



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

**Estudo do fluxo de carga da continuação:
parametrização automática por perdas de potência
ativa em ramos**

Autor: Edwin Enrique Niño Hernández

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza	IEE/UNIFEI
Prof. Dr. André Luiz Morelato França	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr.	FEEC/UNICAMP

Campinas, fevereiro de 2004.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

N622e Niño Hernández, Edwin Enrique
Estudo do fluxo de carga da continuação:
parametrização automática por perdas de potência ativa
em ramos / Edwin Enrique Niño Hernández. --
Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Carlos Alberto de Castro Junior e Luiz
Carlos Pereira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Métodos de continuação. 2. Colapso
(Eletricidade). 3. Sistemas de energia elétrica –
Estabilidade. I. Castro Junior, Carlos Alberto de. II.
Silva, Luiz Carlos Pereira da. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. IV. Título.

Agradecimentos

Quero expressar meu profundo e sincero agradecimento:

- A Deus.
- Aos Professores Carlos Alberto de Castro Jr. e Luiz Carlos Pereira da Silva pela disposição para trabalhar comigo, excelente orientação, confiança, amizade, respeito e preocupação não só para meu bem-estar, mas também o da minha esposa desde nossa chegada ao Brasil.
- À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e à Universidade Nacional da Colômbia (UNAL) pela sua excelente qualidade acadêmica, o que demonstra as incontestáveis vantagens do ensino público.
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro, essencial na realização deste trabalho de pesquisa.
- Ao meu grande amigo e irmão Alberto Jiménez por acreditar em mim.
- Ao Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE), onde seus professores: André Morelato, Arioaldo Garcia, Carlos A. Castro Jr., Carlos Murari e Fujio Sato demonstraram sempre disposição e respeito, sem os quais não existiria um ambiente tão propício para o desenvolvimento da pesquisa.
- Aos meus amigos do DSEE Walmir de Freitas, Marcos Rider, Adriana Schiffer, Irênio Júnior, Luis Zárate, Antônio Guerra, Paulo Menoia, Eduardo Asada, Maurício Salles, Ana Carolina Canoas, Ahda P. Grilo e Marcos Guimarães por serem sempre prestativos, pacientes e respeitosos em nossas conversas acadêmicas e particulares.
- À Miriam von Zuben pelo excelente suporte técnico à rede computacional do DSEE.
- À Edna Servidone por ser uma excelente funcionária, sempre prestativa e paciente.
- Ao pessoal do Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE) pela ajuda e amizade.
- Ao Aurélio pelo português.
- Ao povo brasileiro por me permitir conhecer parte da sua rica cultura.

*Dedico este trabalho
à minha esposa, Piedad;
aos meus pais, Enrique e Raquel;
à minha irmã, Jeimmy e àqueles
que apostam na idéia de melhorar
a realidade e a imagem da Colômbia.*

Resumo

O método de Newton é considerado inadequado para o cálculo do ponto de máximo carregamento (PMC) de sistemas de potência, pois (a) apresenta dificuldades numéricas na vizinhança de PMC, e (b) sua matriz Jacobiana é singular no PMC. Os métodos da continuação constituem-se em ferramentas úteis para o traçado da curva de soluções (curva PV), evitando a ocorrência de dificuldades numéricas. Uma parametrização é necessária para a obtenção de um sistema de equações modificado e bem condicionado. Neste trabalho utilizam-se as perdas de potência ativa em ramos como parâmetros. São investigados procedimentos para a escolha automática do parâmetro mais apropriado. Esses procedimentos incluem a utilização de índices de estabilidade de tensão, cujos cálculos são muito rápidos. Simulações mostraram que o método proposto permite o traçado de toda a curva de soluções muito eficientemente.

Abstract

The conventional Newton method is considered inadequate for computing the maximum loading point (MLP) of power systems, since (a) it presents numerical difficulties in the vicinity of MLP and (b) the load flow Jacobian matrix is singular at MLP. Continuation methods are useful tools to trace the solution curve (PV) without experiencing numerical difficulties. A parametrization is necessary to obtain a modified, well-conditioned set of load flow equations. In this work the real power losses branches are used as continuation parameters. In addition, procedures for an automatic choice of the most appropriate parameter are investigated. Such procedures include the utilization of fast voltage stability indices. Simulation results have shown that the proposed method is able to trace the whole solution (PV) curve very efficiently.

