 Barras IEEE.....	102

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Caso Base	66
TABELA 4.2 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras –Desligamento da linha 9-14	66
TABELA 4.3 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 13-14	66
TABELA 4.4 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 10-11	67
TABELA 4.5 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-10	67
TABELA 4.6 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 4-5	67
TABELA 4.7 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 2-3	67
TABELA 4.8 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras	68
TABELA 4.9 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 9-14.....	69
TABELA 4.10 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 13-14.....	69
TABELA 4.11 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 9-10.....	70
TABELA 4.12 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 10-11.....	70
TABELA 4.13 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 4-5.....	71
TABELA 4.14 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 2-3.....	71
TABELA 4.15 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras	72
TABELA 4.16 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-14.....	73
TABELA 4.17 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 13-14.....	74
TABELA 4.18 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 10-11.....	74
TABELA 4.19 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-10.....	74
TABELA 4.20 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 4-5.....	75
TABELA 4.21 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 2-3.....	75

TABELA 4.22 – Ranking da Criticidade do Barramento (tensão e ângulo) do Sistema 14 Barras	76
TABELA 4.23 – Carregamento do Sistema 14 Barras	77
TABELA 4.24 – Comportamento da Tensão das Barras Sistema 14 Barras	77
TABELA 4.25 – Ranking da Criticidade do Barramento (tensão e ângulo) Sistema 57 Barras – Barras mais críticas	82
TABELA 4.26 – Margem de Tensão das Barras Sistema 57 Barras – Barras Críticas.....	83
TABELA 4.27 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Críticas.....	84
TABELA 4.28 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 1	85
TABELA 4.29 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 2	85
TABELA 4.30 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 3	86
TABELA 4.31 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 4	86
TABELA 4.32 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 5	87
TABELA 4.33 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras.....	88
TABELA 4.34 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras–Grupo 1.....	88
TABELA 4.35 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras–Grupo 2.....	89
TABELA 4.36 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras–Grupo 3.....	89
TABELA 4.37 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras–Grupo 4.....	90
TABELA 4.38 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras–Grupo 5.....	90
TABELA 4.39 – Sistema 57 Barras – Comportamento das Barras de Geração no Ponto Crítico.....	92
TABELA A.1 – Dados do Sistema de Teste de 2 Barras – Dados de Barra.....	99
TABELA A.2 – Dados do Sistema de Teste de 2 Barras – Dados de Linha.....	99
TABELA A.3 – Dados do Sistema de Teste de 14 Barras – Dados de Barra.....	101
TABELA A.4 – Dados do Sistema de Teste de 14 Barras – Dados de Linha.....	101
TABELA A.5 – Dados do Sistema de Teste de 57 Barras – Dados de Barra.....	103
TABELA A.6 – Dados do Sistema de Teste de 57 Barras – Dados de Linha.....	105

Introdução

Motivação

Estudos de estabilidade de tensão adquiriram importância crescente nas últimas décadas em função de ocorrências indesejáveis em diversos sistemas elétricos ao redor do mundo e da necessidade de explorar os sistemas em seus pontos de máximo carregamento mantendo a qualidade e continuidade de fornecimento. Desta forma, alguns pontos importantes como determinação de margem de carga, identificação de áreas críticas e proposta de ações de controle devem ser estudados. Estes termos serão definidos nos capítulos seguintes, permitindo ao leitor se familiarizar com os conceitos estudados neste trabalho. A verificação da barra crítica, neste trabalho, é feita pelo vetor tangente [1], [2] e [3] que ao identificar com antecedência, permite a tomada de ações de controle preventivas, aumentando a margem de carga.

A margem de carga reativa é obtida pela curva Q-V e permite determinar a robustez de uma barra de carga. Desta forma, informações relevantes quanto à identificação de áreas mais vulneráveis do sistema podem ser obtidas. Isso implica em identificar barras de carga problemáticas e barras de geração com dificuldades de suprir potência reativa.

A ideia proposta neste trabalho consiste em estudar algumas características da curva Q-V e seu efeito na estabilidade do sistema, apontando algumas ações e explicando alguns fenômenos ainda não esclarecidos no processo de instabilidade de tensão.

Metodologia

Analisar um Sistema Elétrico de Potência é uma tarefa complexa, pois deve-se levar em consideração todas as não linearidades de carga, geração e controles.

Um dos métodos para análise de Sistemas é através do método estático, obtido a partir das linearizações das equações e assumindo as variações de carga muito pequenas, que levam o Sistema de Potência de um ponto operativo a outro. Como base do estudo desta dissertação, foi utilizado o método estático, por ser o mais apropriado para se identificar a margem de estabilidade e as barras que podem levar o sistema ao colapso.

Portanto, a primeira etapa do estudo, foi a identificação das barras críticas, depois, a verificação da margem de carga dos barramentos. Por definição, esta consiste na variação de carga que o sistema consegue suportar de forma estável, anterior ao colapso. A margem de carga foi analisada, neste trabalho, traçando inicialmente a curva P-V de cada barramento. Posteriormente, é analisada a curva Q-V, calculada através de análise pontual de cada barra, com o restante do sistema em repouso. Através da mesma, verifica-se a margem de potência reativa de cada barra.

Diferente do estudo da curva P-V, no traçado da curva Q-V não existe aumento de carga. Para cada barra PV avaliada, varia-se o nível de tensão e anota-se o valor de potência reativa gerada por um gerador fictício alocado à mesma.

O comportamento do Sistema 14 Barras do IEEE é utilizado para análise de carregamento (potências ativa e reativa) e avaliação dos pontos operativos através das curvas P-V e Q-V e para uma melhor observação do comportamento do sistema e de cada barra perante o acréscimo de carregamento, é utilizado o estudo da Função Energia do Sistema.

Organização do Trabalho

Esta dissertação é dividida em 5 capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta os conceitos básicos de estabilidade;
- No segundo capítulo faz-se uma breve revisão teórica do estudo de Análise Estática;
- No capítulo 3, são apresentados os conceitos de estudo das curvas P-V e Q-V;
- No capítulo 4, são indicados os conceitos do cálculo da Função Energia para um sistema estável, e algumas das informações que podem ser retiradas desse cálculo.

São apresentados, no capítulo 5, os resultados de cálculo de cada metodologia empregada e a análise de similaridade entre elas.

Como parte final deste trabalho, estão as conclusões finais, os dados dos sistemas utilizados como cálculo e proposições para futuros trabalhos.

Capítulo 1

Estabilidade de Tensão

1.1 Histórico de Perturbações

A análise de grandes perturbações já ocorridas servem de modelo para ampliar a análise sobre instabilidades que podem ocorrer e seus motivos, áreas afetadas, corte de carga, tempo de recomposição do sistema, grau de severidade, prejuízo econômico, dentre outros aspectos importantes.

Dentre essas perturbações que foram registradas, pode-se citar [4], [5], [6],[7] e [8]:

- Flórida, 02 de setembro de 1982, 26 de novembro de 1982, 28 de dezembro de 1982 e 30 de dezembro de 1982;
- Inglaterra, 20 de maio de 1986;
- Costa Oeste dos Estados Unidos da América, 02 de julho de 1996;
- Estados Unidos da América e Canadá, 14 de agosto de 2003;
- Itália, 29 de setembro de 2003;
- Indonésia, 18 de agosto de 2005;
- Itália, Alemanha, França, Bélgica, Espanha e Portugal, 04 de novembro de 2006;
- Brasil, 10 de novembro de 2009.

As referências acima descrevem essas ocorrências e indicam que tiveram motivos e origens diferenciadas. Por isso a importância do estudo e o quanto é abrangente o campo de análise, dado que cada sistema elétrico possui sua própria característica de geração/transmissão/controle/carga.

1.2 Conceitos

Estabilidade de Tensão

Capacidade do sistema de potência em alcançar um ponto de equilíbrio durante seu funcionamento normal e alcançar um novo ponto de equilíbrio após uma perturbação [9] e [10].

Um sistema apresenta um processo de instabilidade de tensão quando uma perturbação causa uma progressiva queda ou elevação de tensão [6] e [10].

Instabilidade de Tensão

A instabilidade de tensão é um fenômeno local, com medidas de solução do problema com alcance local. Porém suas consequências podem afetar uma extensa área [11], [12] e [13].

Os problemas de instabilidade de tensão são, normalmente não oscilatórios, isto é, quase sempre um decréscimo aperiódico de tensão, contrariamente o que acontece na instabilidade angular [15]. A instabilidade de tensão e angular podem ocorrer simultaneamente e podem evoluir para um colapso de tensão.

Causas que afetam a estabilidade de tensão:

- O afastamento, cada vez maior das unidades geradoras dos centros de consumo;
- Variação das cargas e influência das mesmas sobre as variações de tensão;
- Saída de Linhas de Transmissão;
- Equipamentos de Controle de Tensão em Linhas ou nas Barras de Cargas;
- Compensação de potência reativa insuficiente;
- Coordenação e Proteção não adequados para determinadas manobras ou faltas.

Colapso de Tensão

O Colapso de Tensão caracteriza-se por uma sequência de eventos acompanhados de instabilidade de tensão que podem levar o sistema de potência a um blecaute ou a tensões muito baixas em uma barra ou em um conjunto de barras de forma que o atendimento à carga fica extremamente prejudicado [9], [14] e [10]. É um fenômeno local que se espalha pela vizinhança [2] e [11]. O intervalo de tempo entre o

distúrbio inicial e o colapso de tensão pode estar desde uma fração de segundo até dezenas de minutos [5].

Margem de Carga

É definida pela variação de carga, a partir de um ponto de equilíbrio, que um sistema pode suprir de forma estável, respeitando a coerência das ações de controle.

Como as simulações encontradas nessa dissertação são todas considerando as cargas com fator de potência constante, qualquer acréscimo de carregamento em potência ativa P, gera também um acréscimo proporcionalmente igual em potência reativa Q.

1.3 Tipos de Estabilidade

A estabilidade de tensão pode ser estudada através de modelos estáticos ou dinâmicos, sendo a escolha da abordagem dependente da análise e velocidades de processamento requeridas [15], [16] e [17]. Neste trabalho, somente a abordagem estática será empregada.

1.3.1 Análise Dinâmica

Usa técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou frequência, proporcionando uma reprodução mais fiel do fluxo.

O modelo dinâmico de um sistema de potência pode ser representado através de um conjunto de equações algébrico-diferenciais:

$$\dot{x} = f(x) \tag{1.1}$$

A Análise Dinâmica é indicada para estudos envolvendo coordenação de controle e proteções, onde é importante a consideração das estabilidades angular, transitória, a pequenos sinais e à frequência .

Estabilidade Angular

A estabilidade angular é analisada em um conjunto de máquinas síncronas. Após um distúrbio, se conservado o equilíbrio entre o torque magnético e o mecânico de cada máquina, o sistema é estável. Caso contrário, surge um aumento das oscilações em pelo menos um dos geradores, perdendo o sincronismo e levando o sistema à instabilidade angular [10].

Estabilidade Transitória

É caracterizada por perturbação transitória severa. O intervalo de tempo de interesse dos estudos neste tipo de fenômeno varia de 3 a 5 segundos após a perturbação, dependendo da complexidade do sistema este tempo pode ser estendido para 10 a 20 segundos [10].

Estabilidade de Frequência

Ocorre quando o sistema consegue manter o valor da frequência dentro de um intervalo próximo à frequência nominal do sistema após uma perturbação.

A técnica de simulação não-linear no domínio do tempo, com modelagens mais aprimoradas para as dinâmicas associadas às severas excursões de parâmetros e intervalos de tempo estendidos, é indicada para esta análise [18] e [19].

1.3.2 Análise Estática

Embora o colapso de tensão seja um fenômeno dinâmico, devido à complexidade, tempo computacional em simulações e suas dinâmicas envolvidas, as ferramentas de análise estática mostram, no caso de pequenas perturbações, resultados semelhantes à Análise Dinâmica.

O modelo estático para análise de tensão só é apropriado para pequenas perturbações. Seria o caso de sucessivos incrementos de carga que podem levar um sistema a um ponto de colapso.

Considera-se, em muitos casos, a dinâmica do sistema varia lentamente, portanto, as derivadas das variáveis de estado (x) em relação ao tempo são consideradas nulas, reduzindo a uma equação algébrica para cada ponto de equilíbrio. Isso permite a obtenção e identificação de pontos momentâneos da operação [20] :

$$f(x) = 0 \quad (1.2)$$

A análise estática pode também proporcionar informações a respeito da condição de estabilidade do ponto de equilíbrio considerado, limite do máximo carregamento, margem de estabilidade, classificação das contingências mais importantes [20], melhor posição e quantificação da alocação da reserva de potência reativa. Por estes motivos, a análise estática foi considerada como a melhor ferramenta para o estudo em questão.

As desvantagens são, pela simplificação dos mecanismos, não representar de maneira suficiente as respostas em tempo real de cargas dinâmicas e o comportamento dinâmico do sistema.

Capítulo 2

Análise estática

2.1 Introdução

Será detalhada neste capítulo a formulação geral para modelagem do sistema e uma das técnicas de análise de carregamento, a partir de um ponto inicial calculado pelo fluxo de potência.

A formulação geral do fluxo de potência é dada através de um grupo de equações (fluxo de carga), que pode ser resolvido através de vários métodos. Foi utilizado para este trabalho o Método de Newton-Raphson.

Com as equações caracterizando o sistema em repouso, calcula-se novos pontos de carregamento do sistema através de variações pequenas e progressivas de carga, permitindo-se, então, o traçado da curva P-V, realizado através do Método da Continuação.

A curva Q-V também em estudo, é calculada de forma similar à P-V, simulando-se uma barra de carga (PQ) como tipo barra de tensão controlada (PV), sem limite de potência reativa e traça-se a curva Q-V de maneira similar à P-V, individualmente, para cada barra. É importante notar que ao traçar a curva Q-V de uma barra de carga, as barras originalmente de tensão controlada, embora em repouso, têm seus limites de geração de potência reativa monitorados.

A associação entre os resultados obtidos da curva P-V e Q-V, permite uma análise do comportamento do sistema de potência em estudo, evitando-se a operação do sistema em pontos operativos que possam gerar um colapso de tensão e permitindo uma análise complementar que possa indicar melhores pontos de alocação de potência reativa para manutenção dos níveis de tensão requeridos.

2.2 Modelagem do Sistema

O Fluxo de Potência é a ferramenta básica para o estudo de um Sistema de Potência. Através do Fluxo, obtém-se a solução do ponto de operação, em regime permanente, de um sistema de potência através de equações baseadas na Tensão (V), Potência Ativa (P), Potência Reativa (Q) e Ângulo (θ) nas barras relacionadas.

A rede elétrica é, geralmente, considerada como constituída por elementos trifásicos equilibrados. Consequentemente, a rede pode ser analisada usando-se uma representação monofásica com parâmetros de sequência positiva [21].

As equações básicas do fluxo de potência são dadas por:

$$P_i = V_i \sum_{j \in K} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in K} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.2)$$

Onde K é formado pelo conjunto de barras adjacentes à barra estudada i e ela mesma. Após a classificação das barras de acordo com suas características (barras de carga e de tensão controlada, além da barra de referência), executa-se o processo iterativo, cuja saída permite o conhecimento de tensões e ângulos em todas as barras. A partir de então, pode-se calcular todas as variáveis de interesse, como geração de potência reativa nas máquinas e carregamento nas linhas de transmissão.

Para cada barra tem-se duas equações (P_i e Q_i) e quatro incógnitas (P, Q, V e θ). Encontra-se uma solução única para o problema quando identifica-se pelo menos 2 incógnitas no momento inicial do cálculo, dados esse características do ponto de operação.

As barras podem ser identificadas através desses dados iniciais, e podem, durante o cálculo, variar sua identificação:

Barras PQ (barras de carga) - Dados P e Q / Incógnitas V e θ

Barras PV (barras geradoras/tensão controlada) - Dados P e V / Incógnitas Q e θ

Barra V θ (barra swing/slack/referência) - Dados V e θ / Incógnitas P e Q.

Como a Barra V θ é uma barra de referência, a potência gerada não é fixada, admitindo-se que a mesma suprirá as perdas de transmissão [21].

Utilizando-se essas classificações de barras, é possível eliminar algumas incógnitas, resumindo o sistema de cálculo a $2n$ equações e $2n$ incógnitas para um sistema de n barras, existindo assim, uma solução única para o fluxo, assim identificando-se u sistema matricial inicial de dimensão $2NPQ+NPV$.

É importante lembrar que condutância G_{ij} e a susceptância B_{ij} estão ligadas ao conceito de perdas entre barramentos principalmente as perdas na linha de transmissão, transformadores ou outro acoplamento.

2.3 Sistema de Duas Barras

Para início dos testes, foi analisado um sistema simples de 2 barramentos. Este sistema é composto por um gerador com capacidade infinita de geração (como visto anteriormente, para possibilidade do estudo da curva P-V), uma linha de transmissão sem limitações térmicas e uma carga.

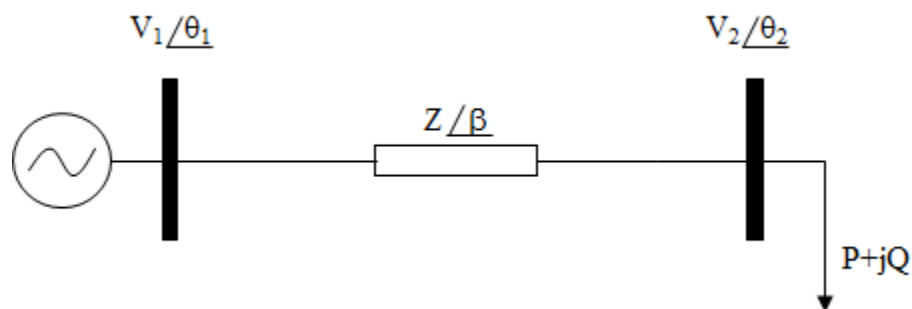


Figura 2.1 – Sistema de 2 Barras

Com as equações do fluxo de potência representadas por:

$$P_2(V, \theta) = P_2 = V_2 \frac{V_1}{Z} \cos(\theta_2 - \theta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \cos(\beta) \quad (2.3)$$

$$Q_2(V, \theta) = Q_2 = -V_2 \frac{V_1}{Z} \sin(\theta_2 - \theta_1 + \beta) + \frac{V_2^2}{Z} \sin(\beta) \quad (2.4)$$

Através destas equações, pode-se montar um gráfico indicando a potência de carga para diferentes valores de tensão e ângulo, para cada acréscimo de carregamento, onde $P_1 < P_2 < P_3$ e $Q_1 < Q_2 < Q_3$:

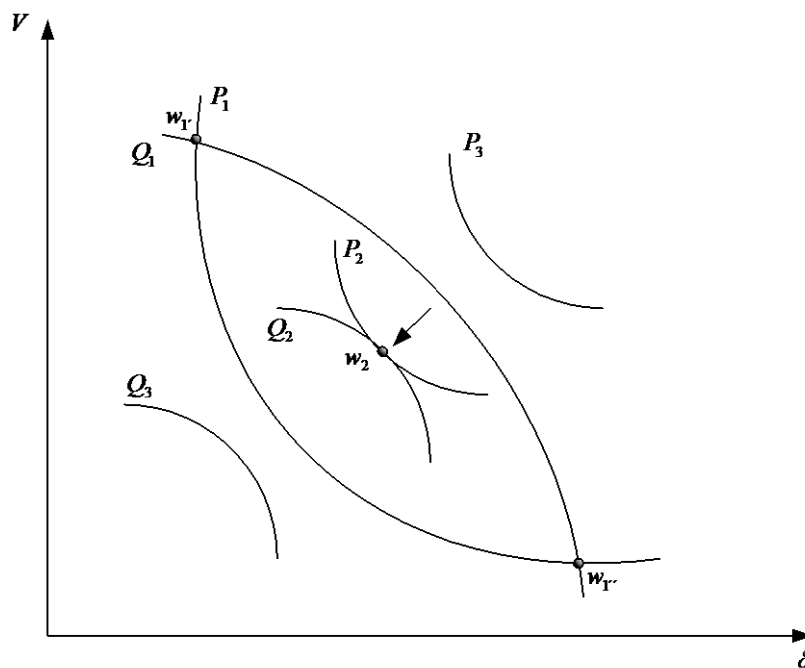


Figura 2.2 - Gráfico da Barra 2 para Sistema de 2 barras a três carregamentos

Fonte: [22]

Os pontos de equilíbrio são definidos pelas interseções w_1 e w_2 . Perante o carregamento P_1 e Q_1 , o sistema apresenta duas soluções que são suas interseções em w'_1 e w''_1 . Aumentando-se as cargas até os limites de P_2 e Q_2 , o sistema tem uma única solução no ponto w_2 . No carregamento P_3 e Q_3 , o sistema não apresenta soluções, portanto as curvas não se cruzam ou tangenciam.

Portanto, verifica-se que, conforme o aumento de carga, as curvas P e Q vão se aproximando no gráfico, até que, à partir de P_2 e Q_2 , não existam soluções para qualquer aumento de carga, sendo este o ponto de máximo carregamento. Esta interseção pode

ser transcrita matematicamente através dos vetores gradientes de P e Q, dados pela expressão:

$$\nabla P = \alpha \nabla Q \quad (2.5)$$

ou

$$\nabla P - \alpha \nabla Q = 0 \quad (2.6)$$

Onde α é um escalar.

Retornando às equações do fluxo em que $P_2(V, \theta)$ e $Q_2(V, \theta)$, as variações em P e Q podem ser escritas como:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (2.7)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial Q}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (2.8)$$

As derivadas acima fazem parte Jacobiano do fluxo de potência.

Através da equação onde P e Q apresentam uma única solução:

$$\frac{\partial P}{\partial V} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial V} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \alpha \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.10)$$

A solução das equações acima indica que o determinante do Jacobiano do fluxo de potência seja igual a zero, ou seja, o Jacobiano seja singular no ponto de máximo carregamento, como já visto anteriormente:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (2.11)$$

2.4 Identificação da Barra Crítica

A análise estática considera um sistema de potência representado por equações algébricas associadas a cada ponto de equilíbrio. Através destas equações pode-se determinar a sensibilidade de tensão de cada barramento à pequenas alterações no sistema.

A linearização pode trazer informações a uma determinada condição operativa sobre o limite de máximo carregamento, margem de estabilidade, áreas críticas, e margem de potência reativa necessária para compensação e manutenção da tensão.

A barra crítica é aquela que apresenta maior variação de tensão em função de um aumento de carga, ou outra variação paramétrica. Este comportamento afeta suas barras vizinhas, caracterizando uma área crítica, visto que estas barras acabam por levar o sistema ao colapso de tensão. Em geral, esta área apresenta carências de suporte local de potência reativa, sendo esta a razão principal do colapso de tensão.

Identificar a barra crítica pode indicar barras e áreas de vulnerabilidade de tensão do sistema, auxiliando na determinação de ações de controle.

Método do Vetor Tangente

O Método do Vetor Tangente proposto em [2] e [3] identifica com antecedência (portanto, em pontos operativos anteriores ao ponto de bifurcação) as barras críticas do sistema. Este vetor converge para o autovetor à direita associado ao autovalor nulo [1].

Próximo ao ponto de colapso, pequenas variações de carga produzem grandes variações de tensão, portanto, como o Vetor Tangente é obtido pelo inverso do Jacobiano, e como suas componentes tendem à infinito, sua inversa tende à zero.

Pode-se observar o que vetor tangente indica como as variáveis de estado se modificam durante o carregamento do sistema. Portanto, a maior entrada nesse vetor indica a maior variação dos vetores de estado e essa barra pode, conseqüentemente, ser relacionada como a barra crítica.

A identificação da barra crítica pode sofrer alterações durante o traçado do diagrama. Porém, para pontos distantes do ponto de colapso de tensão, a análise do vetor tangente se mostra eficaz [3].

O Sistema de Potência pode ser representado por:

$$\dot{x} = dx/dt = f(x, \lambda) \quad (2.12)$$

Para Análise Estática, as variáveis de estado (representadas por x) são associadas ao módulo e ângulo de tensão nas barras e considera-se infinitesimal as variações de perturbação nas cargas (representadas por λ), portanto $dx/dt=0$:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.13)$$

Onde:

λ é um parâmetro representativo da variação do carregamento
 x representa as variáveis de estado (tensões e ângulos)

Considerando as equações linearizadas para cálculo do Fluxo de Potência, através do Método de Newton-Raphson:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Onde:

P Potência Ativa [pu]

Q Potência Reativa [pu]

V Tensão de cada barramento [pu]

θ ângulo de cada barramento [rad]

Onde J , é a matriz Jacobiana:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Sendo que:

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (2.16)$$

$$N = \frac{\partial P}{\partial V} \quad (2.17)$$

$$M = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad (2.18)$$

$$L = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2.19)$$

Considerando-se barramentos de geração (g) e carga (l):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad \therefore \quad \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Onde g representa as barras de geração e l representa as barras de carga, o novo ponto de carregamento do sistema é dado através das equações:

$$\Delta P_i = P_{i0} \Delta \lambda \quad (2.21)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i0} \Delta \lambda \quad (2.22)$$

Com:

P_i Potência Ativa calculada para barra i

P_{i0} Potência Ativa inicial da barra i

Q_i Potência Reativa calculada para barra i

Q_{i0} Potência Reativa inicial da barra i

Chegando-se à equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{g0} \\ \Delta P_{l0} \\ \Delta Q_{l0} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

No ponto máximo de carregamento, o Jacobiano torna-se singular, portanto $\det(J)=0$.

O vetor tangente (t) pode então ser obtido através de manipulação da equação (25), considerando as equações (2.21) e (2.22):

$$t = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta \lambda} \\ \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

A maior componente do vetor tangente, indica a variável mais sensível no ponto de bifurcação. Próximo ao ponto de colapso, variações infinitesimais de carregamento produzem grandes variações de tensão e ângulo, logo, os elementos do vetor tangente são muito grandes e seu inverso tende à zero. Portanto, a maior componente deste vetor indica a barra mais sensível.

O ponto de bifurcação, ou ponto crítico, também pode ser determinado por extrapolação admitindo-se o inverso da maior componente do vetor tangente.

O método da continuação tem sido utilizado para traçar as curvas de solução do fluxo de potência pois evita-se os problemas de convergência com a reformulação das equações de tal forma que a matriz jacobiana apareça bem condicionada para todo carregamento. Permite-se, então, obter as soluções do fluxo de potência no ponto crítico e pontos correspondentes à parte inferior da curva, considerada parte instável da curva de carregamento.

2.5 Diagrama de Bifurcação

Através da modelagem do Sistema e cálculo do Fluxo de Potência, existem alguns métodos para Análise Estática de um Sistema de Potência, que permitem analisar todos os pontos de estabilidade de tensão e ângulo durante o carregamento de um sistema.

Dentre as diversas técnicas de análise, este trabalho utiliza o Método da Continuação para que se tenha uma melhor precisão e detalhamento no diagrama de bifurcação a ser traçado, indicando com precisão o ponto de crítico de bifurcação e a margem de carga, baseado na referência [22].

Método da Continuação

O Método da Continuação se baseia em sucessivas variações paramétricas para traçar o diagrama de bifurcação, através de cálculo do passo previsor e corretor, até o

ponto de bifurcação, que irá ser caracterizado como ponto crítico, à partir do qual não se consegue mais nenhum acréscimo de carga.

Muito utilizado, o Método da continuação permite uma aproximação lenta na região próxima ao ponto de bifurcação, permitindo o traçado completo da curva P-V, sem a preocupação com a singularidade da Matriz Jacobiana, que será vista a seguir.

O traçado da curva é iniciado à partir do cálculo do Fluxo de Potência inicial (1pu) chamado caso base. A partir deste, indica-se o grau de carregamento ($\Delta\lambda$) que deve ser utilizado para determinar o próximo carregamento e os passos previsor e corretor darão a direção e crescimento da carga. Para melhor precisão no cálculo, este grau de carregamento pode ser ajustado durante o cálculo dos pontos da curva [20].

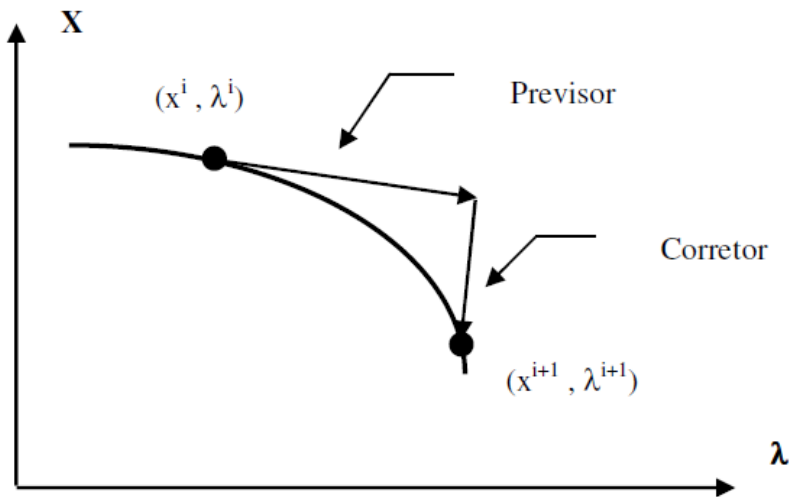


Figura 2.3 - Método da Continuação

Fonte: [22]

Verifica-se também, através do gráfico acima, que o vetor tangente no ponto (x^i, λ^i) pode ser obtido por:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_i \frac{\partial x}{\partial \lambda} \Big|_i + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Big|_i = 0 \quad (2.25) \quad \therefore \quad \frac{\partial x}{\partial \lambda} \Big|_i = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_i \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Big|_i \quad (2.26)$$

Onde:

$\frac{\partial x}{\partial \lambda}$ é o Vetor Tangente

$\frac{\partial f}{\partial x}$ é o Jacobiano do fluxo de carga

Para o ponto operativo em questão, o vetor tangente será:

$$t_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta \lambda} \quad (2.27)$$

Os componentes do vetor tangente representam a sensibilidade em ângulo e tensão .

O tamanho do passo, ou passo previsor, pode ser regulado através do inverso do vetor tangente [3]:

$$\Delta \lambda_i = \frac{k}{\|t_i\|} \quad (2.28)$$

Com a utilização do vetor tangente para o passo previsor, a parametrização é feita através da substituição da variável associada ao maior componente de t_i por λ :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \lambda \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

A direção para o próximo ponto pode ser determinada por

$$\Delta x_i = \Delta \lambda \frac{dx}{d\lambda} \quad (2.30)$$

Quanto mais próximo ao ponto de bifurcação, mais inclinada a curva, menor deverá ser o passo, por isso k assumirá diversos valores entre 0 e 1, onde:

$k > 1$ aumenta o passo

$k < 1$ diminui o passo

Quanto mais próximo ao ponto de bifurcação, menor deve ser o passo k , haja vista que a magnitude do vetor tangente aumenta quando se aproxima desse ponto.

Verifica-se, também que, a maior componente do vetor tangente pode identificar a barra crítica com antecedência.

Dado um ponto de operação (x^i, λ^i) , o novo ponto de carregamento se dará em $(\lambda^i + \Delta \lambda^i)$ e assim o passo previsor irá indicar o novo $(x^i + \Delta x^i)$, isso quer dizer, o

tamanho do passo. O passo corretor irá fazer a verificação e ajuste caso o novo ponto não seja solução de $f(x,\lambda)=0$, determinando o novo ponto (x^{i+1}, λ^{i+1}) .

O passo previsor tende a corrigir o ponto (x^{i+1}, λ^{i+1}) , visto que este não repousa sobre a superfície P-V. A literatura propõe um método corretor que se baseia em um vetor perpendicular ao passo previsor. No entanto, este trabalho utiliza o passo previsor como estimativa inicial no programa de fluxo de carga, e a solução correta é obtida com pouco esforço computacional.

2.6 Curva P-V

A curva PV permite uma análise da capacidade de carregamento e fornecimento de potência aparente S , numa análise geral de capacidade de carga do sistema.

Representa por uma curva quadrática de Potência x Tensão para cada barra, para o traçado da curva PV considera-se o acréscimo de carregamento total do sistema. O resultado dos pontos indica a relação entre o crescimento da carga e a variação de tensão do sistema como um todo. Outra vantagem da curva P-V é a informação da sensibilidade de cargas e regiões em relação à manutenção da tensão e também a fragilidade de barramentos perante um acréscimo de carregamento do sistema.

2.6.1 Método de Cálculo da Curva P-V

Os pontos para o traçado da curva P-V podem ser obtidos através de vários métodos de cálculo. O método escolhido para este trabalho foi o Método da Continuação, já explanado anteriormente.

Calcula-se o Fluxo de Potência como ponto inicial o modelo do sistema apresentado, chamado de caso base, e considerando a potência de cada barramento como 1pu.

Para o cálculo dos demais pontos é utilizado o Método da Continuação com os passos predictor e corretor. Calcula-se assim para cada carregamento de potência ativa e reativa, os novos valores de tensão e ângulo, ponto a ponto, até que o determinante do Jacobiano se torne nulo – ponto de bifurcação. Conforme vai se aproximando deste ponto, o passo predictor vai sendo reduzido visto que este depende do inverso da norma Euclidiana do vetor tangente [22].

O traçado da curva se dá através dos pontos calculados com V como variável dependente (eixo das ordenadas) e P como variável independente (eixo das abscissas).

Utilizar apenas a curva P-V para análise de um Sistema de Potência pode não ser a melhor opção, pois, como exemplo, o estudo pode indicar que a alocação de potência reativa seria suficiente para recuperação da tensão em valores admissíveis porém pode-se estar operando na faixa de instabilidade (parte inferior da curva) e a cada aumento de carga, resulta em um decréscimo maior da tensão [11].

2.6.2 Análise da Curva P-V

Como o cálculo é iniciado no fluxo de carga para o caso base, inicia-se com 1 pu Tensão e Potência.

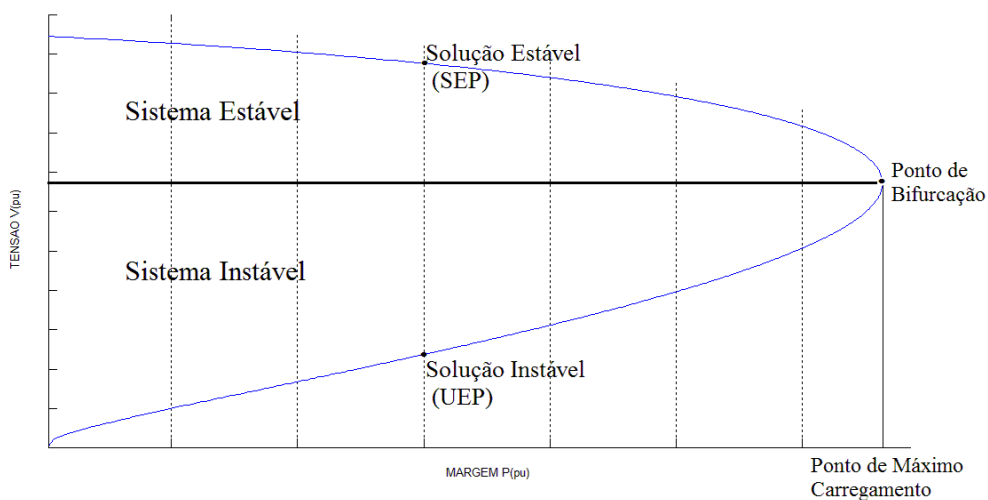


Figura 2.4 – Curva Típica P-V

Conforme o aumento do carregamento P , encontra-se valores de tensão cada vez menores que a inicial de cálculo V , e, com a aproximação do ponto crítico a redução da tensão se torna cada vez mais elevada.

Existem duas soluções de tensão para a mesma potência, uma na parte estável da curva denominada como SEP (Stable Equilibrium Point) e outra solução na parte instável UEP (Unstable Equilibrium Point), exceto no ponto crítico de bifurcação da curva onde a solução no ponto de bifurcação é única. As soluções SEP e UEP serão explanadas no estudo de Função Energia.

Com o aumento da carga, também se nota uma diminuição da distância entre as duas soluções SEP e UEP de tensão encontradas no fluxo de potência.

No ponto crítico de bifurcação, identifica-se o carregamento máximo que o sistema pode operar antes do colapso de tensão. Este ponto de máximo carregamento indica a margem de crescimento de carga que o sistema pode atingir antes do colapso de tensão.

Uma das características interessantes da curva P-V é que pode-se avaliar a curva como um todo, admitindo-se escolher pontos de colapso de tensão anteriores ao ponto de bifurcação da curva. Isso permite que seja analisando pontos de colapso com tensões com reduções limitadas, caso este do sistema elétrico real, e indicações de barras críticas podendo ser diferentes das encontradas no ponto de bifurcação. Conclui-se que a identificação da barra crítica vai depender se o estudo da curva P-V levar em consideração limites de tensão ou ângulo. Esta análise não é avaliada pois não é o objetivo deste trabalho.

Nota-se também que, com o traçado da curva P-V completa (parte estável e instável), verifica-se uma grande distância entre os pontos de SEP e UEP inicial e final. Quanto maior a criticidade de uma barra maior será esta distância, e esta característica será analisada na apresentação dos resultados dos cálculos.

Como, para este trabalho, a carga ativa e reativa são simuladas com mesmo crescimento proporcional, e, lembrando que umas das considerações iniciais foi a barras swing não apresentar limitação de fornecimento de potência ativa, conclui-se que, o sistema em estudo chega ao colapso por limitação de fornecimento de potência reativa. Por este motivo, identificou-se a necessidade do estudo da curva Q-V para avaliar a limitação de potência reativa imposta a cada barramento ou área.

2.7 Curva Q-V

Existe uma relação entre a capacidade de potência reativa que pode ser transportada entre barras (alocação de potência reativa) e a tensão existente nas mesmas já que o sistema também possui limitação de geração de potência reativa e as linhas de transmissão possuem uma limitação total para transmissão de potência. Também chamada de Curva de Sensibilidade, a curva Q-V fornece a informação dos barramentos mais sensíveis a essa transmissão de potência reativa.

2.7.1 Método de Cálculo da Curva Q-V

Para avaliar a capacidade de transmissão de potência reativa de uma barra, usa-se o artifício de simular a conexão de um gerador cuja potência ativa gerada é nula, com a tensão V assumida como uma variável independente para que possa ser calculada a capacidade de “geração” reativa na barra para cada tensão. Mantém-se a característica de carga ativa da barra constante. Portanto, para cada valor de tensão, calcula-se o ângulo correspondente da barra e depois a potência reativa que poderia ser “gerada” pela mesma. O cálculo de potência reativa gerada significa a capacidade de transmissão de potência reativa da barra em questão e não a capacidade de geração efetiva da mesma.

Este é também conhecido como Método Continuado QV, também utilizando, como visto anteriormente, o passo previsor agora dado por:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{k}{\|V_Q\|} \quad (2.31)$$

Onde:

$\|V_Q\|$ é a norma euclidiana do vetor V_Q ;

J é Jacobiano do Fluxo de Potência, com a alteração da barra de PQ para PV;

k fator de passo para aumentá-lo ou reduzi-lo

E V_Q é calculado por:

$$V_Q = J^{-1}Q_l \quad (2.32)$$

Q_l é um vetor esparço, com apenas a posição da barra em estudo com valor de 1pu

$$Q_l = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

E o passo corretor:

$$\Delta V = k \frac{V_Q}{\|V_Q\|} \quad (2.34)$$

O traçado da curva Q-V se dá através dos pontos calculados com Q como variável dependente (eixo das ordenadas) e V como variável independente (eixo das abscissas).

2.7.2 Análise da Curva Q-V

Para uma análise no gráfico Q-V, a linha onde $Q_c=0$ indica o ponto real de operação do sistema (O e O'). Demais pontos gerados pela curva QV são valores fictícios de geração, como já comentado.

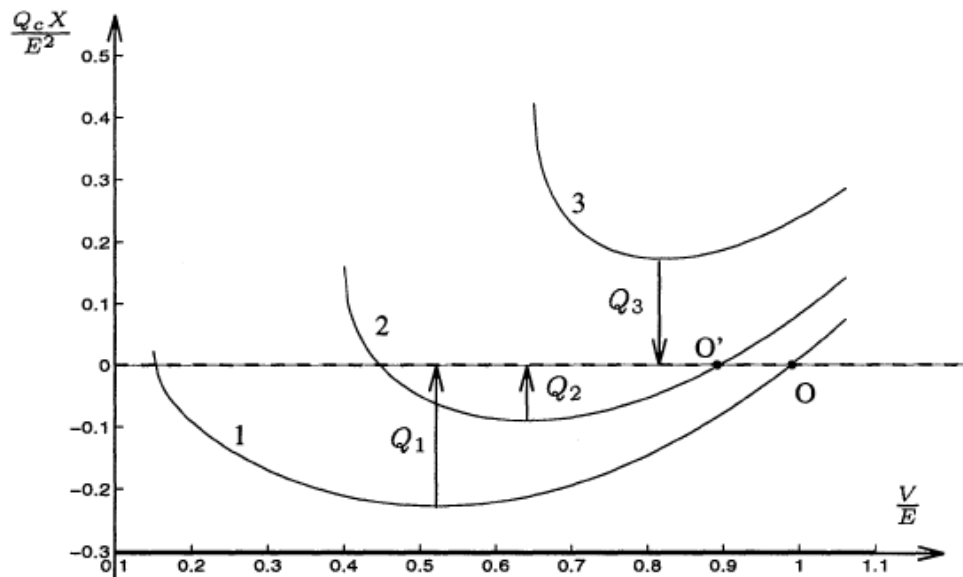


Figura 2.5 – Análise das Curvas Q-V Geradas

Fonte: [23]

Pontos das curvas Q-V acima da linha $Q_c=0$ (curva 3) indicam que o sistema não pode operar nessa situação sem que haja injeção de potência reativa (compensação na barra) e informa a distância que o sistema está de um ponto operativo mínimo para o sistema. Através do mesmo, pode-se dimensionar uma compensação reativa local para que o sistema possa operar com um mínimo de folga possível (ou até uma reserva de transmissão de potência reativa) em relação à capacidade de transmissão reativa. O ponto de compensação mínima é indicado pelo ponto O, para a tensão mínima de operação requerida. O ponto O' indica a compensação necessária para se atingir a tensão de 1pu.

O ponto mínimo de cada curva (que pode ser obtido por $dQ/dV=0$) é chamado de ponto crítico e sua distância ao eixo x, indica a margem de potência reativa, isto é, o índice de confiabilidade do sistema, em relação à potência reativa.

Se o ponto de operação estiver do lado direito da curva, o sistema é dito estável, portanto, caso haja uma compensação de carga reativa no barramento, obtém-se acréscimo de tensão no mesmo. Porém, se o ponto operativo estiver do lado esquerdo da curva, o sistema é considerado instável, levando o sistema a pontos operativos de difícil convergência, podendo chegar ao colapso de tensão.

Quanto mais próximo o sistema elétrico estiver do ponto de máximo carregamento, menor a margem de carga reativa de cada barramento.

Vê-se através do gráfico abaixo que, conforme aumenta-se o carregamento do sistema, lembrando que o gráfico acima é tipo P-V mas não indica somente um aumento de potência ativa e sim um aumento do carregamento total do sistema (potência ativa e reativa), como já visto anteriormente. Conforme altera-se o estado de carregamento do sistema $p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3$, a margem de potência reativa, indicada pela curva Q-V correspondente, também reduz. Conforme aumenta-se o carregamento, a curva Q-V correspondente chega ao ponto de mínima margem de potência reativa (MCR3=0), isto corresponde à capacidade de máximo de transmissão de potência reativa da barra, para níveis maiores de transmissão, é necessário um suporte de potência reativa (compensação) na mesma, que é a curva Q-V sobre o eixo das abcissas (curva azul). Portanto, quando mais carregado estiver o barramento, o gráfico Q-V correspondente irá indicar uma menor margem de potência reativa.

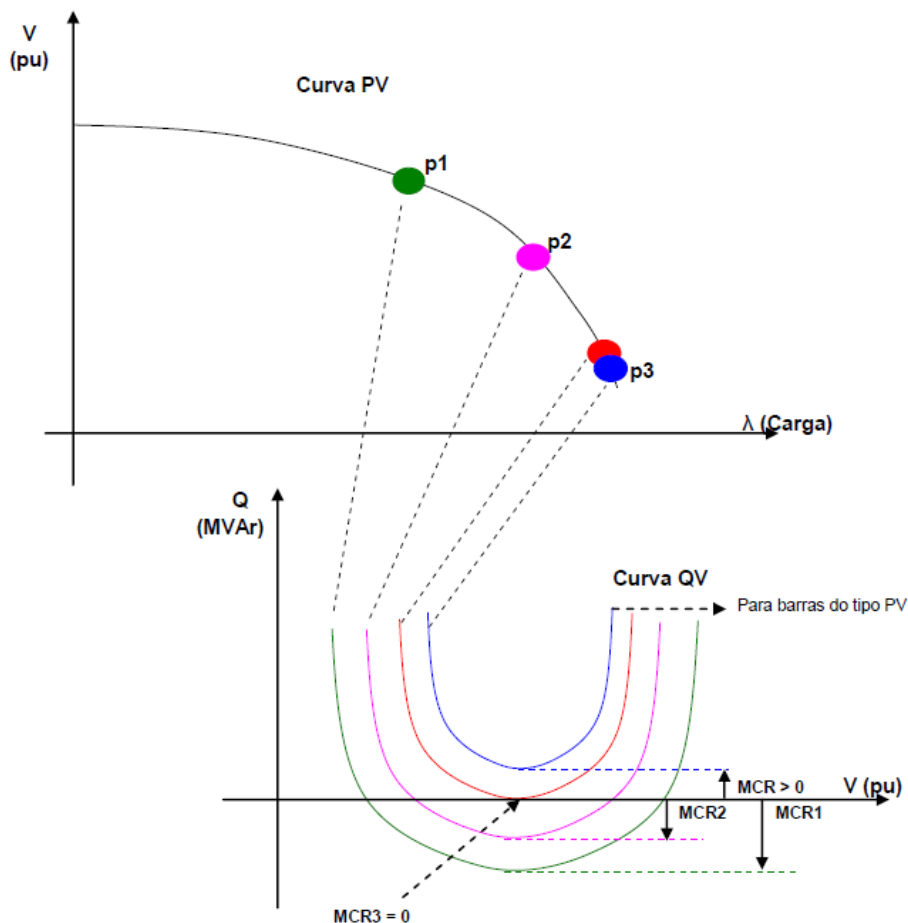


Figura 2.6 - Relação das curvas P-V e Q-V

Fonte: [24]

Avaliando-se então a curva Q-V, consegue-se analisar a capacidade de transmissão de potência reativa de cada barramento, de forma individual. Pelo traçado da curva P-V, avalia-se o carregamento do sistema como um todo. Para análise de um sistema de potência, seria de grande interesse uma ferramenta computacional que relacionasse as informações das curvas P-V e Q-V.