Sumário

1	Introdução	1
2	Estabilidade de sistemas elétricos de potência	5
2.1	Tipos de perturbações	5
2.2	Tipos de estabilidade	5
2.2.1	Estabilidade de ângulo	6
2.2.1.1	Estabilidade de pequenos sinais	6
2.2.1.2	Estabilidade transitória	7
2.2.2	Estabilidade de tensão [12]	8
2.2.2.1	Estabilidade de tensão de grandes distúrbios	8
2.2.2.2	Estabilidade de tensão de pequenos distúrbios	8
2.2.2.3	Colapso de tensão	9
2.2.2.4	Bifurcação	11
2.2.2.5	Métodos de análise de estabilidade de tensão	11
3	Fluxo de carga da continuação	19
3.1	Introdução	19
3.2	Método da continuação	21
3.3	Fluxo de carga da continuação	21
3.3.1	Reformulação das equações de fluxo de carga	23
3.3.2	Passo Preditor	25
3.3.3	Passo Corretor	28

3.3.4	Parametrização	29
3.3.5	Controle de tamanho do passo	31
3.4	Parametrização por perdas de potência ativa em ramos	32
3.5	Testes e resultados	34
3.5.1	Controle de passo	35
3.5.2	Parametrização	37
3.5.2.1	Carregamento como parâmetro da continuação	37
3.5.2.2	Consideração dos limites de potência reativa	37
3.5.2.3	Magnitude de tensão como parâmetro da continuação	38
3.5.2.4	Perdas de potência ativa nos ramos como parâmetro da continuação	41
4	Índices de proximidade ao colapso de tensão	45
4.1	Introdução	45
4.2	Índices nas linhas	45
4.2.1	Consideração de linhas longas	51
4.2.2	Consideração da posição do <i>tap</i>	51
4.2.3	Consideração de <i>shunt</i> de barra (na barra R)	52
4.3	Índices em função da máxima transferência de potência	52
4.4	Índices l_{pq}	56
4.5	Testes e resultados	59
4.5.1	Índices l_p e l''_q	59
4.5.2	Índices L_{SR} e $L_{l_{SR}}$	63
4.5.3	Índice l_{pq}	65
4.6	Dificuldades numéricas e aproximações	68
5	Determinação automática do parâmetro da continuação	71
5.1	Introdução	71
5.2	Determinação inicial do parâmetro	71
5.3	Algoritmo proposto	72

5.4	Critérios para a seleção automática do ramo	72
5.4.1	Maior índice lp (mi)	72
5.4.2	Barra da menor tensão (mt)	75
5.4.3	Maior abertura angular (ma)	76
5.4.4	Maiores perdas ativas (mp)	78
5.4.5	Barra com a maior variação de tensão (vt)	79
5.4.6	Maior variação do índice (vi)	80
5.4.7	Maior variação da abertura angular (va)	81
5.4.8	Maior variação das perdas ativas (vp)	82
5.4.9	Outros critérios utilizados	82
6	Resultados	85
6.1	Introdução	85
6.2	Sistema de 14 barras 20 ramos	86
6.3	Sistema de 30 barras 41 ramos	88
6.4	Sistema de 57 barras 80 ramos	90
6.5	Sistema de 118 barras 186 ramos	92
6.6	Sistema de 300 barras 411 ramos	94
6.7	Sistema Norte-Nordeste Brasileiro	95
6.8	Sistema de 904 barras e 1283 ramos	97
6.9	Comparação de resultados	101
7	Conclusões	107
7.1	Fluxo de carga da continuação	107
7.2	Índices de proximidade ao colapso de tensão	108
7.3	Determinação do parâmetro da continuação	108
7.4	Outras considerações	109
	Referências Bibliográficas	109

A	Sistemas elétricos de potência testados	115
A.1	Sistema New England	115
A.2	Sistema de 14 barras	117
A.3	Sistema de 30 barras	118
A.4	Sistema de 118 barras	119
B	Divulgação da pesquisa	121

Lista de Figuras

2.1	Estabilidade de pequenos distúrbios.	7
2.2	Classificação da estabilidade em SEP.	9
2.3	Curva PV típica.	13
2.4	Curva PV e regiões de operação.	13
2.5	Evolução da convergência das tensões para o sistema <i>New England</i>	16
2.6	Evolução da convergência dos ângulos para o sistema <i>New England</i>	16
2.7	Evolução da soma dos valores absolutos dos mismatches ativos e reativos do fluxo de carga convencional para o sistema <i>New England</i>	17
3.1	Rede de 3 barras e 2 ramos.	19
3.2	Curva PV para rede de 3 barras e 2 ramos.	20
3.3	Procedimento preditor-corretor do fluxo de carga da continuação [12].	23
3.4	Preditor tangente e preditor secante.	26
3.5	Curva PV traçada só com o passo preditor	28
3.6	Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,1	35
3.7	Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,01	36
3.8	Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,001	36
3.9	Curva PV utilizando λ como parâmetro da continuação	37
3.10	Curva PV utilizando λ como parâmetro da continuação e considerando limites de potência reativa	38
3.11	Curva PV utilizando V_1 como parâmetro da continuação com passo igual a 0,01	39
3.12	Curva PV utilizando V_1 como parâmetro da continuação com passo igual a 0,001	39
3.13	Magnitude de tensão na barra 1. Comportamento quase plano	40

3.14	Curva PV utilizando V_7 como parâmetro da continuação	40
3.15	Curva PV utilizando V_{25} como parâmetro da continuação	41
3.16	Curva PV para o sistema de 14 barras utilizando diferentes ramos como parâmetro da continuação.	42
4.1	Rede exemplo de 2 barras	46
4.2	Circuito equivalente T	46
4.3	Modelamento típico de uma linha de transmissão. Parâmetros para rede de duas barras	53
4.4	Aproximação da carga para uma barra conectada a vários ramos.	53
4.5	Índices e perdas pelos ramos para o sistema de 14 barras.	60
4.6	Índice l_p e perdas ativas pelos ramos para o sistema de 14 barras.	61
4.7	Índice l_q e perdas reativas pelos ramos para o sistema de 14 barras.	62
4.8	Índice l_p ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.	63
4.9	Índice L_{SR} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.	64
4.10	Índice $L_{l_{SR}}$ ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.	65
4.11	Índice l_{pq} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.	66
4.12	Índice l_{pq1} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.	67
4.13	Rede de duas barras	68
4.14	Curva PV e índices para sistema de duas barras.	68
4.15	Curva PV e índices para sistema de 14 barras.	69
4.16	Pontos escolhidos para o cálculo dos índices lpq e $lpq1$	70
5.1	Algoritmo para seleção automática do parâmetro da continuação	73
5.2	Algoritmo do fluxo da continuação com parametrização por perdas	74
5.3	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mi	75
5.4	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mt	76
5.5	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério ma	77
5.6	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mp	78
5.7	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério vt	79

5.8	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério <i>vi</i>	80
5.9	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério <i>va</i>	81
5.10	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério <i>vp</i>	82
5.11	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério <i>vm</i>	83
5.12	Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério <i>mq</i>	84
6.1	Resultados sistema de 14 barras utilizando o critério <i>mt</i>	86
6.2	Resultados sistema de 14 barras utilizando o critério <i>im</i>	87
6.3	Resultados sistema de 30 barras utilizando o critério <i>va</i>	88
6.4	Resultados sistema de 30 barras utilizando o critério <i>vp</i>	89
6.5	Resultados sistema de 57 barras utilizando o critério <i>mq</i>	90
6.6	Resultados sistema de 57 barras utilizando o critério <i>qm</i>	91
6.7	Resultados sistema de 118 barras utilizando o critério <i>mt</i>	92
6.8	Resultados sistema de 118 barras utilizando o critério <i>vt</i>	93
6.9	Resultados sistema de 300 barras utilizando o critério <i>vm</i>	94
6.10	Resultados sistema de 300 barras utilizando o critério <i>mm</i>	95
6.11	Resultados sistema Norte-Nordeste Brasileiro utilizando o critério <i>mp</i>	96
6.12	Resultados sistema de Norte-Nordeste Brasileiro utilizando o critério <i>vl</i>	97
6.13	Resultados sistema de 904 barras utilizando o critério <i>mtlpq</i>	98
6.14	Resultados sistema de 904 barras utilizando o critério <i>vtlpq</i>	99
6.15	Parametrização por tensão para o sistema de 14 barras.	103
6.16	Parametrização por tensão para o sistema de 30 barras.	104
6.17	Parametrização por tensão para o sistema de 57 barras.	105
6.18	Parametrização por tensão para o sistema Norte-Nordeste brasileiro.	106
A.1	Diagrama unifilar do sistema de 14 barras	117
A.2	Diagrama unifilar do sistema de 30 barras	118
A.3	Diagrama unifilar da parte principal do sistema de 118 barras	119

Lista de Tabelas

3.1	Últimos valores de λ atingidos usando as perdas ativas nos ramos como parâmetro da continuação (sistema IEEE 14).	43
4.1	Índices de estabilidade deduzidos para o ramo S-R.	52
4.2	Índices lp e lq para o sistema IEEE 14 (caso base)	61
4.3	Cálculo dos índices lpq e $lpq1$ para o sistema IEEE 14	70
6.1	Crterios de escolha do parâmetro da continuação	101
6.2	Parametrização por tensão vs. parametrização por perdas de potência ativa .	102
6.3	Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 14 barras	103
6.4	Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 30 barras	104
6.5	Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 57 barras	105
6.6	Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema Norte-Nordeste	106
A.1	Dados dos ramos do sistema <i>New England</i>	115
A.2	Dados dos barramentos do sistema <i>New England</i>	116

Capítulo 1

Introdução

O contínuo aumento de demanda de energia elétrica e a transferência de elevadas quantidades de potência, somada a exigências econômicas e ambientais, fazem com que os sistemas elétricos de potência (SEP) possam ter problemas por trabalharem muito próximos de seus limites de estabilidade e torna-se cada vez mais importante manter a eficiência e a segurança na operação destes sistemas.

Estes assuntos são amplamente estudados na análise de estabilidade de tensão em SEP. Alguns problemas de instabilidade em SEP associam-se, por exemplo, ao decréscimo descontrolado de tensão, chamado *colapso de tensão*, e podem ser estudados na análise *estática* de estabilidade de tensão. Esta análise pode ser realizada através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento caracterizadas pelas curvas PV, QV e SV, as quais possibilitam a compreensão das diferentes condições de operação e demanda de carga do sistema. Entre outras aplicações, estes perfis são usados para:

- Determinar os limites de transferência de potência entre áreas de um sistema.
- Ajustar margens de segurança.
- Observar o comportamento das tensões das barras do sistema.
- Comparar estratégias de planejamento.