2.7.3 Motivação para o Estudo da Curva Q-V

O limite de estabilidade de tensão (Ponto de Funcionamento Crítico) é atingido quando a derivada é nula. Assim sendo, nas curvas Q-V, o lado direito em relação ao mínimo representa o funcionamento estável, enquanto que o lado esquerdo representa o funcionamento instável: sensibilidade se torna infinita no limite de Estabilidade; sensibilidade positiva indica operação estável; sensibilidade negativa indica instabilidade.

De maneira similar à curva P-V, curvas Q-V com distanciamento maior entre pontos SEP e UEP indicam maior sensibilidade do barramento em relação às variações do nível de tensão. A “margem de potência reativa” é a diferença entre o ponto de operação (onde a curva Q-V corta o eixo das abscissas – $MVAr=0$) e o valor de potência reativa no ponto de bifurcação da curva Q-V.

A curva Q-V é traçada através de uma simulação, trocando-se a condição de barras PQ para PV, supondo as mesmas com tensão controlada, com se houvesse um gerador de potência reativa no barramento. O ponto de bifurcação da curva irá indicar o déficit de potência reativa da linha. Déficit este ligado à possibilidade de transmissão de potência do barramento e qual a potência reativa necessária no barramento para manter o nível de tensão indicado no cálculo [23].

Curvas Q-V que apresentem ponto mínimo da curva (máximo carregamento de potência reativa) acima do eixo horizontal representam barras com deficiência de potência reativa. Portanto, quanto maior a bacia da curva Q-V abaixo do eixo das abscissas, maior a margem de potência reativa. No ponto de máximo carregamento calculado pela curva P-V, a curva QV intercepta o eixo horizontal, indicando que o barramento atingiu seu limite natural de transmissão de potência reativa.

O valor de tensão correspondente ao ponto mínimo da curva ($dQ/dV=0$) é considerado como nível crítico de tensão, ou limite de estabilidade de tensão, a partir do qual, o sistema opera de forma instável onde redução no nível de tensão indicará um aumento de geração de potência reativa na barra estudada.

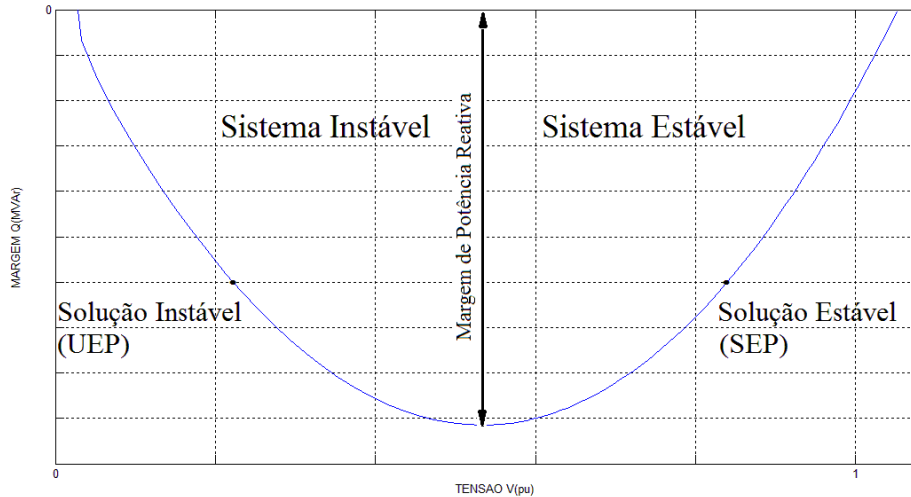


Figura 2.7 - Curva Típica Q-V

Lembrando que, por ser estudo por barra, esta análise é considerada local. A curva Q-V não avalia o comportamento das demais barras perante o carregamento do restante do sistema porém pode avaliar a influência de cada barra no sistema e auxiliar no estudo de alocação de potência reativa.

Utilizar apenas a curva Q-V para análise de um Sistema de Potência não é a melhor opção, pois pode levar a erros, como identificado em [11].

Capítulo 3

Função Energia

3.1 Introdução

A Técnica da Função Energia foi inicialmente empregada para estudo de estabilidade transitória [25]. O método consiste em calcular a energia total de um sistema (potencial e cinética) em um determinado instante para cada carregamento do sistema.

Para Análise Estática, somente a energia potencial do sistema é considerada já que o Sistema em equilíbrio não apresenta a parte transitória.

O estudo da Função Energia é visto como um auxiliar no Estudo de Estabilidade de Tensão pois ajuda a indicar a sensibilidade da margem de carga, onde o Jacobiano do sistema torna-se singular [26].

O sistema pode atingir a instabilidade de maneira rápida (alguma contingência no sistema, ações de controle ou perda de geração) ou o ponto operativo pode mudar gradualmente. O método comum de análise da margem de estabilidade é feito através do estudo de fluxo de potência visualizando o decréscimo da tensão. Porém há casos onde o colapso pode ocorrer em sistemas onde a margem estabelecida de tensão nunca foi violada [27], principalmente em sistemas que trabalham próximo à margem de carga.

A proposta, então é comparar o estudo do Fluxo de Potência com a Função Energia do Sistema para melhor análise da sensibilidade e assim, aumentar a segurança do sistema.

A Função Energia é baseada no Método de Lyapunov. A Função de Lyapunov pode ser utilizada em funções de estado escalares, localmente positivas sobre um equilíbrio estável e não crescentes ao longo de suas trajetórias. Para o Sistema Elétrico, comparamos a função de estado como a Função Energia do Sistema. O estado de operação de um sistema indica sua energia mínima local. As variações de carregamento do sistema são caracterizadas como variações de energia.

Em operações próximas à capacidade de carregamento do sistema ou em variações muito bruscas de operação, a energia cinética empurra o novo ponto de operação para fora do ponto de operação estável. Para que isso ocorra, essa energia cinética excessiva deve ser maior que o valor de energia potencial do ponto de equilíbrio instável (UEP) no limite do “poço”. Esses pontos são normalmente associados à pontos de baixa tensão, por isso o estudo de margem de carga com a Função Energia é também referenciado como Soluções de Baixa Tensão para o Fluxo de Potência. Para retornar a pontos do equilíbrio estável (SEP) após a perturbação, a energia potencial pós falta tem que ser maior que a UEP de menor energia.

3.2 Lyapunov e a Estabilidade

O primeiro trabalho teórico sobre Estabilidade foi publicado por Lyapunov em 1892 [28]. Neste, é determinado o comportamento de sistemas não lineares com o auxílio de uma função escalar com características semelhantes à energia associada ao sistema, conhecida hoje como Função de Lyapunov. À partir dos anos 60, esse trabalho foi estudado e aprimorado pela comunidade científica e, atualmente, são conhecidos dois conceitos para estudo de estabilidade através dos estudos de Lyapunov: Método da Linearização de Lyapunov, conhecido como 1º método e o Método Direto, conhecido como 2º método.

3.2.1 – Modelos de um Sistema

Dentre as formas de se representar um sistema (linear ou não-linear), têm-se o modelo de estado. Chama-se Estado de um Sistema o conjunto de variáveis $x_i(t)$ que, com suas variáveis de entrada $u_j(t)$ e um ponto inicial $x_i(t_0)$, definem o comportamento desse sistema, utilizando um sistema de equações diferenciais escalares de 1ª ordem:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = f_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ \dot{x}_2(t) = f_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ \dots \\ \dot{x}_n(t) = f_n[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \end{cases} \quad (3.1)$$

As variáveis $x_i(t)$ são, portanto, conhecidas como variáveis de estado. As variáveis de saída $y_i(t)$ são definidas através das variáveis de estado:

$$\begin{cases} y_1(t) = h_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ y_2(t) = h_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ \dots \\ y_n(t) = h_n[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \end{cases} \quad (3.2)$$

Reescrevendo em forma vetorial, obtém-se:

Vetor de Estado

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Vetor de Entrada

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Vetor de Saída

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$f(x, u, t) = \begin{bmatrix} f_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ f_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ \dots \\ f_n[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

e

$$h(x, u, t) = \begin{bmatrix} h_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ h_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \\ \dots \\ h_n[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t] \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Portanto, o Modelo de Estado do Sistema será:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] & (3.8) \\ y(t) = h[x(t), u(t), t] & (3.9) \\ x(t) = x_0 & (3.10) \end{cases}$$

Estas equações são válidas se, $x \in D_x \subset \mathfrak{R}^n, u \in D_u \subset \mathfrak{R}^p, y \in D_y \subset \mathfrak{R}^q$ e $t \in \mathfrak{R}^+$.

3.2.2 – Estabilidade

Conforme a 2ª lei de Newton: “A taxa de variação da quantidade de movimento de um corpo é igual à força aplicada a este corpo” [29]:

$$\frac{\partial(mv)}{\partial t} = f \quad (3.11)$$

Onde:

m é a massa do corpo

v velocidade de deslocamento do corpo

f é a força aplicada sobre este corpo

Portanto, sistemas dinâmicos podem ser descritos por equações diferenciais de n ordens. Toda equação diferencial de ordem n pode ser decomposta em n equações diferenciais

de primeira ordem sendo $x_1 = x$ e $x_2 = \dot{x}$ então $\ddot{x} = \dot{x}_1 = x_2$.

que podem depender de suas próprias variáveis de estado (x_n), depender do tempo(t) e depender de fatores externos(u):

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad (3.12)$$

Considera-se um Sistema autônomo quando sua função f não depender explicitamente do tempo.

O Sistema de Potência em estudo será considerado autônomo, isso que dizer será considerado que suas variações ocorrerão apenas dependentes de suas variáveis de estado (x_n), independentes, neste caso, do tempo.

Define-se, então, a Equação de Estado como:

$$\dot{x}(t) = f(x) \quad (3.13)$$

O Estado de Equilíbrio de um sistema de equações diferenciais de primeira ordem é caracterizado por $\dot{x}(t) = f(x) = 0$, isso quer dizer que o sistema está estável, com variação nula. Portanto, encontrar o ponto de equilíbrio de um sistema de n equações diferenciais de primeira ordem é encontrar os zeros de um sistema de n equações e n incógnitas.

3.3 Definição de Estabilidade por Lyapunov

O ponto de equilíbrio x é estável em um sistema autônomo, se para um real ε sendo $\varepsilon > 0$, e $t_0 > 0$, existir um $\delta > 0$ dependente de ε ($\delta \subset \varepsilon$) tal que para todo ponto inicial x_0 satisfazendo $\|x_0\| < \delta$ e $\|x(t)\| < \varepsilon$ para todo $t \geq t_0$ [30].

Isso quer dizer que, um ponto de equilíbrio x é estável se, um ponto originado em δ , a solução não se afasta significativamente desse ponto com o passar do tempo, mantendo-se dentro da Região em ε , isto é, o efeito do distúrbio causa uma mudança de estado no sistema mas mantém o mesmo dentro de uma região estável considerada Área de Atração.

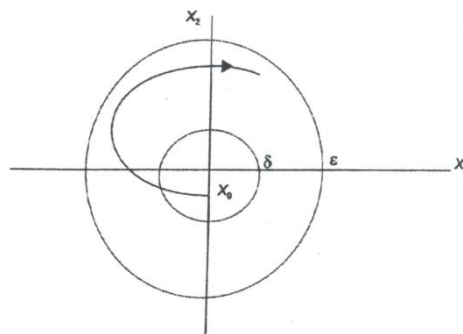


Figura 3.1 - Ilustração de Sistema Estável

Fonte: [30]

Ponto de equilíbrio é considerado assintoticamente estável se a solução, iniciada nesse ponto de equilíbrio x_0 ou em sua vizinhança (em δ), com o tempo, oscilando na região em ε , convergir para um ponto na região em δ , isto é, o efeito do distúrbio desaparece com o tempo.

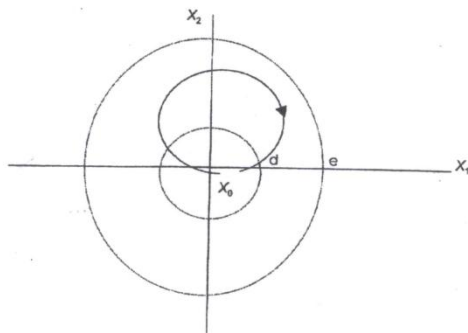


Figura 3.2 - Ilustração de Sistema Assintoticamente Estável

Fonte: [30]

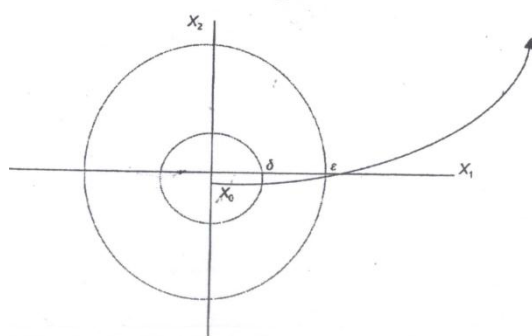


Figura 3.3 - Ilustração de Sistema Assintoticamente Instável

Fonte: [30]

Um ponto de equilíbrio é considerado Marginalmente Estável se o mesmo for estável mas não for assintoticamente estável.

Ponto de equilíbrio é considerado instável se a solução, iniciada nesse ponto de equilíbrio, com o tempo se afastar deste mesmo ponto e, portanto, sair da Região de Estabilidade em ϵ .

3.3.1 – Primeiro Método de Lyapunov – Método da Linearização

Através da Equação de Estado $\dot{x}(t) = f(x)$, admita-se que a função f é de primeira ordem. Nestas condições

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=0} x \quad (3.14)$$

Onde $\frac{\partial f}{\partial x}$, representa o primeiro termo do desenvolvimento de $f(x)$ em série de

Taylor. Note que $\frac{\partial f}{\partial x}$ representa a matriz Jacobiana de $f(x)$, representada abaixo por

A:

$$\dot{x} = Ax(t) \quad (3.15)$$

Considerando-se um sistema linear autônomo:

$$\dot{x} = Ax \quad (3.16)$$

Caso o sistema seja simples, a matriz A é regular, com um único ponto de equilíbrio na origem, como visto anteriormente.

O Método da Linearização de Lyapunov parte da análise da matriz A para concluir sobre a estabilidade do sistema:

- se o Sistema Linearizado for estável, o sistema não linear é assintoticamente estável;
- se o Sistema Linearizado for instável, o sistema não linear é instável;
- se o Sistema Linearizado for marginalmente estável, nada se pode concluir do sistema não linear, onde termos de ordem superior desempenham papel decisivo no comportamento do Sistema não-Linear.

Se o valor do estado estiver próximo do equilíbrio, o Sistema Linearizado representa, com bastante aproximação, o Sistema não-Linear de partida.

Para encontrar os Pontos de Equilíbrio x_e , resolve-se o sistema de equações onde:

$$\dot{x} = Ax_e = 0 \quad (3.17)$$

Se A for uma matriz regular, a única solução é a origem de espaço de estados, $x_e = 0$, designado por Sistema Linear Simples.

Se A for uma matriz singular, a equação admite um número infinito de soluções.

3.3.2 – Segundo Método de Lyapunov – Método Direto

O Método Direto permite análise da estabilidade de um sistema através da função escalar de estado designada Função de Lyapunov, que pode ser encarada como uma extensão do conceito de conservação de Energia. Qualquer sistema possui, habitualmente, dissipação ou amplificação de energia. Sempre que a dissipação for superior à amplificação, a energia do sistema irá decair e as variáveis tenderão para zero. Estudando a energia associada a um sistema podemos avaliar seu comportamento e sua estabilidade.

Designa-se função de Lyapunov $V(x)$, quando a mesma está posicionado no interior de uma bola de raio R , centrada na origem x_e e se:

$$V(x) > 0, \text{ para } x \neq 0, \quad V(0) = 0 \text{ sendo } x = 0 \text{ o ponto de equilíbrio} \quad e$$

$$\dot{V}(x) \leq 0, \text{ para } x \neq 0, \quad \dot{V}(0) = 0 \quad e$$

$$V(x) \rightarrow \infty \text{ quando } \|x\| \rightarrow \infty$$

Onde a expressão $\dot{V}(x) \leq 0$ indica que a trajetória de $V(x)$ se aproxima da origem (sistema tendendo à estabilidade).

Então diz-se que o ponto de equilíbrio $x_e = 0$ é localmente estável, para as condições acima em que $\dot{V}(x) \leq 0$ for definida.

A última condição diz que a função é radialmente ilimitada e, observe pela figura 3.4 que as curvas de nível não se cruzam, portanto, para cada sistema linearizado nas condições acima, obtém-se uma função de Lyapunov definida e fechada.

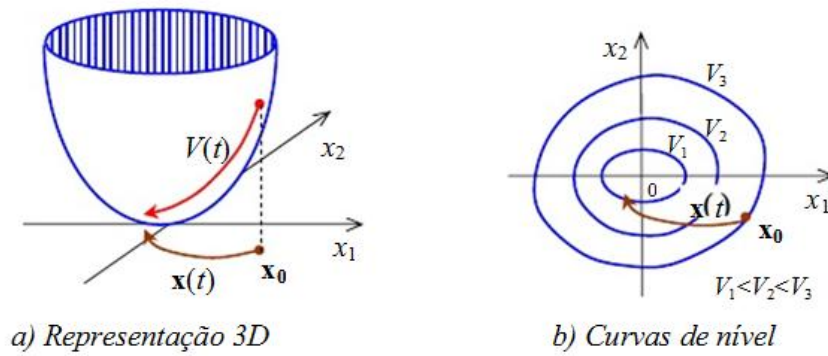


Figura 3.4 - Representação geométrica de uma função Lyapunov

Fonte: [28]

Retomando as definições de Sistema autônomo Linearizado:

$$\dot{x} = Ax \quad (3.18)$$

Dado o vetor $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ de componentes reais, a forma quadrática do escalar pode ser definido pelo polinômio:

$$V(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} x_i x_j \quad (3.19)$$

com coeficientes p_{ij} reais.

A expressão pode ser reescrita pela forma matricial, com P positiva e definida, como a Função de Lyapunov:

$$V(x) = x^T P x = \langle x, P x \rangle \quad (3.20)$$

Um dos métodos para se obter a Função Lyapunov é o método do gradiente variável. Para utilizá-lo, parte-se da integral:

$$V(x) = \int_0^x \nabla V(\xi) \cdot d\xi \quad (3.21)$$

Onde ∇V é o gradiente de $V(x)$ dado por:

$$\nabla V(x) = \left[\frac{\partial V}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial V}{\partial x_n} \right]^T \quad (3.22)$$

Considerando-se que o rotacional do gradiente é identicamente nulo, impõe-se a condição:

$$\frac{\partial \nabla V_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \nabla V_j}{\partial x_i} \quad (3.23)$$

Então o método do gradiente assume, para uma forma linear do estado:

$$\nabla V_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (3.24)$$

Para facilitar o método, segue-se os passos:

- 1- Construir $\nabla V(x)$ como combinação linear de estado;
- 2- Impor a $V(x)$ a condição rotacional indicada acima;
- 3- Impor aos coeficientes a condição de $\dot{V}(x)$ ser negativa semidefinida;
- 4- Obter $V(x)$ por integração de $\nabla V(x)$;
- 5- Verificar de $V(x)$ é positiva definida para que o sistema seja assintoticamente estável.

Exemplo:

Seja o sistema

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -2x_1 \\ \dot{x}_2 = -2x_2 + 2x_1x_2^2 \end{cases}$$

Seguindo os passos, têm-se:

$$1 - \begin{cases} \nabla V_1(x) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \\ \nabla V_2(x) = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \end{cases}$$

$$2 - \frac{\partial \nabla V_1}{\partial x_2} = \frac{\partial \nabla V_2}{\partial x_1} \quad \therefore \quad a_{12} + x_2 \frac{\partial a_{12}}{\partial x_2} = a_{21} + x_1 \frac{\partial a_{21}}{\partial x_1}$$

3 – Escolhendo valores que satisfazem a equação acima:

$$a_{11} = 1, a_{22} = 1, a_{12} = 0, a_{21} = 0 \quad \therefore \quad \begin{cases} \nabla V_1(x) = x_1 \\ \nabla V_2(x) = x_2 \end{cases}$$

4 – E usando método trapezoidal para solução da integral

$$V(x) = \int_0^{x_1} \nabla V_1 dx_1 + \int_0^{x_2} \nabla V_2 dx_2 = \int_0^{x_1} x_1 dx_1 + \int_0^{x_2} x_2 dx_2 = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)$$

5 – Como $V(x)$ é positiva definida e que

$$\|x\| \rightarrow \infty \therefore V(x) \rightarrow \infty$$

Então o sistema é assintoticamente estável.

De modo geral, para estudar o comportamento, busca-se pontos de equilíbrio. Portanto, analisando-se a Energia de um sistema através do Método Direto, obtém-se um caminho para área de atração, região em que o sistema tende a um ponto de equilíbrio.

Para que uma função possa retornar a um ponto de equilíbrio após sofrer um distúrbio ele deverá atender os requisitos da Função de Lyapunov, onde seja possível encontrar uma função escalar $V(x)$ que represente este sistema, tal que seja sempre positiva $V(x) > 0$, e que para o ponto $x=x_e$ (ponto de equilíbrio), $\dot{V}(x) = 0$. O sistema que atender a esses requisitos Após um distúrbio, retornará ao ponto x_e após um distúrbio [31].

Para que um Sistema retorne a um ponto de equilíbrio x_e , deverá ser considerado Assintoticamente Estável, isso quer dizer que, na região Ω , onde $V(x) > 0$ e $\dot{V}(x) = 0$, todas as trajetórias partindo de Ω convergem para a origem quando $t \rightarrow \infty$.

Portanto, para que um sistema é considerado estável na região Ω (região essa vizinha à origem) quando $V(x) > 0$ e $\dot{V}(x) \leq 0$. Existirá um ponto de equilíbrio x_e , em que $\dot{V}(x) = 0$, e todas as trajetórias irão convergir para este ponto [29].

3.4 – Região de Estabilidade

Região de Estabilidade ou Área de Atração da Origem é o intervalo de x onde o resultado de suas variações convergem para origem, então estáveis, é portanto a vizinhança do ponto de equilíbrio onde o sistema ainda tende a se manter estável, retornando a um ponto de equilíbrio.

As perturbações que causam instabilidade podem causar acelerações ou desacelerações entre as máquinas até que o sistema recupere a estabilidade. O Sistema Elétrico de Potência deve operar na Região de Estabilidade, isto é, operar em um Limite de Estabilidade em que as perturbações não levem o Sistema à instabilidade. Esse Limite é a máxima potência que pode ser transmitida sem perda de estabilidade, levando-se em consideração uma margem de segurança contra imprevistos [32]. Essas perturbações podem ser variações rápidas de cargas, perdas de unidades geradoras ou chaveamento de linhas.

Estudos de Estabilidade Dinâmica envolvem máquinas que sofrem mudanças graduais nas condições de operação. A diferença entre estudo de Estabilidade Dinâmica e o de Estabilidade em Regime Permanente se dá apenas no detalhamento da resposta da máquinas.