Na estabilidade estática de tensão existem vários métodos para a análise de problemas de instabilidade. Este trabalho centra-se especificamente em dois: os métodos da continuação e os índices de proximidade ao colapso de tensão.

Os métodos da continuação são ferramentas úteis para gerar curvas solução (p.e. PV e $P\theta$), baseados na determinação aproximada dos pontos de equilíbrio a partir da variação

de um parâmetro, encontrando as soluções para as equações algébricas não lineares de um determinado sistema.

Vários autores, como [3], apresentam estes métodos em outras formas para determinar a proximidade ao ponto de bifurcação em sistemas dinâmicos em geral. O modelamento dos SEP adequam-se a este tipo de sistemas dinâmicos. Assim, estes métodos podem ser aplicados, por exemplo, à análise do colapso de tensão.

Além destes métodos, os índices de proximidade ao colapso de tensão aparecem como uma ferramenta atraente na análise de estabilidade de tensão devido à sua facilidade e velocidade de cálculo. Este índices podem ser classificados segundo o método de identificação, isto é, para barras críticas ou para ramos críticos do sistema. Este trabalho utiliza os índices para identificação do ramos críticos por oferecer uma melhor localização e indicação da causa do colapso de tensão pelo aumento de carregamentos de potência ativa ou reativa.

Uma das principais dificuldades do método da continuação aplicado a SEP (fluxo de carga da continuação), está relacionado à escolha conveniente do parâmetro da continuação, pois desta escolha dependerá o sucesso ou não do método no traçado completo dos perfis de tensão.

Ao longo do trabalho aparecem descrições de cada um dos métodos (fluxo de carga da continuação e índices de proximidade ao colapso de tensão) com o objetivo de combiná-los adequadamente e propor uma alternativa para escolher automaticamente o parâmetro da continuação e traçar a totalidade da curva PV em todos os sistemas testados.

O trabalho inicia com uma descrição que abrange os diversos tipos da estabilidade de tensão em SEP, chegando à estabilidade estática de tensão e ao desenho das curvas PV. No capítulo 3 são apresentadas as principais características do fluxo de carga da continuação, partindo da reformulação das equações do fluxo de carga convencional de Newton Raphson e apresentando seus quatro componentes, preditor, corretor, controle de passo e parametrização. O último deles é tratado com especial detalhe. Já no capítulo 4 é feita uma análise dos índices de proximidade ao colapso de tensão, baseados em fluxos de potência ativa e reativa; dois deles estudados em [22] e [26] e mais um proposto.

No capítulo 5 ilustra-se a combinação das técnicas da continuação com os índices de proximidade, propondo diversos critérios para determinar automaticamente o parâmetro da continuação.

No capítulo 6 é apresentada uma quantidade considerável de resultados do método de

parametrização proposto para várias redes testadas.

Finalmente aparecem algumas conclusões e comentários adicionais avaliando os tópicos tratados, método proposto e sugerindo algumas idéias sobre novos trabalhos de pesquisa.

Capítulo 2

Estabilidade de sistemas elétricos de potência

Para um Sistema Elétrico de Potência (SEP), a estabilidade pode ser definida como a capacidade de manter um estado de equilíbrio sob condições normais de operação e de se recuperar após a ocorrência de uma perturbação em um novo estado de operação aceitável. Assim, a estabilidade em geral é uma questão de muito interesse para os operadores e planejadores de sistemas de potência.

2.1 Tipos de perturbações

A estabilidade depende fortemente da magnitude, do local da perturbação e do estado de operação inicial do sistema. Assim, existem vários tipos de perturbações que podem comprometer a estabilidade do SEP. Estas são:

- Grandes perturbações; uma falha na rede de alta tensão (curto-circuito), a perda de uma unidade geradora muito grande ou a conexão e desconexão de cargas de grande porte são exemplos de grandes impactos.
- Pequenas perturbações, como conexões e desconexões de pequenas cargas ou a mudança aleatória de carga dentro de condições normais de operação. Por exemplo variações de carga durante o dia.

2.2 Tipos de estabilidade

No seu estudo, a estabilidade pode ser classificada em estabilidade de ângulo e estabilidade de tensão.

2.2.1 Estabilidade de ângulo

A estabilidade de ângulo é definida como a capacidade do sistema de manter o sincronismo das máquinas geradoras conectadas ao sistema após a ocorrência de um distúrbio.

Este estudo baseia-se na operação do sistema sob uma condição de carga quando este é perturbado, causando reajuste nos ângulos de potência das máquinas síncronas. Este ajuste é consequência de um desbalanço do sistema entre a geração e a carga, resultando numa nova condição do estado de operação [13]. O ajuste à nova condição de operação é chamado *período transitório*. O comportamento do sistema durante este tempo é chamado de desempenho dinâmico do sistema. Um sistema é estável se a sua resposta oscilatória de potência durante o período transitório após um distúrbio é amortecido e o sistema fixa-se em um tempo finito para uma nova condição de estado de operação.

A estabilidade de ângulo pode ser dividida em estabilidade de pequenos sinais e estabilidade transitória.

2.2.1.1 Estabilidade de pequenos sinais

A análise de estabilidade de pequenos sinais é feita para perturbações menores em que o sistema pode ser linearizado. A instabilidade de pequenos sinais é *não oscilatória* quando há um aumento monotônico do ângulo do rotor do gerador, como se mostra na figura 2.1.b., Por exemplo, para um gerador ligado a um sistema na ausência de reguladores automáticos de tensão por problemas de falta de torque sincronizante e é *oscilatória* quando há um aumento das oscilações do rotor por problemas de falta de torque de amortecimento e ações de controle instáveis como se apresenta na figura 2.1.c.

A natureza da resposta para pequenos distúrbios depende de vários fatores como as condições iniciais de operação e o tipo de controles usados nos geradores síncronos.

Este tipo de estabilidade é conhecida também em grande parte da literatura como *estabilidade dinâmica*. Porém, devido a diferenças na associação deste termo à estabilidade transitória recomenda-se não ser usado.

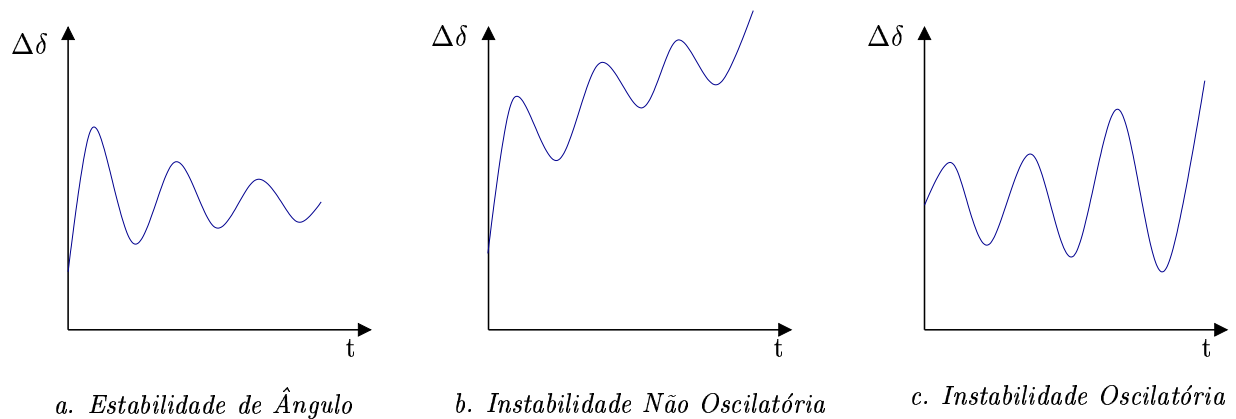


Figura 2.1: Estabilidade de pequenos distúrbios.

2.2.1.2 Estabilidade transitória

Manter o sincronismo das máquinas geradoras quando ocorrer grandes perturbações é referido na literatura como um estudo próprio da estabilidade transitória. Para este tipo de estabilidade não é possível linearizar as equações que representam o sistema pois sua análise envolve a relação entre a potência e o ângulo de tensão que é não linear. Porém, existem vários métodos de integração numérica no domínio do tempo para determinar este comportamento como:

- Método de Euler.
- Método de Euler Modificado.
- Métodos de Runge-Kutta.
- Métodos Implícitos.

Estes métodos são muito sensíveis ao passo de integração e às condições iniciais do sistema.

A *estabilidade sub-transitória* é considerada nos primeiros milisegundos da estabilidade transitória (até ≈ 50 ms).

Da mesma forma, a estabilidade transitória depende do ponto inicial de operação e do tamanho do distúrbio. As contingências mais analisadas para este tipo de estabilidade são os curto-circuitos fase-terra, fase-fase-terra e trifásico e ocasionalmente falhas em barras e em transformadores. A análise abrange quando uma falta pode ser removida mediante a operação adequada de disjuntores e em alguns casos considerando a religamento do elemento.

2.2.2 Estabilidade de tensão [12]

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade de manter as tensões em todas as barras do sistema em uma faixa de tolerância aceitável tanto para as condições normais quanto depois da ocorrência de uma perturbação.

A instabilidade de tensão é um fenômeno dinâmico que ocorre por períodos de um minuto ou mais causando um declínio progressivo e descontrolado da tensão após o sistema ter sido submetido a uma perturbação e que interrompe o controle de potência reativa em um SEP.

Com o crescimento da demanda de potência nos últimos anos os sistemas têm operado sob condições de alto carregamento e a instabilidade de tensão passou a ser considerada como mais um fator limitante na transmissão. A instabilidade de tensão é um fenômeno local. Porém, as suas conseqüências podem afetar uma área extensa do sistema.