Dinâmica ou Transitória, o estudo de Estabilidade deve levar em consideração que nas máquinas síncronas, perturbadas, a velocidade do rotor se desvia da velocidade síncrona e pode ou não retornar à mesma após o Sistema Elétrico reassumir o regime estável.

Estudos de Estabilidade Transitória envolvem grandes perturbações, devendo-se representar com maior detalhamento possível as máquinas e cargas ativas no sistema. Esse modelo detalhado atrapalha a linearização já que envolvem equações algébricas e diferenciais não-lineares.

3.5 Função Energia

Construir uma Função Lyapunov para Sistemas Elétricos de Potência, não é trivial já que simplificações devem ser assumidas, como desconsiderar as condutâncias de transferência nas equações de rede. Como as mesmas são importantes para o estudo do comportamento do sistema, buscou-se uma nova função onde as perdas em linha e equações representativas de máquinas complexas com modelos mais completos possam ser consideradas. Para tal, baseando-se na ideia original de Lyapunov de um sistema conservativo e de um ponto de equilíbrio, surgiram os primeiros estudos de Função Energia.

Este método utiliza a Função Energia Transitória de um sistema que, a partir de um ponto de equilíbrio sofre um distúrbio. A análise da Função Energia avalia se após este distúrbio, o sistema retornará a um ponto de equilíbrio.

Em 1958, Aylett propôs uma Função de Energia baseada na função de Lyapunov, multiplicando cada equação de aceleração relativa de cada máquina com suas velocidades relativas e, a partir de um processo de integração, a função energia total era obtida [25]. A partir deste, vários outros estudos se desenvolveram para que o sistema elétrico possa ser representado em estudos de estabilidade de tensão.

A Função Energia pode ser literalmente descrita como uma bola colocada dentro de uma superfície cilíndrica irregular (um poço) que, no caso estudado, representa os vários pontos de equilíbrio do Sistema de Potência. A área dessa superfície representa a Região de Estabilidade [11]. Portanto, fazendo uma analogia com os Métodos de Lyapunov, enquanto a bola se mantiver dentro do poço, ela vai tender ao ponto estável (xs), ou SEP (Stable Equilibrium Point).

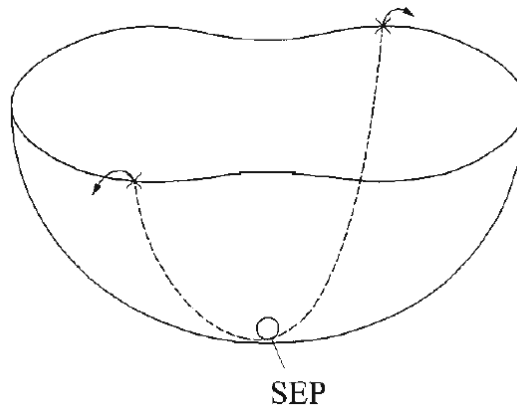


Figura 3.5 - Bacia de Energia para SEP

Fonte: [11]

No acontecimento de um grande distúrbio no sistema é fornecida uma energia inicial cinética ao mesmo, a bola irá converter a Energia Cinética em Potencial. essa energia faz a bola se mover na mesma direção da força aplicada. Se esta energia for menor do que a energia de um ponto de equilíbrio instável (x_u) ou UEP (Unstable Equilibrium Point), de menor energia do sistema pós-distúrbio, o sistema retornará para o ponto de equilíbrio pós-falta (x_s).

O poço tem um ponto de equilíbrio assintoticamente estável no ponto de mínimo da função de energia potencial(x_s), e um ponto de equilíbrio instável(x_u), no ponto de máximo.

Assume-se que a bola está inicialmente no ponto (x_s) e é deslocada deste ponto por um distúrbio. O problema é determinar se, após o distúrbio, a bola retornará ao ponto (x_s) [33].

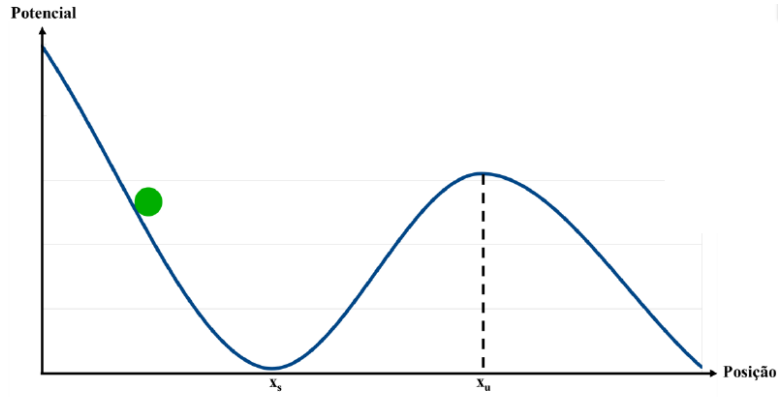


Figura 3.6 - Energia Potencial de um Sistema

Fonte: [33]

Lembrando que, para um Sistema de Potência, as equações de Potência Ativa e Reativa de cada barra é dada por:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.25)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.26)$$

Para esse mesmo Sistema, podemos definir V e θ como, respectivamente, a amplitude da tensão (em módulo) e ângulo de uma barra e que f e g podem ser definidas como as potências ativa e reativa da barra, com a Potência Reativa multiplicada por V_i^{-1} (tornando todos os termos de g dependentes de V ou θ , para que tenha todos os termos integráveis em V ou θ quando do cálculo da Função Energia):

$$f(\theta, V) = P_i - \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (3.27)$$

$$g(\theta, V) = (V_i)^{-1} \left[Q_i - \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (3.28)$$

Apenas para um Sistema sem perdas, a Função Energia \mathcal{G} é Função Lyapunov. Para que possamos considerar as perdas do Sistema, um artifício é redefinir f e g inserindo as perdas nos barramentos:

$$f(\theta, V) = P_i - \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) - \sum_{j=1}^m G_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i^s - \theta_j^s) \quad (3.29)$$

$$g(\theta, V) = (V_i)^{-1} \left[Q_i + \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right] - (V_i^s)^{-1} \left[\sum_{j=1}^m G_{ij} V_i V_j \sin(\theta_i^s - \theta_j^s) \right] \quad (3.30)$$

Os termos inseridos nas equações de f e g permitem que, para solução estável (SEP), se igualem a zero, o que significa dizer que, para solução estável, a energia cinética originada de um distúrbio é absorvida e o Sistema encontra um novo ponto de operação estável.

A Função Energia é dada pelas equações abaixo, encontradas nas referências [1],[34], [35], [36] dentre outras:

$$\mathcal{G}(x^u, x^s) = \mathcal{G}(\omega, \theta, V) = \int_{x^s(0, \theta^s, V^s)}^{x^u(\omega^u, \theta^u, V^u)} \left[M_g \omega, f(\theta, V), g(\theta, V) \right]^T (d\omega, d\theta, dV)^T \quad (3.31)$$

Como para este estudo não será considerada a parte transitória, onde a velocidade angular é considerada nula para qualquer ponto ($\omega = 0$), portanto:

$$\mathcal{G}(x^u, x^s) = \mathcal{G}(\theta, V) = \int_{x^s(\theta^s, V^s)}^{x^u(\theta^u, V^u)} \left[f^T(\theta, V), g^T(\theta, V) \right] d\theta, dV^T \quad (3.32)$$

Onde:

x^s é a solução estável em $[\theta^s, V^s]$ chamado de SEP (Stable Equilibrium Point), ou solução de alta tensão;

x^u é a solução instável em $[\theta^u, V^u]$ chamado de UEP (Unstable Equilibrium Point), ou solução de baixa tensão.

As soluções do fluxo de carga formam um conjunto de soluções do sistema de potência. Estas soluções podem ser classificadas de acordo com os autovalores da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Para um sistema com n barras, obtém-se 2^{n-1} soluções. A classificação de cada solução determina a escolha dos pontos SEP e UEP [37], [38]:

- Solução Estável: determina o ponto operativo do sistema (SEP).
É caracterizado por todos os autovalores com parte real negativa.
- Solução Instável Tipo 1: determina a solução instável.
É caracterizado por um único autovalor com parte real positiva.
- Solução Instável Tipo 2: determina a solução instável.
É caracterizado por dois autovalores com parte real positiva.

À medida que o sistema se aproximado colapso, o número de soluções tende a diminuir, até que exista apenas uma solução estável e uma solução instável. No ponto de bifurcação, as duas soluções são a única solução. Estudos sobre comportamento das soluções instáveis [37], indicam que encontra-se uma bifurcação tipo sela-nó entre a solução estável e a solução instável tipo1. As outras soluções instáveis desaparecem em bifurcações intermediárias, não interessantes para o estudo do carregamento do sistema. Portanto, para este trabalho, foram consideradas as soluções estáveis e instáveis tipo 1.

Resolvendo a integração [26], [35], [39]:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}(x^s + x^u) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i^u V_j^u \cos(\theta_i^u - \theta_j^u) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m B_{ij} V_i^s V_j^s \cos(\theta_i^s - \theta_j^s) \\
 & - \sum_{i=1}^m \int_{V_i^u}^{V_i^s} \frac{Q_i}{V} dV - \sum_{i=1}^m P_i (\theta_i^u - \theta_i^s) \\
 & + \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^m G_{ij} V_i^s V_j^s \cos(\theta_i^s - \theta_j^s) (\theta_i^u - \theta_i^s) \right] + \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^m G_{ij} V_j^s \sin(\theta_i^s - \theta_j^s) (V_i^u - V_i^s) \right] \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

Para barras de carga com potência reativa constante, o termo dependente de Q_i da equação acima, torna-se:

$$\sum_{i=1}^m \int_{V_i^u}^{V_i^s} \frac{Q_i}{V} dV = \sum_{i=1}^m Q_i \ln \left(\frac{V_i^u}{V_i^s} \right) \quad (3.34)$$

A função de energia será explorada nos testes em conjunto com as informações obtidas pelas curvas P-V e Q-V, especialmente no auxílio de interpretação de análise de contingências.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos pela metodologia descrita nos capítulos anteriores. Utilizando-se programas baseados no fluxo de carga e método da continuação, foram calculados os pontos de máximo carregamento, pontos de colapso de tensão e margem de potência reativa para cada sistema de potência apresentado no Apêndice.

4.2 Sistema de Teste de 2 Barras

Serão apresentados os resultados dos cálculos da Curva P-V e Q-V para o Sistema de 2 Barras.

Curva P-V para o Caso Base – Sistema 2 Barras

Máximo carregamento obtido em $\lambda = 15,28\text{pu}$ e colapso de tensão em $V=0,674\text{pu}$ na Barra 2 (figura 4.1).

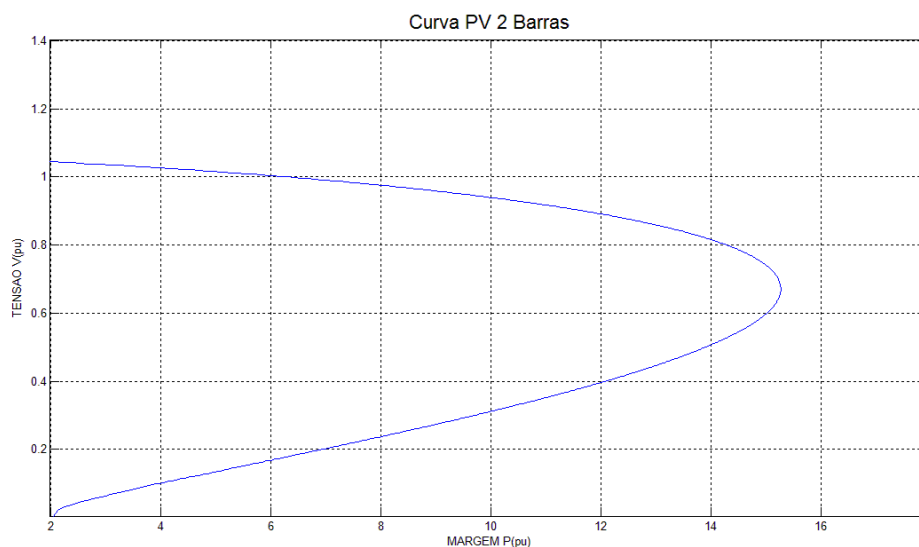


Figura 4.1 – Curva P-V – Caso Base para Barra 2 - Sistema 2 Barras

Curva Q-V para o Caso Base – Sistema 2 Barras

Margem de potência reativa obtida pela curva Q-V de $MQ=-457,6\text{MVAr}$ obtido para tensão $V=0,674\text{pu}$ na Barra 2 (figura 4.2).

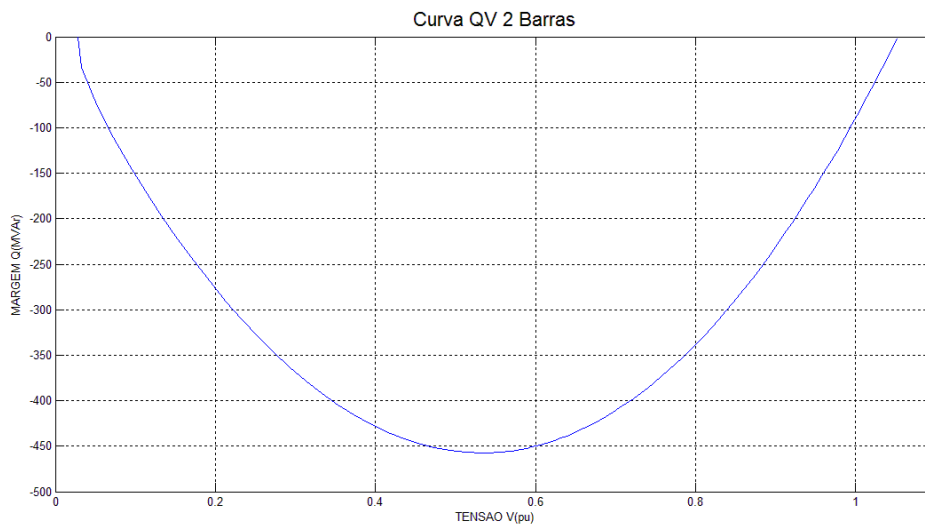


Figura 4.2 – Curva Q-V – Caso Base para Barra 2 - Sistema 2 Barras

Análise entre as curvas P-V e Q-V – Sistema 2 Barras

Uma particularidade do sistema de 2 barras é que, os pontos iniciais SEP da curva P-V e Q-V são semelhantes. O mesmo vale para os pontos finais UEP de ambas as curvas.

Observa-se na figura 4.1 que para ponto de carregamento 1pu, a tensão estável do ponto SEP é de 1,053pu e a tensão instável do ponto UEP é de 0,024pu e observa-se que na figura 4.2, para ponto de carregamento 1pu (onde $MQ=0$), a tensão estável do ponto SEP é de 1,052pu e a tensão instável do ponto UEP é de 0,028pu. Porém esta semelhança é encontrada apenas para este caso teste. No entanto, esta característica será estendida adiante para um sistema maior, quando a técnica da função energia for empregada.

A semelhança entre as soluções estável e instável é encontrada a penas para este caso teste e será explorada para sistemas maiores, quando a técnica da função energia for empregada.

Outra característica da curva Q-V que pode ser verificada é que, conforme o aumento do carregamento do sistema, obtém-se margens cada vez menores de potência reativa do barramento.

Lembrando que quanto maior o valor negativo encontrado nas curvas Q-V, maior a margem de potência reativa da barra.

Observando-se para o sistema de 2 barras com carregamento em 1 pu e 2pu de carregamento (figura 4.3), obtém-se margens de potência reativa de $MQ_{1pu} = -457,6MVAR$ e $MQ_{2pu} = -449,9MVAR$:

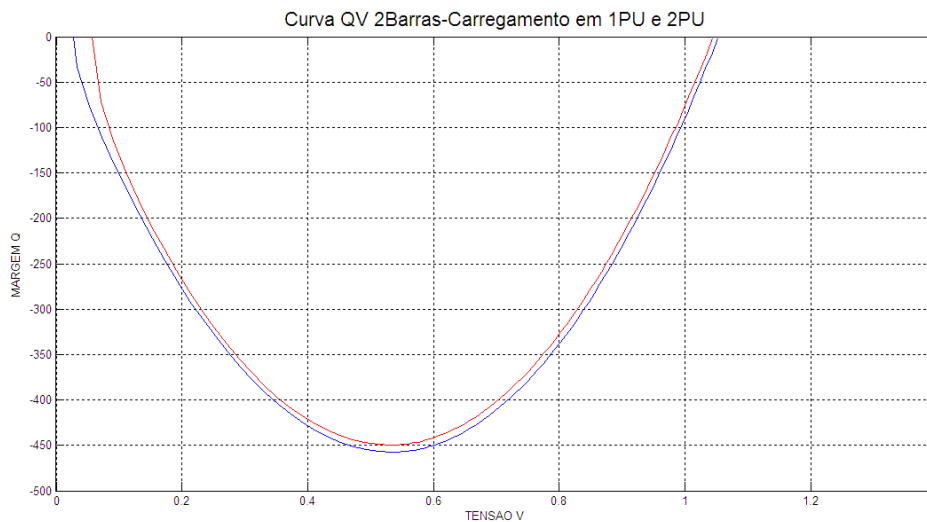


Figura 4.3 – Curva Q-V – Caso 1pu e 2pu para Barra 2 Sistema 2 Barras

Observando as curvas acima verifica-se que, conforme o aumento do carregamento, a margem de potência reativa da barra é reduzida, conforme esperado e observado na subseção 2.7.3.

4.3 Sistema de Teste de 14 Barras IEEE

Serão apresentados os resultados dos cálculos da Curva P-V, Q-V e Função Energia para o Sistema de 14 Barras.

Curvas P-V para o Caso Base e Desligamentos – Sistema 14 Barras

Máximo carregamento obtido em $\lambda = 1,82pu$ e barra crítica identificada como barra 14, com tensão em $V=0,57pu$ (figura 4.4).

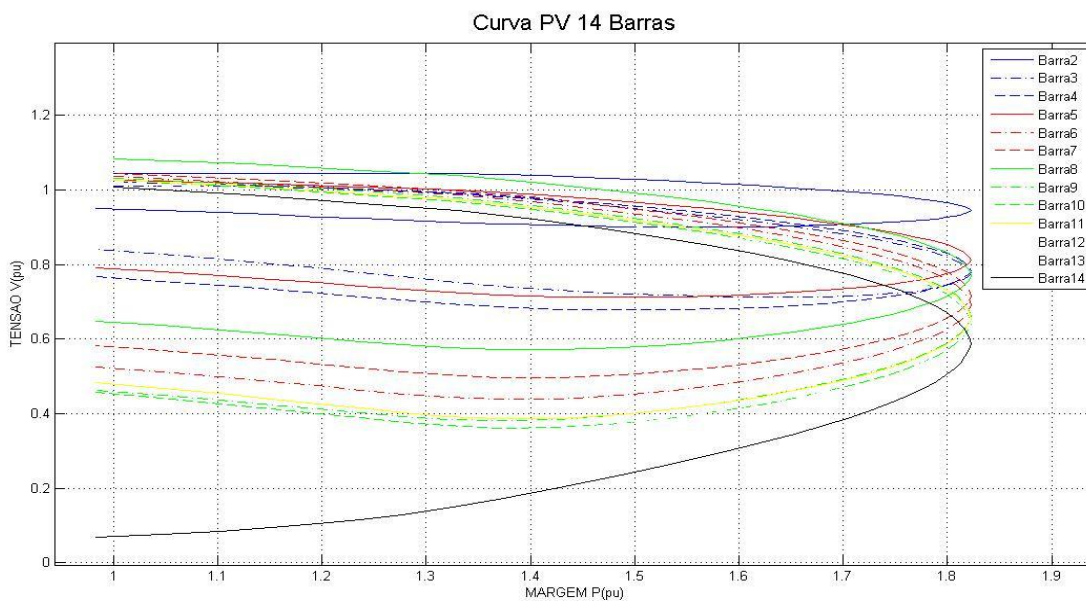


Figura 4.4 - Curva P-V – Caso Base para Sistema 14 Barras

Sequência indicativa de tensão nos barramentos, no ponto de bifurcação, onde VB significa a tensão seguida do número representativo da barra (tabela 4.1):

VB14<VB13<VB12<VB10<VB11<VB9<VB6<VB7<VB8<VB3<VB4<VB5<VB2<VB1

Como pode-se verificar, a barra 14 apresenta o menor nível de tensão. Esta barra é a barra crítica identificada pelo vetor tangente. Note que a curva P-V desta barra é muito bem

definida, ao contrário da curva P-V das barras não críticas, em que a parte de baixo (instável) mostra-se próxima da parte superior. Isso ocorre porque as barras críticas acabam por determinar a margem de carga do sistema inteiro, de forma que mesmo as barras com folga de margem de carga (não críticas) têm seu carregamento precocemente reduzido por esse fator.

Observa-se, para barra14, tensão de $V=1,007pu$ para carregamento $\lambda =1pu$ e tensão $V=0,567pu$ para máximo carregamento de $\lambda = 1,832pu$. Para este máximo carregamento, a tensão da barra 14 é a menor tensão encontrada entre as barras do sistema (tabela 4.1):

Tabela 4.1 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Caso Base

λ (pu)	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,021	1,025	1,036	1,043	1,082	1,032	1,025	1,027	1,021	1,017	1,007
1,832	bifurcação	0,938	0,767	0,773	0,801	0,675	0,700	0,756	0,642	0,625	0,639	0,627	0,612	0,567

Simulando-se desligamentos entre a barra 14 e os barramentos adjacentes à mesma (barra 9 e barra 13), obtém-se os resultados indicados nas tabelas 4.2 e 4.3. Observa-se que, para estas desligamentos, a barra 14 continua apresentando-se como barra crítica:

Tabela 4.2 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-14

λ (pu)	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,021	1,024	1,023	1,050	1,090	1,040	1,030	1,023	1,003	0,992	0,946
1,645	bifurcação	0,990	0,876	0,879	0,890	0,772	0,858	0,905	0,824	0,799	0,779	0,718	0,685	0,542

Tabela 4.3 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 13-14

λ (pu)	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,020	1,025	1,038	1,041	1,080	1,029	1,023	1,027	1,025	1,023	0,996
1,805	bifurcação	0,955	0,798	0,804	0,833	0,742	0,734	0,787	0,677	0,667	0,694	0,707	0,702	0,568

Simulando-se desligamentos em linhas próximas à Barra 14, pode-se obter resultados onde a barra crítica mantém-se como a barra 14 (verificado na tabela 4.4), e resultados

onde a barra crítica é alterada (verificado na tabela 4.5, onde a nova barra crítica é a barra 10):

Tabela 4.4 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 10-11

λ	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,021	1,025	1,036	1,043	1,082	1,031	1,024	1,030	1,022	1,017	1,007
1,661	bifurcação	0,952	0,792	0,799	0,827	0,727	0,731	0,785	0,675	0,653	0,709	0,682	0,666	0,614

Tabela 4.5 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-10

λ	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,022	1,024	1,022	1,051	1,090	1,043	0,975	0,994	1,009	1,007	1,009
1,765	bifurcação	0,965	0,822	0,828	0,845	0,705	0,793	0,843	0,752	0,557	0,617	0,668	0,662	0,661

Simulando-se desligamentos em linhas distantes à Barra 14, como observado anteriormente, pode-se obter resultados onde a barra crítica mantém-se como a barra 14 (verificado na tabela 4.6), e resultados onde a barra crítica é alterada (verificado na tabela 4.7, onde a nova barra crítica é a barra 3):

Tabela 4.6 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 4-5

λ	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	1,010	1,012	1,031	1,039	1,034	1,074	1,022	1,017	1,024	1,024	1,018	1,001
1,661	bifurcação	0,944	0,768	0,751	0,885	0,759	0,723	0,777	0,680	0,673	0,704	0,717	0,699	0,638

Tabela 4.7 – Avaliação da Tensão nas Barras do Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 2-3

λ	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)												
		VB2	VB3	VB4	VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11	VB12	VB13	VB14
1,000	SEP	1,045	0,946	0,992	1,002	1,010	1,014	1,054	1,002	0,996	0,999	0,995	0,990	0,978
1,319	bifurcação	0,998	0,673	0,827	0,866	0,830	0,827	0,875	0,801	0,793	0,805	0,803	0,794	0,765

Portanto, a medida que uma linha de transmissão ligada à barra crítica, ou suas adjacências é retirada, a margem de carga é reduzida, deixando o sistema em uma situação ainda mais vulnerável.

Curvas Q-V para o Caso Base e Desligamentos – Sistema 14 Barras

A seguir, são apresentados os resultados dos cálculos para Curva Q-V para o caso base e contingências.

Valores máximos de potência reativa obtidos pela Curva Q-V, no ponto de máximo carregamento (figura 4.5), são indicados na tabela 4.8:

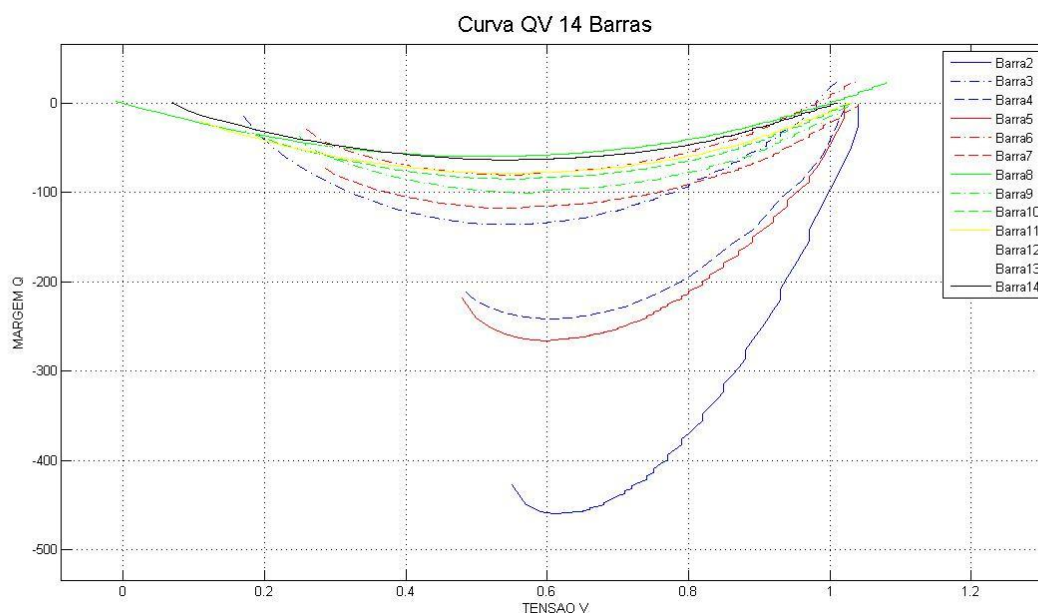


Figura 4.5 - Curva Q-V – Caso Base para Sistema 14 Barras

Tabela 4.8 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras

MQ (MVar)												
B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1

Como observado no gráfico da curva P-V para o caso base, na figura 4.4, a barra 14 é apresentada como barra crítica, com menor valor de tensão encontrado entre as barras do sistema. Para o gráfico Q-V, figura 4.5, o qual avalia a potência reativa fictícia, a qual poderia ser gerada e transmitida pelo barramento em análise, se caso fosse acoplado um gerador síncrono nesse barramento, a barra 8 apresenta-se como uma barra

crítica para margem de potência reativa, já que sua capacidade de margem reativa MQ é a menor comparada aos demais barramentos (tabela 4.8). A barra 14 é o segundo menor valor de margem de potência reativa.

Simulando-se desligamento entre a barra 14 e os barramentos adjacentes à mesma (barra 9 e barra 13), obtém-se os resultados indicados nas tabelas 4.9 e 4.10. Observa-se que, para estas desligamentos, a barra 14 continua apresentando-se como barra crítica, com os menores valores de margem de potência reativa indicados, conseqüentemente com maiores valores de redução da margem MQ, calculados através da relação entre MQ com desligamento e MQ sem desligamento (MQ com desligamento /MQ sem desligamento):

Tabela 4.9 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 9-14

	MQ (MVAr)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-447,4	-135,0	-236,8	-249,8	-61,1	-116,0	-59,2	-97,3	-83,8	-74,8	-53,9	-56,5	-26,8
Redução % da MQ	98%	100%	98%	94%	78%	100%	100%	99%	100%	96%	83%	74%	42%

Tabela 4.10 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 13-14

	MQ (MVAr)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-456,2	-135,0	-238,8	-264,8	-76,0	-111,2	-57,6	-91,8	-81,6	-78,0	-60,8	-67,9	-43,2
Redução % da MQ	100%	100%	99%	100%	97%	96%	97%	93%	97%	100%	94%	89%	68%

Nota-se que a influência da linha 13-14 sobre o barramento 14 é menor que a influência da linha 9-14 sobre o mesmo barramento.

Simulando-se desligamentos em linhas próximas à Barra 14, pode-se obter resultados onde a barra crítica se mantém como a barra 14 e resultados onde a barra crítica é alterada.

Todavia, observa-se coerência entre a identificação das barras críticas e a margem de carga reativa obtida para cada ponto operativo. No caso de desligamento da linha 9-10,

onde a barra 10 se apresenta como barra crítica, para a mesma simulação de desligamento, a redução da margem de potência reativa se apresentou mais crítica na própria barra crítica (barra 10) e na barra próxima ao desligamento (barra 11), conforme tabela 4.11:

Tabela 4.11 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras –
Desligamento da linha 9-10

	MQ (MVar)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-457,7	-135,5	-242,1	-260,7	-63,2	-114,6	-58,7	-94,2	-31,7	-46,8	-58,8	-70,7	-63,1
Redução % da MQ	100%	100%	100%	99%	81%	99%	99%	96%	38%	60%	91%	93%	100%

Para o desligamento da linha 10-11, também próxima à barra 14, a barra crítica indicada é a barra 14, conforme tabela 4.4. Neste caso, a barra de maior redução de potência reativa foi a barra 6, seguida das barras 11 e 10, barras estas ligadas ao desligamento, conforme tabela 4.12:

Tabela 4.12 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras –
Desligamento da linha 10-11

	MQ (MVar)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-458,2	-135,2	-240,6	-265,9	-36,5	-110,5	-57,0	-90,0	-68,8	-54,1	-61,4	-74,4	-63,0
Redução % da MQ	100%	100%	100%	101%	47%	95%	96%	92%	82%	69%	95%	97%	100%

Simulando-se desligamentos em linhas distantes à Barra 14, obtém-se resultados onde a barra crítica mantém-se como a barra 14 (curva P-V, tabela 4.6), e resultados onde a barra crítica é alterada (curva P-V, tabela 4.7, onde a nova barra crítica é a barra 3). Porém, as margens de potência reativas não seguem o mesmo padrão da curva P-V. No caso de desligamento da linha 4-5, onde a barra 14 manteve-se como barra crítica, para a mesma simulação de desligamento, a redução da margem de potência reativa se apresentou mais crítica nas barras próximas ao desligamento, barras 4, 3 e 5, conforme tabela 4.13:

Tabela 4.13 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras –
Desligamento da linha 4-5

	MQ (MVA _r)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-393,6	-107,5	-154,0	-232,0	-77,3	-101,8	-52,9	-90,0	-78,5	-75,6	-63,8	-75,3	-60,3
Redução % da MQ	86%	79%	64%	88%	99%	88%	89%	92%	94%	97%	99%	99%	96%

Para o desligamento na linha 2-3, também distante à barra 14, a barra crítica indicada é a barra 3 (curva P-V, tabela 4.7). Neste caso, a barra de maior redução de potência reativa se manteve como a barra 3, barra esta conectada ao desligamento (tabela 4.14):

Tabela 4.14 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 14 Barras – Desligamento da linha 2-3

	MQ (MVA _r)												
	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
MQ sem falta	-458,4	-135,5	-241,1	-264,4	-78,3	-116,1	-59,3	-98,2	-83,8	-78,1	-64,6	-76,4	-63,1
MQ com falta	-316,5	-25,8	-134,3	-164,7	-62,0	-89,8	-49,0	-80,0	-67,9	-66,1	-56,0	-65,2	-53,0
Redução % da MQ	69%	19%	56%	62%	79%	77%	83%	81%	81%	85%	87%	85%	84%

Portanto, parcialmente similar à análise da curva P-V, a curva Q-V indica que à medida que uma linha de transmissão ligada à barra crítica, ou suas adjacências é retirada, a margem de potência reativa é reduzida, deixando o sistema em uma situação ainda mais vulnerável. Porém, nem sempre a barra crítica, observada pelas curvas P-V, será a barra com maior impacto de redução de margem de potência reativa. Conforme verificado nas tabelas 4.9 a 4.14, a proximidade da contingência à barra é de extrema relevância para avaliar a capacidade de margem reativa de cada barramento.

Função Energia para o Caso Base e Desligamentos – Sistema 14 Barras

A seguir, são apresentados os resultados dos cálculos da Função Energia para o caso base, e contingências.

Máximo carregamento obtido em $\lambda = 1,82\text{pu}$ e Energia Potencial calculada aproximadamente 0, como esperado. Caso base, ponto inicial com carregamento $\lambda = 1\text{pu}$ e Energia Potencial total do sistema calculada em 83,42 (valores indicados na figura 4.6 e tabela 4.15).

Nota-se que os valores da função energia apresentam um bom comportamento em relação ao aumento de carga, isto é, conforme o carregamento do sistema se aproxima do ponto de bifurcação, a função energia tende à zero.

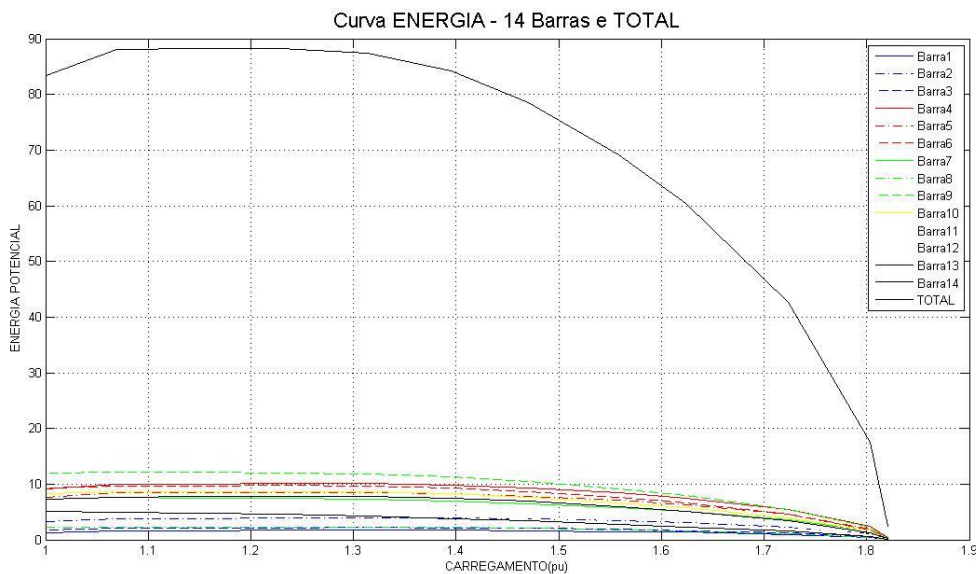


Figura 4.6 – Função Energia – Caso Base Sistema 14 Barras – Energia Potencial por Barra e Energia Potencial Total

Tabela 4.15 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras

λ (pu)	Energia Potencial das Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	Total
1,000	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
1,820	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Como a Energia Total é a soma da Energia de todos os barramentos, foi retirada a Energia Total do gráfico acima para uma melhor análise e comparação entre as curvas de cada barramento, indicados na figura 4.7:

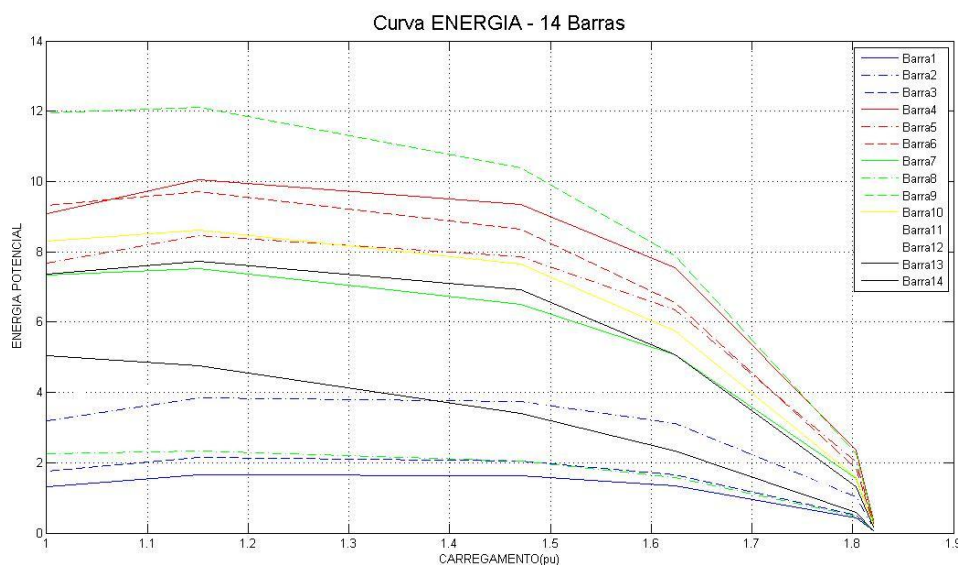


Figura 4.7 – Função Energia – Caso Base Sistema 14 Barras – Energia Potencial por Barra

A Figura 4.7 mostra que a solução única no ponto de bifurcação induz à energia zero para todas as barras.

Simulando-se desligamentos entre a barra 14 e os barramentos adjacentes à mesma (barra 9 e barra 13), obtêm-se os resultados indicados nas tabelas 4.16 e 4.17:

Tabela 4.16 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras – Desligamento da linha 9-14

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	0,414	1,119	0,573	3,478	3,354	5,616	2,450	0,741	3,380	3,064	2,326	2,384	4,750	1,566	35,215
Redução % da EP	32%	35%	33%	38%	44%	60%	33%	33%	28%	37%	48%	61%	65%	31%	42%

Para esta simulação de desligamento da linha 9-14, o ponto de máximo carregamento é obtido para um carregamento de $\lambda = 1,65pu$. Neste ponto, como esperado, a Energia Potencial calculada é aproximadamente 0. No ponto inicial do fluxo com carregamento $\lambda = 1,00pu$, a Energia Potencial calculada é 35,2. De forma coerente, este resultado é menor do que o obtido para o caso completo.

Tabela 4.17 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras –
Desligamento da linha 13-14

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	0,783	2,042	1,143	6,327	4,979	4,893	6,003	1,838	9,878	6,293	3,135	1,813	2,682	2,478	54,287
Redução % da EP	60%	64%	65%	70%	65%	52%	82%	81%	83%	76%	64%	46%	36%	49%	65%

Para esta simulação de desligamento da linha 9-14, o ponto de máximo carregamento é obtido para um carregamento de $\lambda = 1,79pu$. Neste ponto, como esperado, a Energia Potencial calculada é aproximadamente 0. No ponto inicial do fluxo com carregamento $\lambda = 1,00pu$, a Energia Potencial calculada é 59,3. Este resultado também é menor do que o obtido para o caso completo.

Comparando os resultados de cálculo da Função Energia com as curvas P-V e Q-V, mantém-se a menor influência do desligamento da linha 13-14 sobre o barramento 14 que o desligamento 9-14.

Simulando-se desligamentos em linhas próximas à Barra 14, calcula-se os valores da energia potencial de cada barramento e total, na tabela 4.18 para desligamento da linha 10-11 e na tabela 4.19 para desligamento da linha 9-10:

Tabela 4.18 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras –
Desligamento da linha 10-11

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	1,204	2,788	1,474	6,757	5,638	5,489	4,623	1,448	7,124	3,580	1,369	2,278	4,187	2,002	49,960
Redução % da EP	92%	87%	84%	74%	73%	59%	63%	64%	60%	43%	28%	58%	57%	40%	60%

Tabela 4.19 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras –
Desligamento da linha 9-10

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	0,513	1,329	0,685	4,019	3,931	6,655	2,705	0,819	2,255	3,082	4,530	2,384	4,304	1,507	38,717
Redução % da EP	39%	42%	39%	44%	51%	71%	37%	36%	19%	37%	93%	61%	59%	30%	46%

Observando-se os dados das tabelas 4.18 e 4.19 acima, verifica-se que as barras críticas (barras 14 e 10, respectivamente) sofrem uma elevada redução de energia potencial porém não são necessariamente as mais afetadas. Pelas tabelas 4.18 e 4.19, as barras mais afetadas pelos desligamentos das linhas são as barras diretamente conectadas às mesmas.

Simulando-se desligamentos em linhas mais distantes à Barra 14, calcula-se os valores da energia potencial de cada barramento e total, na tabela 4.20 para desligamentos da linha 4-5 e na tabela 4.21 para desligamentos da linha 2-3:

Tabela 4.20 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras –
Desligamento da linha 4-5

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	1,384	3,655	2,208	4,805	2,566	9,217	7,702	2,386	12,433	8,669	4,947	3,854	7,187	5,037	76,048
Redução % da EP	106%	115%	126%	53%	33%	99%	105%	105%	104%	104%	101%	98%	98%	100%	91%

Tabela 4.21 – Valores de Função Energia calculados para Sistema 14 Barras –
Desligamento da linha 2-3

	Energia Potencial(EP) nas Barras														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	EP Total
EP sem falta	1,312	3,189	1,749	9,073	7,677	9,330	7,345	2,265	11,955	8,301	4,874	3,940	7,351	5,055	83,416
EP com falta	1,368	2,835	2,767	11,007	8,184	5,543	5,249	1,608	7,485	5,070	2,920	2,126	3,958	1,894	62,145
Redução % da EP	104%	89%	158%	121%	107%	59%	71%	71%	63%	61%	60%	54%	54%	37%	75%

Observando-se os dados das tabelas 4.20, verifica-se que as barras onde ocorreu a contingência sofreram uma maior redução da energia potencial, seguidas pela barra crítica 14.

Analisando-se a tabela 4.21, observa-se uma redução na energia potencial da barra 14, porém o padrão de redução de energia potencial nas barras conectadas ao desligamento não pôde ser observado nesta condição de desligamento.

Análise entre as curvas P-V e Q-V – Sistema 14 Barras

Através da curva P-V obtém-se o fator de carregamento máximo de sistema em até $\lambda = 1,82$ antes da instabilidade.

Observa-se que, o vetor tangente imediatamente anterior ao ponto de bifurcação indica a barra crítica. Para esse sistema, a indicação da barra (ou região) mais crítica já é percebida no primeiro vetor tangente calculado (carga 1pu), mas não se mantém para barras mais “fortes”.

Abaixo, é apresentado o ranking de criticidade de barramento calculado através do vetor tangente para carregamento de 1pu (ponto estável e instável) e para o ponto de bifurcação, tanto em tensão quanto em ângulo, por este motivo o mesmo barramento é indicado duas vezes, indicados na tabela 4.22:

Tabela 4.22 – Ranking da Criticidade do Barramento (tensão e ângulo) Sistema 14 Barras

Ponto Inicial				Ponto Máximo Carregamento				Ponto Mínimo Carregamento			
1 PU carregamento				1,82 U carregamento				0,9831 PU carregamento			
BARRA	RANK	%	ÁREA	BARRA	RANK	%	ÁREA	BARRA	RANK	%	ÁREA
14	1	100	3	14	1	100	3	14	1	100	3
13	2	94,07	2	14	2	84,46	3	14	2	84,46	3
12	3	93,64	1	13	3	84,18	2	13	3	84,18	2
10	4	91,87	1	12	4	83,14	1	12	4	83,14	1
11	5	90,44	2	10	5	78,19	1	10	5	78,19	1
9	6	90,19	3	13	6	77,08	2	13	6	77,08	2
6	7	87,04	3	10	7	75,86	1	10	7	75,86	1
8	8	77,5	3	11	8	75,61	2	11	8	75,61	2
7	9	77,5	3	12	9	74,86	1	12	9	74,86	1
4	10	53,7	2	9	10	74,19	3	9	10	74,19	3
5	11	44,42	1	9	11	74,13	3	9	11	74,13	3
14	12	33,66	3	11	12	73,51	2	11	12	73,51	2
10	13	27,2	1	6	13	69,36	3	6	13	69,36	3
13	14	26,46	2	6	14	68,68	3	6	14	68,68	3
9	15	25,44	3	7	15	64,68	3	7	15	64,68	3
12	16	24,31	1	8	16	60,12	3	8	16	60,12	3
11	17	24,03	2	8	17	48,63	3	8	17	48,63	3
6	18	17,84	3	7	18	48,63	3	7	18	48,63	3
7	19	16,18	3	4	19	45,01	2	4	19	45,01	2
4	20	14,28	2	3	20	41,83	1	3	20	41,83	1
5	21	13,87	1	5	21	40,9	1	5	21	40,9	1
8	22	1,16	3	3	22	30,74	1	3	22	30,74	1
				2	23	21,55	1	2	23	21,55	1
				4	24	16,84	2	4	24	16,84	2
				5	25	10,69	1	5	25	10,69	1
				2	26	1,24	1	2	26	1,24	1

Através dos resultados obtidos com o cálculo da curva P-V, pode-se observar os dados de carregamento para as barras, quando o sistema está teoricamente no ponto de bifurcação, indicados na tabela 4.23:

Tabela 4.23 – Carregamento do Sistema 14 Barras

Barra	Potência Ativa (MW)				Potência Reativa (MVar)					
	Gerada		Consumida		Gerada		Consumida		Geração	
	$\lambda = 1$ pu	$\lambda = 1,82$ pu	$\lambda = 1$ pu	$\lambda = 1,82$ pu	$\lambda = 1$ pu	$\lambda = 1,82$ pu	$\lambda = 1$ pu	$\lambda = 1,82$ pu	Limite Mín.	Limite Máx.
1	102,10	226,98	-	-	17,90	252,54	0,00	0,00	-9.999,00	9.999,00
2	166,00	301,91	21,71	39,47	1,80	50,00	12,70	23,10	-40,00	50,00
3	-	-	94,20	171,32	25,80	40,00	19,00	34,56	0,00	40,00
4	-	-	47,80	86,93	-	-	-3,90	-7,90	-	-
5	-	-	7,60	13,82	-	-	1,60	2,91	-	-
6	-	-	11,20	20,37	24,00	24,00	7,50	13,64	-6,00	24,00
7	-	-	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	-	-
8	-	-	0,00	0,00	24,00	24,00	0,00	0,00	-6,00	24,00
9	-	-	29,50	53,65	-	-	16,60	30,19	-	-
10	-	-	9,00	16,37	-	-	5,80	10,55	-	-
11	-	-	3,50	6,37	-	-	1,80	3,27	-	-
12	-	-	6,10	11,09	-	-	1,60	2,91	-	-
13	-	-	13,50	24,55	-	-	5,80	10,55	-	-
14	-	-	14,90	27,10	-	-	5,00	9,09	-	-

Analisando os dados da tabela 4.23, observa-se que o sistema é levado ao colapso de tensão em função do esgotamento da capacidade de geração de potência reativa nas barras 2, 3, 6 e 8. As barras 6 e 8, no caso base já apresentam esgotamento de sua geração de potência reativa, porém as barras 2 e 3 atingem seus limites de geração de potência reativa à medida em que o carregamento do sistema se eleva. Como estas barras estão distantes de fontes de geração de potência ativa e reativa, somente um controle local de potência reativa poderia melhorar a margem de carregamento do sistema.