Da mesma maneira que a estabilidade de ângulo, a estabilidade de tensão pode ser dividida em dois tipos, a estabilidade de grandes e de pequenos distúrbios.

2.2.2.1 Estabilidade de tensão de grandes distúrbios

A estabilidade de tensão de grandes distúrbios é a capacidade do sistema de manter as tensões numa faixa adequada após a ocorrência de grandes perturbações. Esta capacidade tem uma profunda dependência das características da carga e das interações de proteções e controles como ULTCs e limitadores de corrente de campo nos geradores, os quais têm dinâmicas não lineares.

2.2.2.2 Estabilidade de tensão de pequenos distúrbios

O processo básico de contribuição para a instabilidade de tensão de pequenos distúrbios é essencialmente de natureza de regime permanente. Assim, pode-se determinar margens de estabilidade e examinar várias condições de estados pós-contingência.

Em geral, problemas de estabilidade de tensão ocorrem em sistemas altamente carregados e são influenciados pelas características do sistema de transmissão, dos geradores, das cargas e dos dispositivos de compensação de potência ativa e reativa.

A figura 2.2 apresenta uma identificação geral dos tipos de estabilidade descritos anteriormente.

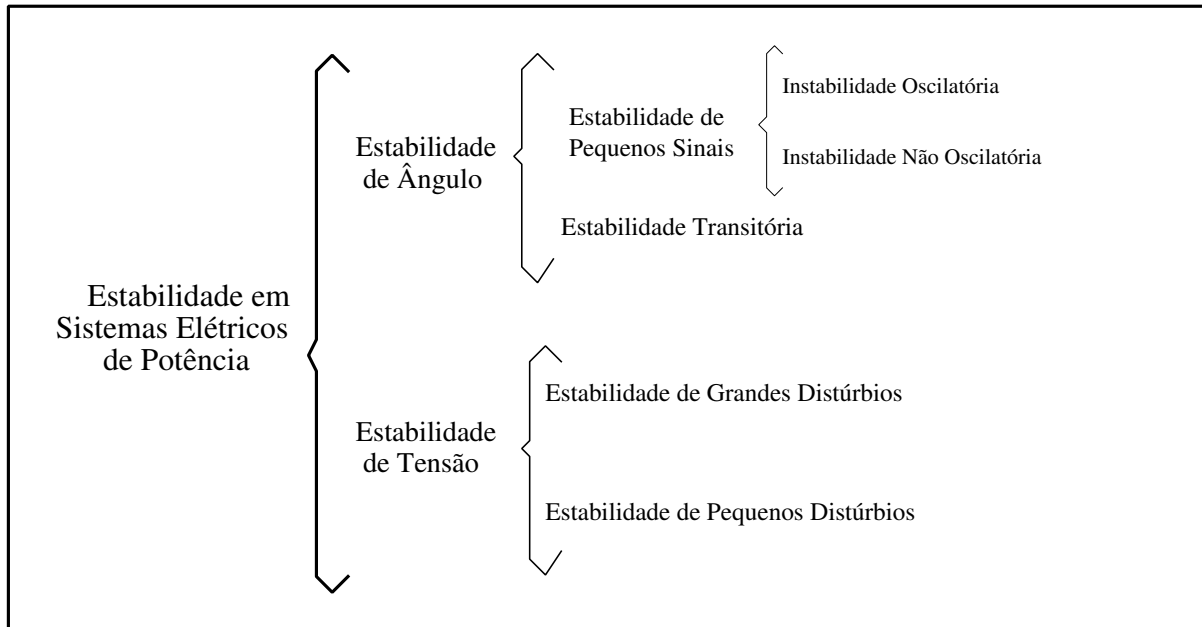


Figura 2.2: Classificação da estabilidade em SEP.

Além desta classificação a estabilidade pode ser dividida segundo o tempo de análise em:

- Curto prazo: 0 a 10 segundos.
- Médio prazo: 10 segundos a poucos minutos.
- Longo prazo: poucos minutos a (\approx 10 minutos).

Geralmente os problemas de estabilidade de médio e longo prazo estão associados com respostas inadequadas de equipamentos, com uma coordenação ruim de equipamentos de proteção e controle ou com reservas insuficientes de potência ativa e reativa.

2.2.2.3 Colapso de tensão

O fenômeno de colapso de tensão tem sido atribuído à falta de compensação reativa pelo qual eventos que causam instabilidade e conduzem a um perfil de tensão muito baixo para uma parte significativa do sistema [14]. O colapso de tensão pode ser causado por mudanças severas do sistema, por exemplo contingências em cascata.

Quando o sistema é submetido a aumentos na demanda de potência reativa, as reservas dos geradores e a ação dos compensadores conseguem manter as tensões nas barras em um nível aceitável atingindo uma operação do sistema em condições estáveis. Porém, existem ocasiões em que isto não é possível devido à combinação de eventos que levam ao colapso de tensão causando também *blecautes* em uma parte considerável do sistema.

Os cenários típicos de colapso de tensão são:

- A operação anormal das unidades geradoras devido à saída de operação de centros de carga.
- Saídas de linhas de transmissão podem causar sobrecargas nas linhas vizinhas, aumentando as perdas de potência reativa.
- Depois da perda de uma linha poderá existir uma redução considerável da tensão.
- A redução de tensão nos centros de carga poderá refletir-se nos sistemas de distribuição.
- Com a variação nos *taps* dos transformadores a potência reativa fornecida pelos geradores pode crescer, atingindo os seus limites e fazendo que sua tensão terminal caia. Esta situação pode ser transferida a outras unidades geradoras tornando o sistema instável.

Este fenômeno é não linear e é natural aplicar técnicas dinâmicas de análise não linear como a teoria de bifurcação, onde [10] e [15], por exemplo, têm mostrado sua relação direta com problemas de colapso de tensão. Mas nem todos os eventos de colapso de tensão em sistemas de potência podem ser associados a bifurcações. Alguns problemas de colapso de tensão podem ser causados pela dinâmica rápida que nada tem a ver com o fenômeno de bifurcação. Neste caso grandes distúrbios deixam o sistema fora da sua região de estabilidade e produz problemas de tensão. Além disso, também existem técnicas de inteligência artificial como redes neurais, lógica difusa, etc. que podem ser uma ferramenta útil na análise deste fenômeno. Porém, modelos de fluxo de carga são muito utilizados por oferecer uma análise rápida das condições de operação, embora não represente exatamente todos os dispositivos envolvidos no colapso de tensão. Esta análise será tratada com mais detalhe na seção 2.2.2.5.

Têm sido definidos vários critérios para prever problemas de tensão como o limite máxima transferência de potência (*curva PV*), a capacidade de potência reativa (*curva QV*) e limites de estabilidade [14]. Claramente a decisão da escolha certa do critério e a sua justificativa dependem dos operadores e planejadores de sistemas elétricos de potência.

2.2.2.4 Bifurcação

Mudanças na estrutura qualitativa das soluções de um sistema para certos valores de parâmetros chamam-se *bifurcações* e os valores dos parâmetros são chamados *valores de bifurcação* [16]. O termo bifurcação foi originalmente usado por Poincaré para descrever o *splitting* ou a divisão do equilíbrio na família das equações diferenciais. Em sistemas de potência existem vários tipos de bifurcações. As mais conhecidas são as do tipo *sela-nó* e as do tipo *Hopf*.

A bifurcação de tipo *sela-nó* é uma mudança qualitativa quando o ponto de equilíbrio estável do sistema desaparece. As bifurcações *sela-nó* conhecidas também como *turning points* [10] são bifurcações locais de sistemas dinâmicos não lineares da forma:

$$\dot{x} = f(x, \lambda),$$

onde $\lambda \in \mathbf{R}$ é um parâmetro escalar particular que conduz o sistema para a bifurcação; ou seja, o ponto de equilíbrio pode até desaparecer ou ser instável dependendo da forma em que o parâmetro varia na estrutura específica do sistema. As curvas PV e QV, muito comuns em sistemas de potência para analisar a estabilidade e o colapso de tensão, são exemplos de bifurcação no *ponto de máxima transferência de potência* ou também chamado *ponto de bifurcação*.

Assim, quando a matriz de sensibilidade do sistema linearizado apresenta um *autovalor* igual a zero, tem-se a bifurcação tipo *sela-nó*, também conhecida como bifurcação estática [17].

A bifurcação de tipo *Hopf* também mostra problemas de colapso que junto à bifurcação tipo *sela-nó* são reconhecidas como as principais responsáveis pela instabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência e é uma mudança qualitativa do estado em regime permanente de um ponto de equilíbrio para uma oscilação, seja crescente ou decrescente.

Quando a matriz de sensibilidades do sistema linearizado tem um par simples de *autovalores* complexos que atravessam o eixo imaginário do plano complexo tem-se a bifurcação tipo *Hopf*.

2.2.2.5 Métodos de análise de estabilidade de tensão

A estabilidade de tensão pode ser analisada por métodos dinâmicos e estáticos. Os métodos de análise dinâmica refletem fielmente o comportamento não linear no domínio do tempo. Porém, é preciso utilizar uma grande quantidade de parâmetros e o tempo computacional os tornam inviáveis em um ambiente de supervisão *on-line*, onde a sensibilidade é também um fator importante. Aliás, as dinâmicas que influenciam a estabilidade de tensão

são usualmente lentas. Assim, a estabilidade de tensão pode ser analisada em vários casos por métodos estáticos.

A análise estática anula as derivadas das variáveis de estado em relação ao tempo e reduzindo a representação do sistema só as equações algébricas que requerem muito menos tempo computacional, viabilizando sua aplicação *on-line*. Assim, a análise estática, desde que consiga desenvolver métodos computacionais eficientes, permite uma estimação precisa da margem de estabilidade, não só para o ponto de operação atual, mas também uma lista de contingências críticas pre-selecionadas, contribuindo assim para uma análise de segurança prospectiva de curto prazo mais abrangente.