Observa-se que a margem de tensão (amplitude da curva P-V) está diretamente associada à margem de instabilidade da barra. Verificando margem de tensão nas barras, indicadas na tabela 4.24:

Tabela 4.24 – Comportamento da Tensão das Barras Sistema 14 Barras

	BARRA	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	CARGA													
Início	1,000	1,045	1,01	1,021	1,025	1,036	1,043	1,082	1,032	1,025	1,027	1,021	1,017	1,007
Bifurc	1,832	0,938	0,767	0,773	0,801	0,675	0,7	0,756	0,642	0,625	0,639	0,627	0,612	0,567
Fim	0,983	0,95	0,84	0,767	0,791	0,525	0,583	0,648	0,462	0,457	0,483	0,444	0,385	0,069
	Dvei	0,095	0,17	0,254	0,234	0,511	0,46	0,434	0,57	0,568	0,544	0,577	0,632	0,938
	Dve	0,107	0,243	0,248	0,224	0,361	0,343	0,326	0,39	0,4	0,388	0,394	0,405	0,44
	Dvi	0,012	0,073	-0,006	-0,01	-0,15	-0,117	-0,108	-0,18	-0,168	-0,156	-0,183	-0,227	-0,498
	Di	88,8%	70,0%	102,4%	104,5%	141,6%	134,1%	133,1%	146,2%	142,0%	140,2%	146,4%	156,0%	213,2%

D_{vei} = diferença da tensão calculada para ponto inicial da curva (parte estável) e o ponto final da curva (parte instável), teoricamente no mesmo ponto de carregamento;

D_{ve} = diferença de tensão entre o ponto inicial de carregamento 1 pu e o ponto de bifurcação;

D_{vi} = diferença de tensão entre o ponto de bifurcação e o ponto de mínima tensão antes do colapso;

D_i = distorção entre solução estável e solução instável ou, inclinação da curva.

A distorção é, basicamente, a inclinação de cada curva e indica que, quanto mais inclinada, mais sensível é um barramento em relação ao aumento de carga, quanto maior o carregamento, maior será o desequilíbrio de tensão do mesmo.

Observa-se que as barras mais sensíveis ao carregamento possuem maior distorção entre as tensões estável e instável (D_i), podendo indicar a sensibilidade da barra, com resultados semelhantes vetor tangente tanto no ponto de início (1 pu) quanto no ponto de bifurcação.

Analisando-se as desligamentos nas linhas adjacentes à barra 14, verifica-se também que:

- A influência da linha 9-14 sobre a barra 14 é maior que a linha 13-14.

Isso pode ser observado através do resultado das curvas PV e QV das mesmas, onde o desligamento da linha 9-14 reduziu a tensão no barramento, margem de carga, e margem de potência reativa da barra 14, em intensidade maior que o desligamento da linha 13-14.

Assim, é identificada uma maior dependência de fornecimento de potência aparente da linha 9-14 sobre a barra 14.

Observando-se os resultados de margem de potência reativa, a barra 14 é mais influenciada sobre a perda da linha 9-14 que da linha 13-14, como indicado nas curvas P-V.

Análise da Função Energia – Sistema 14 Barras

Avaliando-se a Energia Potencial de cada Barramento (EP), valores indicados na tabela 4.15, nota-se que a Barra 1 apresenta menor Energia Potencial, conforme sequência vista à seguir:

EPB1 < EPB3 < EPB8 < EPB2 < EPB12 < EPB11 < EPB14 < EPB5 < EPB7 < EPB13 < EPB10 < EPB4 < EPB6 < EPB9.

Porém, a sequência de menor energia para barramentos geradores não segue o mesmo padrão. Observa-se que a Barra 1 é um gerador suposto com geração infinita, o próximo barramento de menor energia potencial é a Barra 3 e Barra 8, que são barramentos com compensadores síncronos, e, só depois destas, aparece a Barra 2 com o segundo gerador do sistema, porém este, com limite de potência reativa.

Analisando a característica inicial do sistema (tabela 4.23) e o Fluxo de Potência, identifica-se alguns aspectos interessantes:

- A Barra 1 possui maior capacidade de fornecimento de potência reativa;
- A Barra 2 é a segunda em capacidade de fornecimento (50MVAR), porém encontra-se já fornecendo grande parte dessa energia (42,4MVAR), apresentando cerca de 85% do máximo carregamento que pode suprir.
- A Barra 3, possui menor capacidade de transmissão de potência reativa que a Barra 2, mas possui uma capacidade maior de fornecimento de carga futura, já que, da sua capacidade para suprir carga reativa está sendo utilizada em cerca de 50%.
- A capacidade de fornecimento de carga futura da barra 8 é nula, já que, da sua capacidade para supri carga reativa está sendo utilizada 100%.

Uma outra análise é a comparação do resultado da Função Energia da Barra Crítica com as demais barras (tabela 4.15):

- A Energia Potencial não indica a Barra Crítica, como calculada;
- A Barra 9 apresenta a maior carga reativa do sistema, para barras PQs, seguida pela barra 6. Nota-se, também, que o consumo de potência ativa da barra 9 é a maior do sistema, seguida das Barras 14, 13 e 6, são as barras com maior Energia Potencial, identificadas através do gráfico Função Energia (figura 4.6).

Avaliando os resultados de desligamento nas linhas 9-14 e 13-14 (tabelas 4.15 a 4.17):

- A Energia Potencial do caso base para a barra 14 é de 5,1 e a Energia Potencial total do sistema é de 83,4;
- No caso de um desligamento da linha 9-14, a Energia Potencial da barra 14 é de 1,6 e a Energia Potencial total do sistema é de 35,2;
- No caso de um desligamento da linha 13-14, a Energia Potencial da barra 14 é de 2,5 e a Energia Potencial total do sistema é de 45,3.

Novamente, observa-se um impacto maior da influência da perda da linha 9-14 sobre a barra 14, em detrimento à linha 13-14.

Pode-se observar pela tabela 4.16 que, como já comentado, a perda da linha 9-14 sobre a barra 14 acarreta em uma redução de margem de potência reativa total do sistema em 42%, para o cálculo da função energia, a diferença entre o caso base e a perda da linha 9-14 apresenta uma redução de 5,1 para 1,6 (31% do valor inicial). Sobre a Energia Total do sistema, a redução apresentada de 83,4 para 35,2 é de 42% do valor inicial.

Para a perda da linha 13-14, conforme tabela 4.17, a redução de margem de potência reativa na barra 14 é de 65% do valor inicial. Para o cálculo da função energia, a diferença entre o caso base e a perda da linha 13-14 apresenta uma redução de 5,1 para 2,5 na barra 14 (redução para 49% do valor inicial) e sobre a Energia Total do sistema, a redução apresentada de 83,4 para 54,3 é de 65% do valor inicial.

Em ambos os casos, os valores de Energia Potencial e a margem de energia reativa, apresentaram reduções. Portanto as curvas apresentaram comportamentos similares, porém, os dados calculados para função energia sofrem influência de termos correspondentes às cargas ativas, reativas e perdas na linha. Espera-se então que, essa correspondência entre Função Energia e curva QV apresente valores mais similares quanto maior a parcela de potência reativa apresentar o sistema.

Desligamentos em linhas mais distantes à Barra 14, observou-se que, a Energia Potencial calculada é reduzida em relação à condição inicial de operação do sistema, indicado pelas tabelas 4.20 e 4.21. Observando-se os dados da tabela 4.20, desligamento na linha 4-5, verifica-se uma redução já esperada de energia potencial nas barras onde ocorreu a contingência com maior impacto que na própria barra crítica 14. Analisando-se o desligamento na linha 2-3, tabela 4.21, não foi verificado o mesmo comportamento. Observou-se redução da energia potencial na barra crítica, chegando a 37% do valor inicial, e também uma redução da energia potencial na barra 2, conectada diretamente ao desligamento. Porém, a segunda barra conectada ao desligamento, barra 3, apresentou um acréscimo de energia potencial.

4.4 Sistema de Teste de 57 Barras IEEE

A seguir, são demonstrados os resultados dos cálculos para Curva P-V e Q-V, para o sistema de teste de 57 Barras do IEEE.

Como este teste apresenta um número maior de linhas, serão apresentados apenas os barramentos mais críticos, conforme metodologia do Vetor Tangente. O barramento crítico no carregamento máximo (tabela 4.25) é a barra 31, seguida das barras com menor valor de tensão no ponto crítico: barra 33, seguida das barras 32, 30, 25, 57, 56, 42, 41, 34, 35 e 40.

Curva P-V Caso Base para o Sistema 57 Barras IEEE

Abaixo, é apresentada a curva P-V para as barras críticas do sistema de teste de 57 barras do IEEE. O máximo carregamento obtido $\lambda = 1,51\text{pu}$ (tabela 4.26) e as barras críticas são determinadas pelo menor Vetor Tangente (tabela 4.25):

Tabela 4.25 – Ranking da Criticidade do Barramento (tensão e ângulo) Sistema 57 Barras – Barras mais críticas

1 PU carregamento		
BARRA	RANK	%
31	1	100
33	2	97,51
32	3	97,28
30	4	95,37
25	5	92,00
57	6	84,36
56	7	81,77
42	8	80,23
41	9	73,88
34	10	72,8
35	11	71,74
40	12	70,97
31	13	70,59

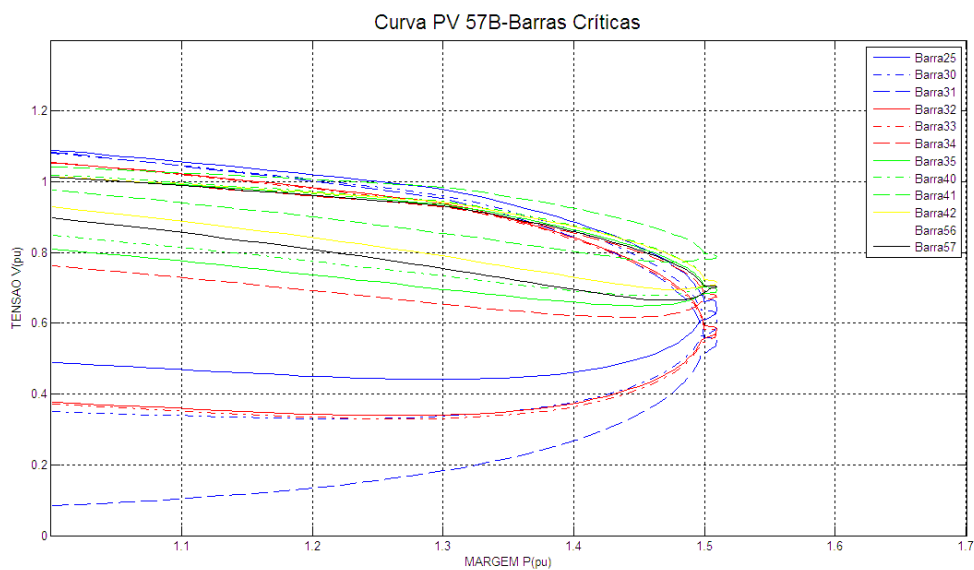


Figura 4.8 – Curva P-V – Caso Base para Barras Críticas do Sistema 57 Barras

Nota-se que, a exemplo do observado no sistema de 14 barras, as barras críticas apresentam curvas bem definidas, com os ramos superiores (pontos SEP da curva P-V) e com os ramos inferiores (pontos UEP da curva P-V) afastados entre si.

Sequência indicativa de tensão nos barramentos, no ponto de bifurcação (os valores podem ser observados na tabela 4.26):

$$VB31 < VB33 < VB32 < VB30 < VB25 < VB57 < VB56 < VB40 < VB42 < VB41$$

Tabela 4.26 – Margem de Tensão das Barras Sistema 57 Barras – Barras Críticas

λ (pu)	Característica do ponto de carregamento	Tensão nas Barras (pu)											
		25	30	31	32	33	34	35	40	41	42	56	57
1,000	SEP	1,088	1,080	1,083	1,055	1,053	1,013	1,016	1,019	1,042	1,015	1,016	1,012
1,510	bifurcação	0,644	0,600	0,554	0,586	0,580	0,675	0,695	0,716	0,789	0,716	0,704	0,690

Curva Q-V para o Caso Base do Sistema 57 Barras IEEE

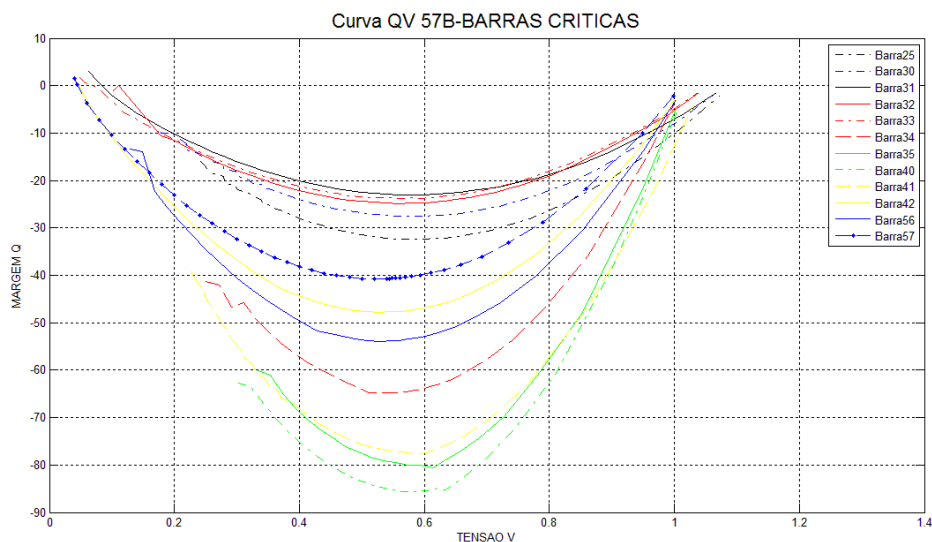


Figura 4.9 – Curva Q-V – Caso Base para Barras Críticas do Sistema 57 Barras

Tabela 4.27 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Críticas

MQ (MVA _r)											
B25	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B40	B41	B42	B56	B57
-32,3	-27,5	-23,0	-24,8	-23,7	-64,8	-80,6	-85,6	-77,7	-47,8	-53,9	-40,8

Para uma melhor avaliação das margens de potência reativa do sistema, e para que se possa verificar se as barras críticas apresentam uma menor margem em relação às demais barras, foram calculadas as margens de potência reativa para os demais barramentos, e apresentados em grupos para melhor visualização das curvas, comparados aos barramentos 25 e 31 que apresentam a menor e maior margem de potência reativa dentro do grupo das barras críticas:

Grupo 1, composto pelos barramentos: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

Grupo 2, composto pelos barramentos: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20.

Grupo 3, composto pelos barramentos: 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28 e 29.

Grupo 4, composto pelos barramentos: 36, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46 e 47.

Grupo 5, composto pelos barramentos: 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 e 55.

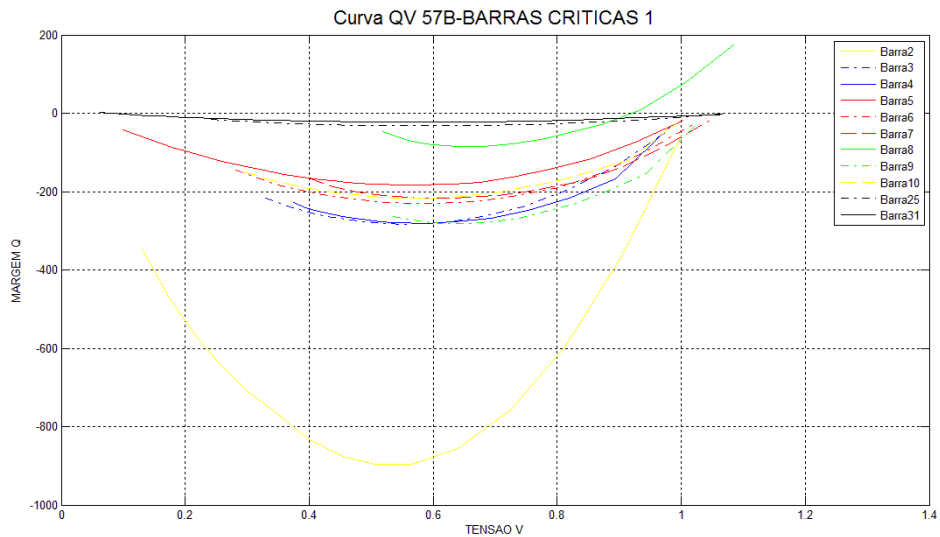


Figura 4.10–Curva Q-V –Caso Base para Barras: 2,3,4,5,6,7, 8, 9,10, 25,31-Grupo 1-Sistema 57 Barras

Tabela 4.28 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 1

MQ (MVar)										
B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B25	B31
-896,1	-282,7	-281,0	-183,1	-230,1	-216,5	-85,3	-281,8	-217,2	-32,3	-23,0

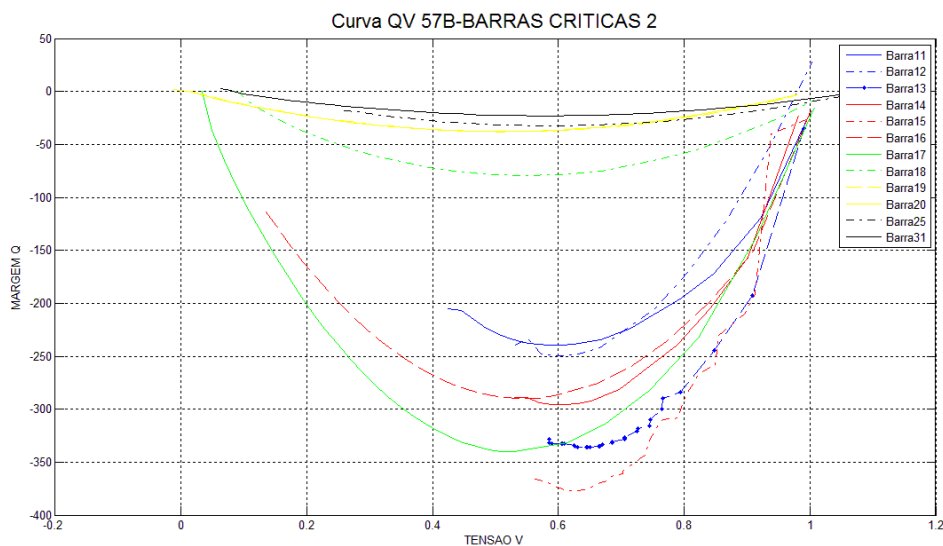


Figura 4.11 –Curva Q-V–Caso Base para Barras: 11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,25,31-Grupo 2
-Sistema 57 Barras

Tabela 4.29 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 2

MQ (MVar)											
B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B25	B31
-239,6	-250,0	-323,3	-295,7	-376,7	-289,9	-340,5	-79,2	-38,0	-37,7	-32,3	-23,0

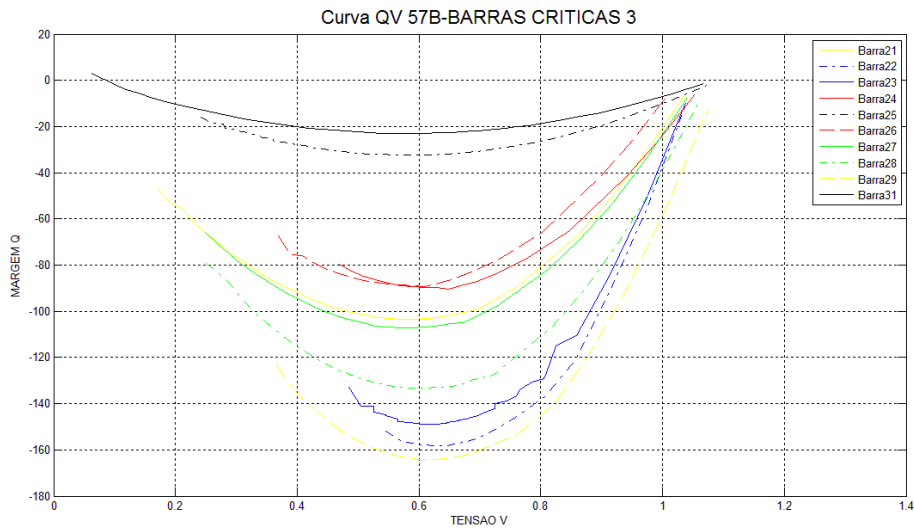


Figura 4.12 –Curva Q-V–Caso Base para Barras: 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31-Grupo 3
-Sistema 57 Barras

Tabela 4.30 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 3

MQ (MVar)									
B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29	B31
-104,0	-158,3	-148,9	-90,4	-32,3	-89,3	-107,2	-133,2	-164,2	-23,0

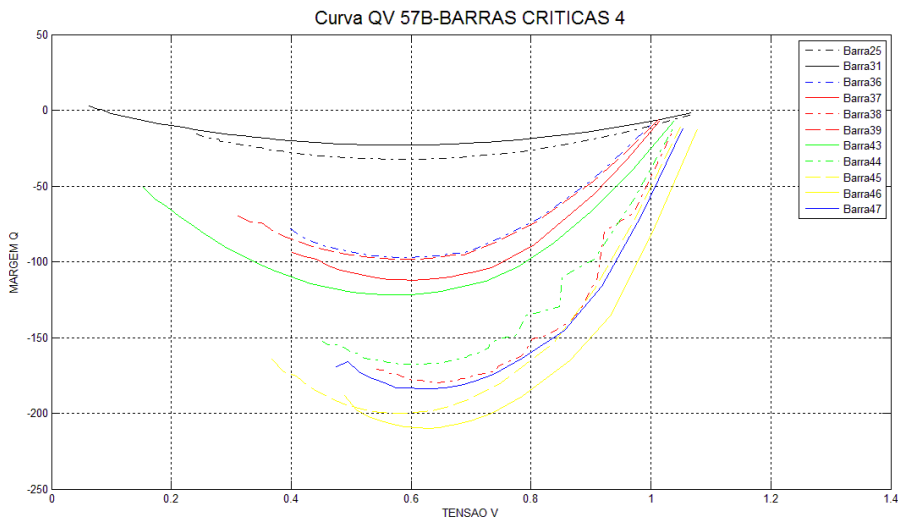


Figura 4.13 –Curva Q-V–Caso Base para Barras: 25,31,36,37,38,39,43,44,45,46,47- Grupo 4
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.31 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 4

MQ (MVar)										
B25	B31	B36	B37	B38	B39	B43	B44	B45	B46	B47
-32,3	-25,0	-97,0	-122,0	-179,7	-98,4	-122,0	-167,8	-200,2	-209,8	-184,5

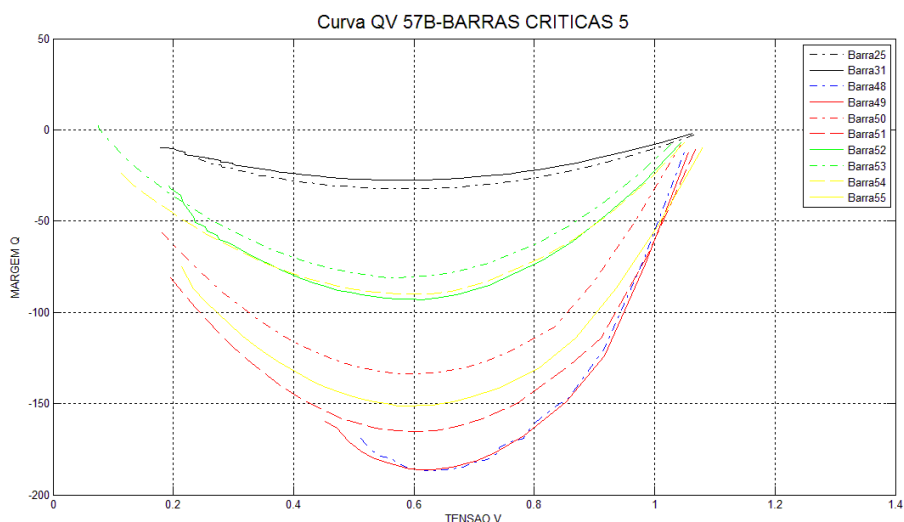


Figura 4.14 –Curva Q-V–Caso Base para Barras: 25, 31, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 – Grupo 5
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.32 – Valores máximos de Margem de Potência Reativa – Curva QV 57 Barras – Barras Grupo 5

MQ (MVA _r)									
B25	B31	B48	B49	B50	B51	B52	B53	B54	B55
-32,3	-25,0	-186,7	-186,2	-133,6	-165,4	-93,3	-81,1	-90,0	-151,3

Avaliando-se os resultados das tabelas 4.27 a 4.32, confirmou-se o resultado obtido para curva P-V: as cinco barras mais críticas, indicadas pela tabela 4.26 (31, 33, 32, 30 e 25) apresentam menores valores de margem de potência reativa.

Análise entre as curvas P-V e Q-V – Sistema 57 Barras

Como visualizado no resultado do sistema de teste de 14 barras, as barras críticas do sistema de 57 barras também apresentam elevados valores de diferença entre tensão SEP e UEP para o mesmo carregamento. Observa-se também que a barra mais crítica em valores de tensão, é a indicada pelo método do vetor tangente, a barra 31.

Tabela 4.33 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras – Barras Críticas

BARRA	25	30	31	32	33	34	35	40	41	42	56	57	
CARGA													
Início	1,000	1,088	1,080	1,083	1,055	1,053	1,013	1,016	1,019	1,042	1,015	1,016	1,012
Bifurc	1,509	0,635	0,600	0,554	0,586	0,580	0,675	0,695	0,716	0,789	0,716	0,712	0,703
Fim	0,996	0,490	0,350	0,084	0,378	0,372	0,764	0,811	0,850	0,977	0,930	0,914	0,899
Dvei	0,598	0,73	0,999	0,677	0,681	0,249	0,205	0,169	0,065	0,085	0,102	0,113	
Dve	0,453	0,48	0,529	0,469	0,473	0,338	0,321	0,303	0,253	0,299	0,304	0,309	
Dvi	-0,145	-0,25	-0,47	-0,208	-0,208	0,089	0,116	0,134	0,188	0,214	0,202	0,196	
Di	132,0%	152,1%	188,8%	144,3%	144,0%	73,7%	63,9%	55,8%	25,7%	28,4%	33,6%	36,6%	

Tanto a diferença de tensão Dvei da parte estável inicial da curva P-V com a parte instável, quando a distorção Di são maiores indicando a barra 31 como a mais sensível, maior o desequilíbrio de tensão, seguida da barras 30, 32, 33 e 25. Portanto, a previsão de barra crítica pelo maior componente do vetor tangente foi suficiente para prever a barra mais crítica.

Para verificar se o método de avaliação da criticidade do barramento foi suficiente para identificar as barras mais críticas, segue o gráfico dos demais barramentos do sistema de 57 barras, comparados à barra de maior e menor criticidade avaliadas pela tabela 4.34, barras 31 e 25.

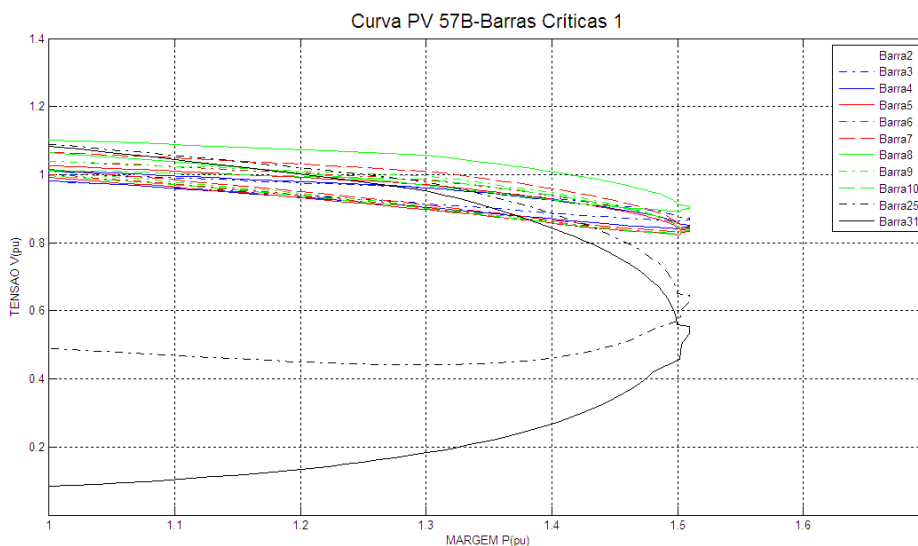


Figura 4.15 – Curva P-V – Caso Base para Barras Grupo1: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25, 31 - Sistema 57 Barras

Tabela 4.34 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras – Grupo 1

Barras Grupo 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	25	31
Tensão (pu)	0,968	0,871	0,850	0,836	0,840	0,848	0,906	0,839	0,840	0,644	0,554

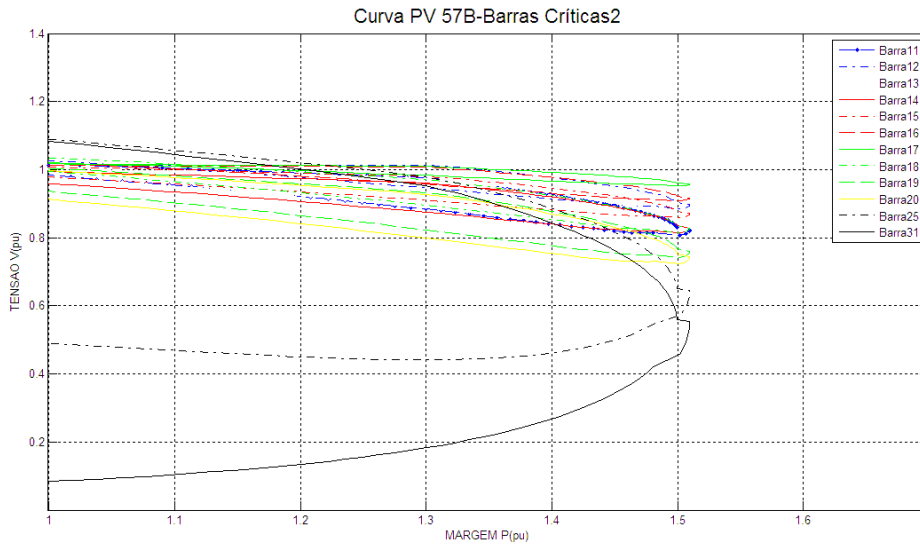


Figura 4.16 –Curva P-V–Caso Base para Barras Grupo 2: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 31
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.35 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras – Grupo 2

Barras Grupo 2	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	31
Tensão (pu)	0,823	0,898	0,840	0,829	0,872	0,916	0,958	0,828	0,760	0,745	0,644	0,554

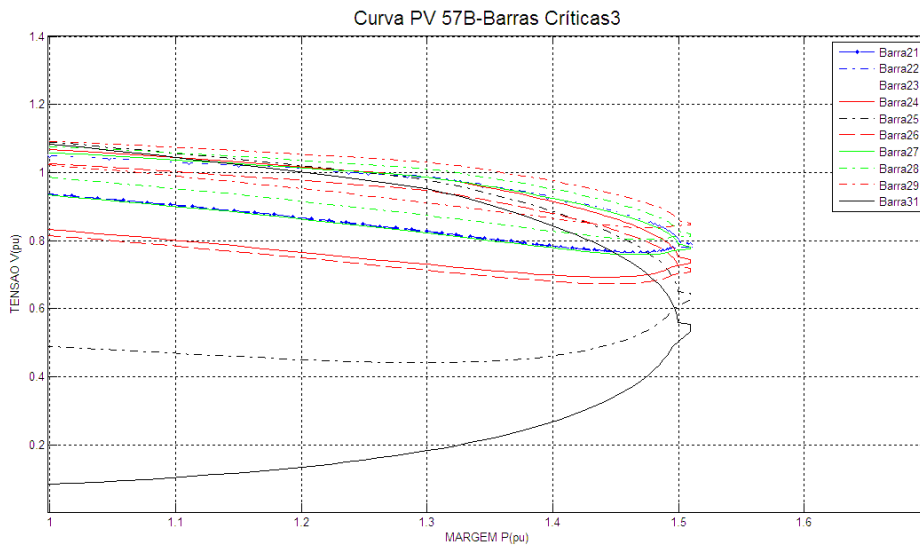


Figura 4.17 –Curva P-V–Caso Base para Barras Grupo 3: 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.36 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras – Grupo 3

Barras Grupo 3	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31
Tensão (pu)	0,789	0,790	0,786	0,744	0,644	0,718	0,782	0,819	0,851	0,554

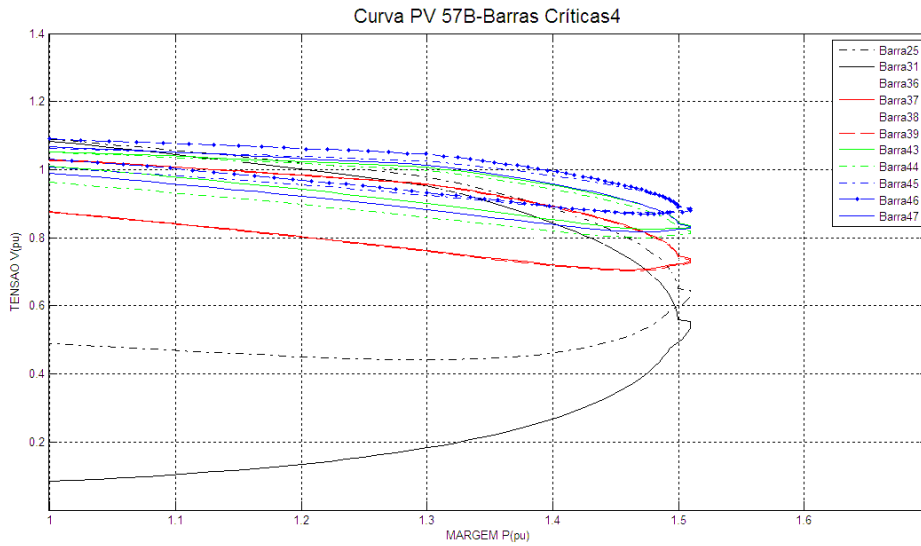


Figura 4.18 –Curva P-V–Caso Base para Barras Grupo 4: 25, 31, 36, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 47
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.37 – Tensão para máximo carregamento - Sistema 57 Barras – Grupo 4

Barras Grupo 4	25	31	36	37	38	39	43	44	45	46	47
Tensão (pu)	0,644	0,554	0,719	0,739	0,798	0,735	0,836	0,819	0,887	0,884	0,834

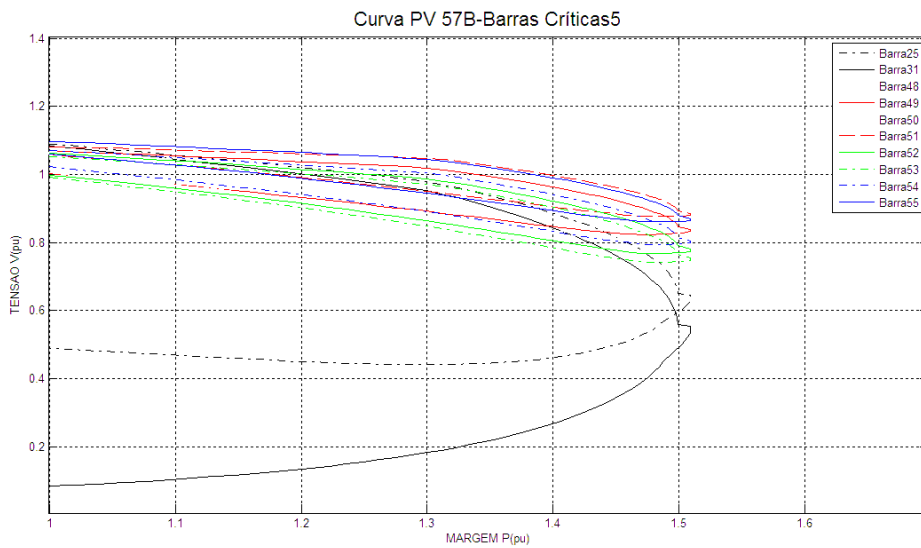


Figura 4.19 –Curva P-V–Caso Base para Barras Grupo 5: 25, 31, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55
- Sistema 57 Barras

Tabela 4.35 – Comportamento da Tensão das Barras Sistema 57 Barras – Grupo 5

Barras Grupo 5	25	31	48	49	50	51	52	53	54	55
Tensão (pu)	0,644	0,554	0,824	0,839	0,820	0,886	0,780	0,754	0,805	0,870

Analisando-se os gráficos, verifica-se que o método do maior componente do vetor tangente indica as barras mais críticas, neste caso, até as 7 primeiras barras mais críticas. Portanto, para simplificação dos testes, foram analisadas as curvas Q-V apenas dos barramentos considerados mais críticos: 31, 32, 33, 30, 25.

Abaixo, segue representação física esquemática sobre as regiões que apresentam maior e menor grau de sensibilidade de tensão, perante aumento de carga. Lembrando que as barras consideradas mais críticas, estão indicadas na mesma região (barras 25, 30, 31, 32, 33). As demais regiões (barras 56 e 57 e barras 21, 22, 23, 24, 26 e 27), apresentam valores de tensão reduzidos no ponto de bifurcação em maior e menor intensidade, mas todas apresentam um distanciamento elétrico da barra Swing, facilmente observado.

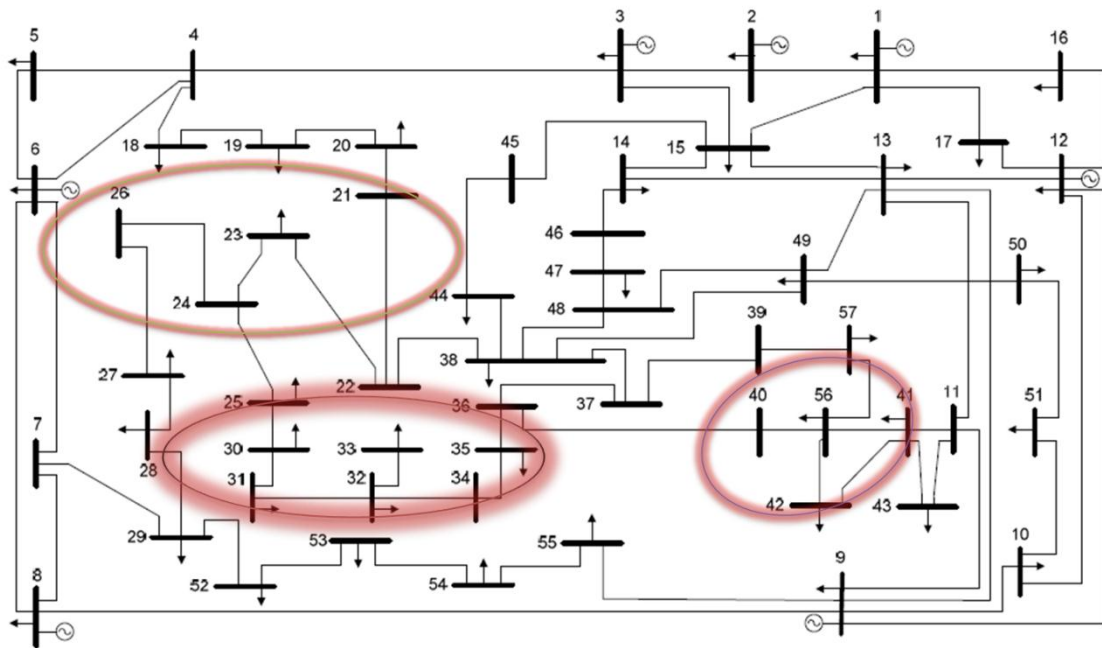


Figura 4.20 – Sistema 57 Barras - Áreas Limite de Carregamento

Fonte: Adaptado de [40]

Nesta representação também é válida a observação da análise do sistema de 14 barras, quanto mais “distante eletricamente” o barramento de carga estiver das barras de geração de potência ativa, mais sensível será perante um aumento de carga do sistema. Neste caso, as barras mais críticas estão eletricamente distantes da barra swing (barra 1), bem distantes da maior concentração de fornecimento de geração (barras 2, 3, 6, 12) e

com proximidade apenas à barra 8 tipo PV. Porém a mesma já apresenta alto nível de consumo de potência ativa e reativa no próprio barramento e, no ponto de bifurcação, atinge seu valor máximo de fornecimento de potência, como as demais barras PV.

Tabela 4.39 – Sistema 57 Barras – Comportamento das Barras de Geração no Ponto Crítico

BARRA	NUM.	TENSÃO	ÂNGULO	Pot.Ativa Gerada	Pot.Reativa Gerada	Geração de Pot. Reativa Mínima	Geração de Pot. Reativa Máxima
		PU	GRAUS	MW	MVAr	MVAr	MVAr
Kanawha	1	1,040	0,000	423,11	-89,24	0,00	0,00
Turner	2	1,035	-1,204	0,00	49,74	-17,00	50,00
Logan	3	1,040	-5,149	39,59	-10,05	-10,00	60,00
Beaver Ck	6	1,092	-9,360	0,00	-8,00	-8,00	25,00
Clinch Rv	8	1,161	-7,026	445,39	199,81	-140,00	200,00
Saltville	9	1,104	-10,746	0,00	-3,07	-3,00	9,00
Glen Lyn	12	1,098	-11,027	306,82	154,83	-150,00	155,00

Conclusões

Observando-se os estudos das curvas P-V, pode-se distinguir as barras que apresentam maior sensibilidade quanto maior o carregamento do sistema como um todo.

Pelas simulações realizadas, verificou-se que a curva Q-V pode auxiliar quando o estudo estiver voltado à alocação de cargas reativas e compensação. Condicionando o estudo da curva Q-V ao estudo de perdas de linhas, pode-se conseguir uma boa ferramenta de análise para compensação de carga reativa e manutenção dos níveis de tensão e avaliação da dependência de cada barramento sobre seus adjacentes.

Através da formulação da Função Energia, verifica-se que, a mesma leva em consideração o carregamento de cada barramento, suas perdas associadas e a capacidade de controle de tensão e ângulo em cada linha, além da distância entre as soluções estáveis e instáveis, indicando, portanto, quanto mais próximo do ponto de bifurcação menor a energia associada. A Função Energia calculada em cada situação deve ser comparada com a Função Energia inicial, pré-carregamento. Assim é possível avaliar o comportamento e desenvolvimento da curva.

Apesar do resultado das curvas P-V e Q-V apresentarem, nas simulações dos sistemas apresentados neste trabalho, grande similaridade nos resultados de barramentos críticos e comportamentos pós-distúrbios, não observou-se uma comparação direta entre Função Energia e os pontos de operação calculados para as curvas P-V e Q-V. Para uma comparação da Função Energia com as curvas P-V e Q-V, uma avaliação da diferença de área entre as curvas pode ser feita e comparada com a Função Energia antes e após falta de um sistema, já que a Função Energia é basicamente composta por áreas sob curva de carregamento P e Q.

Portanto, o cálculo da Função Energia se apresenta como mais uma ferramenta de análise estática de um sistema de potência. Esta ferramenta pode apresentar informações mais detalhadas, quanto maior a análise feita sobre cada componente característico do sistema, representado na formulação.

Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, é interessante a avaliação da Função Energia para sistemas maiores, como no caso do sistema de 57 barras e maiores complexidades nos sistemas como limites de carregamento envolvidos.

A possibilidade de estudar cada componente da Função Energia pode indicar a criticidade do sistema em relação a um parâmetro específico como sobrecarregamento das linhas de transmissão, ou alocação de potência reativa, dentre outros parâmetros de controle.

Outra avaliação pode ser feita analisando-se para qual tipo de sistema é mais adequada a ferramenta de análise a partir da Função Energia e o estudo do crescimento de cargas concentradas em determinados barramentos.

Bibliografia

- [1] Cañizares, C. A – “Voltage collapse an Transient Energy Function Analysis of AC/DC Systems”, University of Wisconsin_Madison, tese PhD, 1991.
- [2] A.C. Zambroni de Souza, N. H. Brito – “Ações de Controle para prevenção de colapso de tensão: efeios e restrições”, XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, 1994.
- [3] Zambroni, A.C.S., Cañizares, C.A., Quintana, V.H – “New techinques to speed up voltage colapse computations using tangente vectors” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 3, 1997.
- [4] Taylor, C. W. – “Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena”, CIGRE Task Force 38-02-10, 1992.
- [5] C. W. Taylor – “Power System Voltage Stability”, Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [6] P. Kundur – “General Introduction an Basic Concepts of Voltage Stability Analysis”, IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability, San Diego, 1998.
- [7] U.S.-Canada Power System Outage Task Force – “Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations” – Canada, 2004.
- [8] Fouzul A. Shaikh, Dhananjay Gautam, Neelotpal Pandey, Deepak Singh – “International Grid: New Way to Prevent Blackouts” – International Journal of Computer Science and Informatics ISSN (PRINT): 2231 –5292, Vol-1, Iss-4, 2012Wiley, 2011.
- [9] P. Kundur, G. K. Morison – “A Review of Definitions an Classification of Stability Problems in Today’s Power Systems”, IEEE PES Meeting, New York, 1997.
- [10] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “Definition and Classification ofPower Systema Stability”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, n.3, pp.1387-1401, 2004.
- [11] Kundur, Prabha – “Power system stability and control”, Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

- [12] H. Seifi, K. Imhof – “Voltage Stability Analysis in an Energy Management System – A Practical Implementation”, 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, 1994.
- [13] Antonio G. Expósito – “Análisis y Operación de Sistemas de Energia Eléctrica”, McGraw-Hill, 2002.
- [14] C. W. Taylor – “Maybe I Can’t Define Stability, but I Know It When I See it”, IEEE/PES-anel on Stability Terms and Definitions, New York, 1997.
- [15] IEEE Power Engineering Society - “Suggested techniques for voltage stability analysis”, IEEE publication 93TH0620 – 5PWR, 1993.
- [16] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado – “Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems”, IEEE Transactions on Power Systems. 8 (1) , 1-8, 1993.
- [17] C. A. Cañizares, A. C. Zambroni de Souza, V. H. Quintana – “Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse”, IEEE Transactions on Power Systems. 11 (3), 1441-1450, 1994.
- [18] M. Strubbe, A. Bihain, J. Deuse, J. C. Baader – “STAG – A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behavior of Electrical Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, n.1, 1989.
- [19] EPRI Report EL-627 – “Long-Term Dynamics Simulation: Modeling Requirements”, Final Report of Project 2473-22, Ontario Hydro, 1989.
- [20] A. C. Zambroni de Souza, J. L. A. Jardim, C. A. Silva Neto, A. P. Alves da Silva, L. G. Torres, C. Ferreira, L. C. A. Ferreira – “A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment” - Electric Power Systems Research, 1998.
- [21] A.J. Monticelli, “Fluxo de Cargas em Redes de Energia Eléctrica”, Editora Edgard Blucher LTDA, 1983.
- [22] A. C. Zambroni de Souza – “Estabilidade de Tensão”, Apostila de curso, CSES, Itajubá, 1999.
- [23] Custem, Thierry V. and Vournas, Costas – “Voltage Stability of Electric Power Systems”
- [24] Ronald Ocariz Karauer, Tito – “Uma metodologia de análise de sistemas de potência aplicando o continuado QV e PV no ambiente de planejamento de sistemas elétricos” – Dissertação de Mestrado, Sistemas Elétricos de Potência, UNIFEI, 2007.
- [25] Aylett, P. D. – “The energy-integral criterion of transient stability limits of power systems” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 105 c, 1958.

- [26] Overby, Thomas J. and DeMarco, Christofer L. – “Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 3, 1991.
- [27] Chau, M. – “Understanding Voltage Collapse in Bulk Transmission Systems” – Energy Foundation Conference on Bulk Power System Voltage Phenomena: Voltage Stability and Security, 1988.
- [28] da Silva, Gustavo V. M. – “Controlo não Linear” – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal/IPS, Lisboa, 2003.
- [29] Bretas, Newton. G. , Alberto, Luis F. C. – “Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos”, São Carlos: EESC/USP, 2000.
- [30] de Souza, Antônio C. Z. , Pinheiro, Carlos A. M. – “Introdução à Modelagem, Análise e Simulação de Sistemas Dinâmicos-” – Ed.Interciência, 2000.
- [31] Pai, M.A. – “Energy Function Analysis for Power System Stability” – Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [32] Cogo, João Roberto – “Estabilidade de Sistemas Elétricos” – Notas de Aula de DEL-142, UNIFEI, 1981.
- [33] Nunes, Alexandre R. – “Aplicação de Funções de Energia ao Cálculo de Limites de Intercâmbio em Sistemas de Potência” – Dissertação de Mestrado, COPPE, 2010.
- [34] Overby, Thomas J. and DeMarco, Christofer L. – “An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 2, 1990.
- [35] Jurado, F. and Carpio, J. – “Energy functions analysis in voltage collapse” – ETEP, vol. 11, no. 4, /August 2001.
- [36] Chiang, Hsiao-Dong – “Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems” – Wiley, 2011.
- [37] Guedes, R. B. L. – “Cálculo das Soluções de Baixa Tensão das Equações de Fluxo de Carga através de Sistemas Dinâmicos Auxiliares e Função Energia Estendida com Modelo ZIP para Análise de Colapso de Tensão” - Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2004.
- [38] Overbye, T.J., Klump, R. P. – “Effective calculation of power system low-voltage solutions” – IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, no. 1, Fev.1996.
- Fritz Walter Mohn and A. C. Zambroni de Souza – “On fast decoupled continuation power flows”, Electric Power Systems Research. 63 105-111, 2002.

- [39] Overby, Thomas J. and Dobson, Ian – “Q-V Interpretations of Energy Measures for Voltage Security” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, 1994.
- [40] Gustavo Adolfo Valverde Mora – Uncertainty and State Estimation of Power Systems – Tese de Doutorado, Faculty of Engineering and Physical Sciences , University of Manchester, 2012.
- [41] Isabella de Freitas – “Comportamento da curva QV nas barras da região crítica de um sistema elétrico”, Dissertação, UNIFEI, 2007.
- [42] Mohn, Fritz Walter - “Uso de modelos desacoplados em estudos de estabilidade de tensão” – Tese de Doutorado, UNIFEI, 2005.
- [43] Mohn, Fritz Walter, A. C. Zambroni de Souza - “Tracing PV and QV Curves with the Help of a CRIC Continuation Method”, IEEE Transactions on Power Systems, (21), 1104–1114, 2004.
- [44] Overby, Thomas J. and DeMarco, Christofer L. – “Q-V Curve Interpretations of Energy Measures for Voltage Security” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, 1994.

Apêndice

Sistemas de Teste

Foram utilizados, para as simulações, os Sistemas de Teste abaixo indicados:

Sistema de Teste de 2 Barras

Este Sistema é composto por:

- Barra 1 como barra swing;
- Barra 2 como barra de carga.

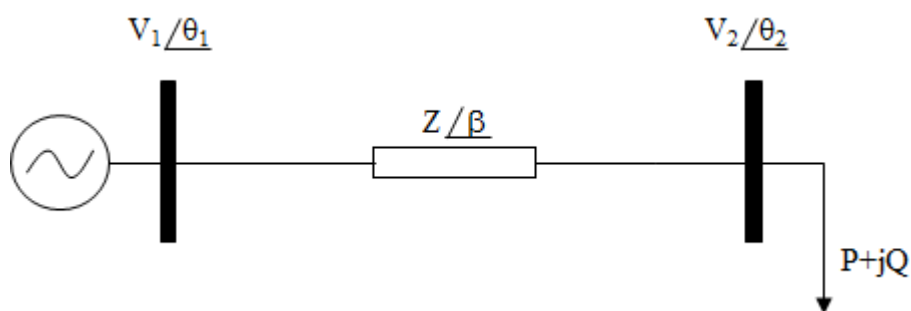


Figura A.1 – Sistema de teste de 2 Barras

Tabela A.1 – Dados do Sistema de Teste de 2 Barras – Dados de Barra

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Pl	Ql	Pg	Qg
		(pu)	(graus)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
1	SWING	1,060	0,0	0,0	0,0	48,7	4,0
2	PQ	1,019	-10,00	47,8	-3,9	0,0	0,0

Tabela A.2 – Dados do Sistema – Dados de Linha

Linha	Resistência	Reatância	Susceptância
	(pu)	(pu)	(pu)
1-2	0,01938	0,05917	0,0000

Sistema de Teste de 14 Barras do IEEE

Este Sistema é composto por:

- Barra 1 como barra swing;
- Barra 2 como barra de geração ;
- Barras 3, 6 e 8 com compensador síncrono para controle de potência reativa;
- 9 barras de carga.

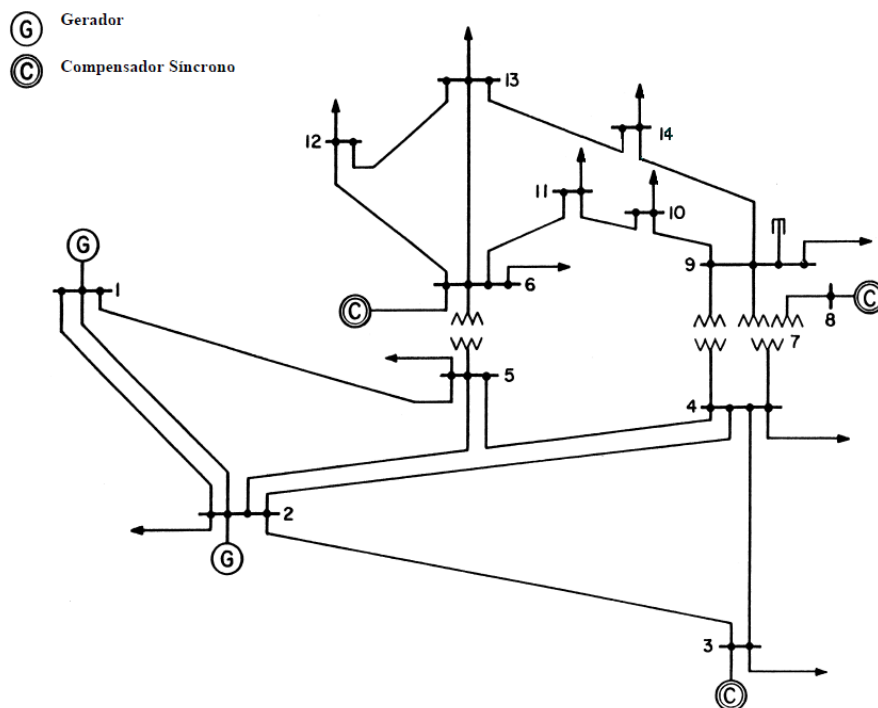


Figura A.2 – Sistema 14 Barras IEEE

Fonte: [15]

Tabela A.3 – Dados do Sistema de Teste 14 Barras do IEEE – Dados de Barra

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	PI	QI	Pg	Qg
		(pu)	(graus)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
1	SWING	1,060	0,00	0,00	0,0	232,4	-16,9
2	PV	1,045	-4,98	21,7	12,7	40,0	42,4
3	PV	1,010	-12,72	94,2	19,0	0,0	23,4
4	PQ	1,019	-10,33	47,8	-3,9	0,0	0,0
5	PQ	1,020	-8,78	7,6	1,6	0,0	0,0
6	PV	1,070	-14,22	11,2	7,5	0,0	12,2
7	PQ	1,062	-13,37	0,0	0,0	0,0	0,0
8	PV	1,090	-13,36	0,0	0,0	0,0	17,4
9	PQ	1,056	-14,94	29,5	16,6	0,0	0,0
10	PQ	1,051	-15,10	9,0	5,8	0,0	0,0
11	PQ	1,057	-14,79	3,5	1,8	0,0	0,0
12	PQ	1,055	-15,07	6,1	1,6	0,0	0,0
13	PQ	1,050	-15,16	13,5	5,8	0,0	0,0
14	PQ	1,036	-16,04	14,9	5,0	0,0	0,0

Tabela A.4 – Dados do Sistema de Teste 14 Barras do IEEE – Dados de Linha

Linha	Resistência	Reatância	Susceptância
	(pu)	(pu)	(pu)
1-2	0,01938	0,05917	0,0528
2-3	0,04699	0,19797	0,0438
2-4	0,05811	0,17632	0,0340
2-5	0,05695	0,17388	0,0346
3-4	0,06701	0,17103	0,0128
4-5	0,01335	0,04211	0,0000
4-7	0,00000	0,20912	0,0000
4-9	0,00000	0,55618	0,0000
5-6	0,00000	0,25202	0,0000
6-11	0,09498	0,19890	0,0000
6-12	0,12291	0,25581	0,0000
6-13	0,06615	0,13027	0,0000
7-8	0,00000	0,17615	0,0000
7-9	0,00000	0,11001	0,0000
9-10	0,03181	0,08450	0,0000
9-14	0,12711	0,27038	0,0000
10-11	0,08205	0,19207	0,0000
12-13	0,22092	0,19988	0,0000
13-14	0,17093	0,34802	0,0000

Barra 9 - shunt capacitivo de 0,190 p.u.

Sistema de Teste de 57 Barras do IEEE

Este Sistema é composto por:

- Barra 1 como barra swing;
- Barras 3, 8 e 12 como barra de geração ;
- Barras 2, 6,9 com compensador síncrono para controle de potência reativa;
- 50 barras de carga.

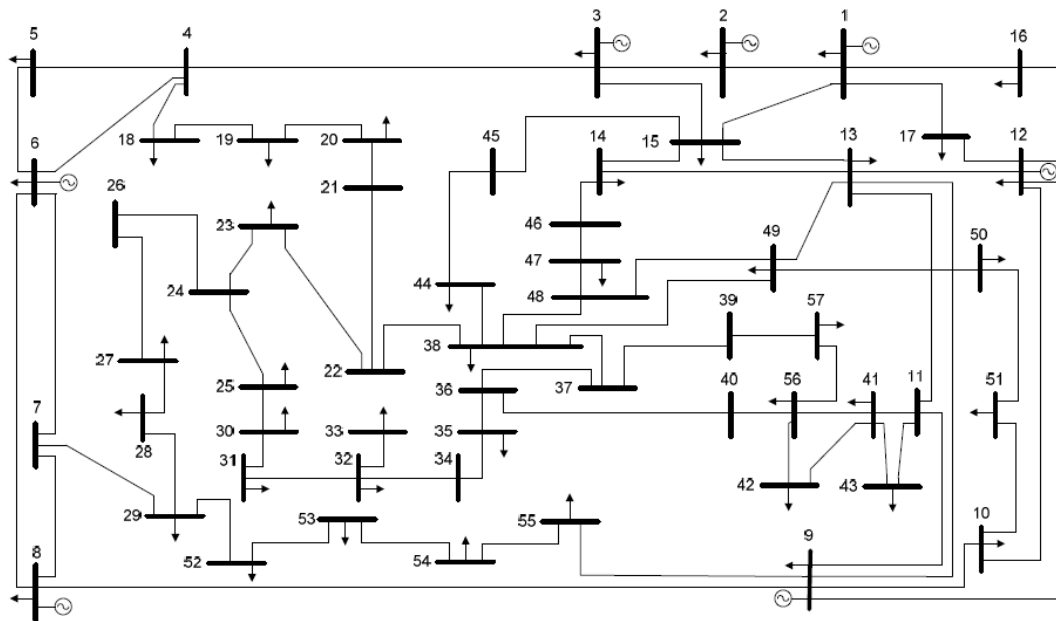


Figura A.3 – Sistema 57 Barras IEEE

Fonte: [40]

Tabela A.5 – Dados do Sistema de Teste 57 Barras do IEEE – Dados de Barra

Barra	Nome	Tipo	Tensão	Ângulo	PI	QI	Pg	Qg
			(pu)	(graus)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
1	2AKanawha	SWING	1,040	0,00	129,0	16,0	0,0	0,0
2	1ATurner	PV	1,010	-1,19	0,0	-1,0	-17,0	50,0
3	1ALogan	PV	0,985	-5,99	40,0	-1,0	-10,0	60,0
4	0ASprigg	PQ	0,981	-7,34	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0ABus 5	PQ	0,976	-8,55	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1ABeaver Ck	PV	0,980	-8,67	0,0	1,0	-8,0	25,0
7	0ABus 7	PQ	0,984	-7,60	0,0	0,0	0,0	0,0
8	1AClinch Rv	PV	1,054	-4,48	450,0	62,0	-140,0	200,0
9	1ASaltville	PV	0,980	-9,59	0,0	2,0	-3,0	9,0
10	0ABus 10	PQ	0,986	-11,45	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0ATazewell	PQ	0,974	-10,19	0,0	0,0	0,0	0,0
12	1AGlen Lyn	PV	1,014	-10,47	310,0	29,0	-150,0	155,0
13	0ABus 13	PQ	0,979	-9,80	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0ABus 14	PQ	0,970	-9,35	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0ABus 15	PQ	0,988	-7,19	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0ABus 16	PQ	1,012	-8,86	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0ABus 17	PQ	1,016	-5,40	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0BSprigg	PQ	1,000	-11,73	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0BBus 19	PQ	0,970	-13,23	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0BBus 20	PQ	0,964	-13,44	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0CBus 21	PQ	1,008	-12,93	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0CBus 22	PQ	1,010	-12,87	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0CBus 23	PQ	1,008	-12,94	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0CBus 24	PQ	0,999	-13,29	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0DBus 25	PQ	1,040	-18,17	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0EBus 26	PQ	0,959	-12,98	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0EBus 27	PQ	0,982	-11,51	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0EBus 28	PQ	0,997	-10,48	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0EBus 29	PQ	1,010	-9,77	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0DBus 30	PQ	0,962	-18,72	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0DBus 31	PQ	0,936	-19,38	0,0	0,0	0,0	0,0
32	0DBus 32	PQ	1,020	-18,51	0,0	0,0	0,0	0,0
33	0DBus 33	PQ	0,947	-18,55	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0CBus 34	PQ	0,959	-14,15	0,0	0,0	0,0	0,0
35	0CBus 35	PQ	0,966	-13,91	0,0	0,0	0,0	0,0
36	0CBus 36	PQ	0,976	-13,64	0,0	0,0	0,0	0,0
37	0CBus 37	PQ	0,985	-13,45	0,0	0,0	0,0	0,0

38	OCBus 38	PQ	1,012	-12,74	0,0	0,0	0,0	0,0
39	OCBus 39	PQ	0,983	-13,49	0,0	0,0	0,0	0,0
40	OCBus 40	PQ	0,973	-13,66	0,0	0,0	0,0	0,0
41	OFTazewell	PQ	1,020	-14,08	0,0	0,0	0,0	0,0
42	OFBus 42	PQ	0,966	-15,53	0,0	0,0	0,0	0,0
43	OGTazewell	PQ	1,010	-11,35	0,0	0,0	0,0	0,0
44	OCBus 44	PQ	1,016	-11,86	0,0	0,0	0,0	0,0
45	OCBus 45	PQ	1,036	-9,27	0,0	0,0	0,0	0,0
46	OCBus 46	PQ	1,050	-11,12	0,0	0,0	0,0	0,0
47	OCBus 47	PQ	1,033	-12,51	0,0	0,0	0,0	0,0
48	OCBus 48	PQ	1,027	-12,61	0,0	0,0	0,0	0,0
49	OCBus 49	PQ	1,036	-12,94	0,0	0,0	0,0	0,0
50	OCBus 50	PQ	1,022	-13,41	0,0	0,0	0,0	0,0
51	OCBus 51	PQ	1,052	-12,53	0,0	0,0	0,0	0,0
52	OEBus 52	PQ	0,980	-11,50	0,0	0,0	0,0	0,0
53	OEBus 53	PQ	0,971	-12,25	0,0	0,0	0,0	0,0
54	OEBus 54	PQ	0,996	-11,71	0,0	0,0	0,0	0,0
55	OESaltville	PQ	1,031	-10,80	0,0	0,0	0,0	0,0
56	OFBus 56	PQ	1,000	-16,07	0,0	0,0	0,0	0,0
57	OFBus 57	PQ	0,965	-16,58	0,0	0,0	0,0	0,0

Barra 18 - shunt capacitivo de 10,0 p.u.

Barra 31 - shunt capacitivo de 10,0 p.u.

Barra 53 - shunt capacitivo de 6,3 p.u.

Tabela A.6 – Dados do Sistema de Teste 57 Barras do IEEE – Dados de Linha

Linha	Resistência	Reatância	Susceptância	TAP
	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)
1-2	0,0083	0,0280	0,1290	1,000
2-3	0,0298	0,0850	0,0818	1,000
3-4	0,0112	0,0366	0,0380	1,000
4-5	0,0625	0,1320	0,0258	1,000
4-6	0,0430	0,1480	0,0348	1,000
6-7	0,0200	0,1020	0,0276	1,000
6-8	0,0339	0,1730	0,0470	1,000
8-9	0,0099	0,0505	0,0548	1,000
9-10	0,0369	0,1679	0,0440	1,000
9-11	0,0258	0,0848	0,0218	1,000
9-12	0,0648	0,2950	0,0772	1,000
9-13	0,0481	0,1580	0,0406	1,000
13-14	0,0132	0,0434	0,0110	1,000
13-15	0,0269	0,0869	0,0230	1,000
14-15	0,0171	0,0547	0,0148	1,000
1-15	0,0178	0,0910	0,0988	1,000
1-16	0,0454	0,2060	0,0546	1,000
1-17	0,0238	0,1080	0,0286	1,000
4-18	0,0000	0,5550	0,0000	0,970
4-18	0,0000	0,4300	0,0000	0,978
5-6	0,0302	0,0641	0,0124	1,000
7-8	0,0139	0,0712	0,0194	1,000
10-12	0,0277	0,1262	0,0328	1,000
11-13	0,0223	0,0732	0,0188	1,000
12-13	0,0178	0,0580	0,0604	1,000
12-16	0,0180	0,0813	0,0216	1,000
12-17	0,0397	0,1790	0,0476	1,000
18-19	0,4610	0,6850	0,0000	1,000
19-20	0,2830	0,4340	0,0000	1,000
21-20	0,0000	0,7767	0,0000	1,043
21-22	0,0736	0,1170	0,0000	1,000
22-23	0,0099	0,0152	0,0000	1,000
23-24	0,1660	0,2560	0,0084	1,000
24-25	0,0000	1,1820	0,0000	1,000
24-25	0,0000	1,2300	0,0000	1,000
24-26	0,0000	0,0473	0,0000	1,043
26-27	0,1650	0,2540	0,0000	1,000
27-28	0,0618	0,0954	0,0000	1,000
28-29	0,0418	0,0587	0,0000	1,000
7-29	0,0000	0,0648	0,0000	0,967
25-30	0,1350	0,2020	0,0000	1,000
30-31	0,3260	0,4970	0,0000	1,000
31-32	0,5070	0,7550	0,0000	1,000
32-33	0,0392	0,0360	0,0000	1,000

34-32	0,0000	0,9530	0,0000	0,975
34-35	0,0520	0,0780	0,0032	1,000
35-36	0,0430	0,0537	0,0016	1,000
36-37	0,0290	0,0366	0,0000	1,000
37-38	0,0651	0,1009	0,0020	1,000
37-39	0,0239	0,0379	0,0000	1,000
36-40	0,0300	0,0466	0,0000	1,000
22-38	0,0192	0,0295	0,0000	1,000
11-41	0,0000	0,7490	0,0000	0,955
41-42	0,2070	0,3520	0,0000	1,000
41-43	0,0000	0,4120	0,0000	1,000
38-44	0,0289	0,0585	0,0020	1,000
15-45	0,0000	0,1042	0,0000	0,955
14-46	0,0000	0,0735	0,0000	0,900
46-47	0,0230	0,0680	0,0032	1,000
47-48	0,0182	0,0233	0,0000	1,000
48-49	0,0834	0,1290	0,0048	1,000
49-50	0,0801	0,1280	0,0000	1,000
50-51	0,1386	0,2200	0,0000	1,000
10-51	0,0000	0,0712	0,0000	0,930
13-49	0,0000	0,1910	0,0000	0,895
29-52	0,1442	0,1870	0,0000	1,000
52-53	0,0762	0,0984	0,0000	1,000
53-54	0,1878	0,2320	0,0000	1,000
54-55	0,1732	0,2265	0,0000	1,000
11-43	0,0000	0,1530	0,0000	0,958
44-45	0,0624	0,1242	0,0040	1,000
40-56	0,0000	1,1950	0,0000	0,958
56-41	0,5530	0,5490	0,0000	1,000
56-42	0,2125	0,3540	0,0000	1,000
39-57	0,0000	1,3550	0,0000	0,980
57-56	0,1740	0,2600	0,0000	1,000
38-49	0,1150	0,1770	0,0060	1,000
38-48	0,0312	0,0482	0,0000	1,000
9-55	0,0000	0,1205	0,0000	0,940