É possível estimar o ponto de bifurcação tipo *sela-nó* através de um método estático, embora este fenômeno seja dinâmico. Assim por exemplo em [18] mostram-se resultados similares no estudo do colapso de tensão do ponto de vista da análise dinâmica e estática.

A análise estática da estabilidade de tensão em SEP pode ser realizada através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas PV, QV, e SV). Estas curvas possibilitam a compreensão das diferentes condições de operação do sistema para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico nacional e internacional [1], [2], para avaliação da margem de estabilidade de tensão. Entre outras aplicações, estes perfis são usados para determinar os limites de transferência de potência de um sistema e analisar estratégias de planejamento como o comportamento das tensões das barras do sistema mantendo margens de segurança. A figura 2.3 mostra a curva PV típica, em que são mostradas as grandezas básicas de interesse. A tensão V_0 é a tensão nas condições iniciais chamadas de *caso base*. O caso base corresponde a uma carga P_0 . Conforme a carga aumenta, nota-se um decréscimo da tensão, até o ponto correspondente a uma carga P_{cr} , que é a máxima carga que os sistemas de geração e transmissão conseguem atender. Este ponto é chamado *ponto de máximo carregamento* (PMC) ou *ponto crítico*. A tensão nesse ponto é igual a V_{cr} .

A figura 2.4 mostra a curva PV dividida em regiões de operação. A região factível é aquela para a qual as equações de fluxo de carga apresentam solução. Do ponto de vista de estabilidade do sistema elétrico, esta solução pode ser estável ou instável. A região infactível é aquela para a qual as equações de fluxo de carga não apresentam solução.

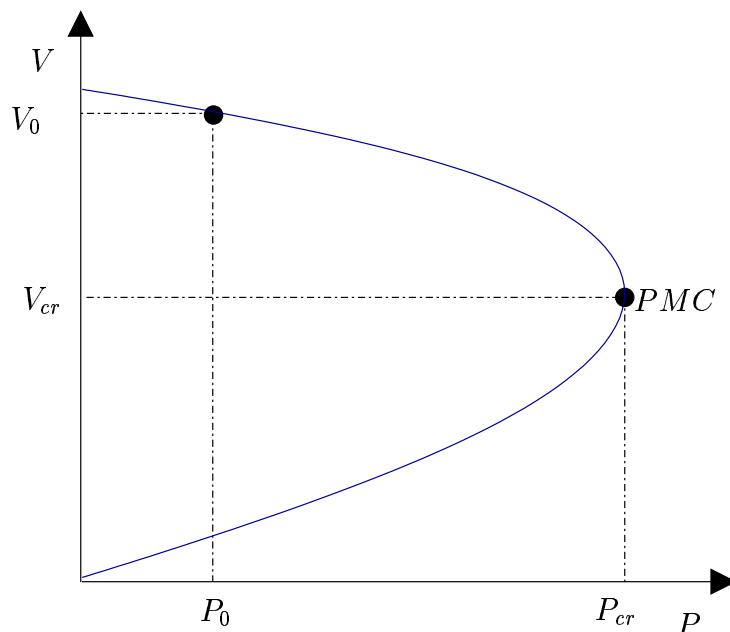


Figura 2.3: Curva PV típica.

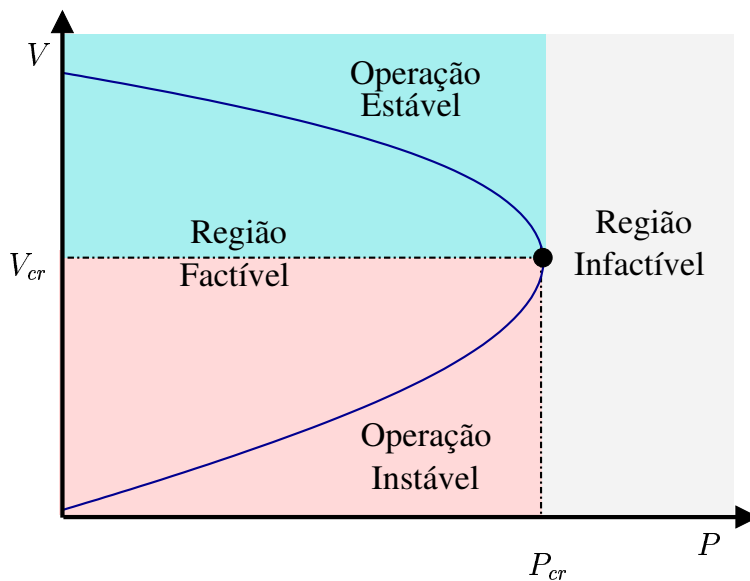


Figura 2.4: Curva PV e regiões de operação.

Alguns métodos de análise de estabilidade de tensão podem calcular as margens de estabilidade de tensão e outros os índices de proximidade à instabilidade de tensão.

- Índices de estabilidade:

O objetivo dos índices de estabilidade é mostrar o valor máximo que a demanda total poderia ter sem causar instabilidade de tensão. Existem vários métodos para calcular o índice de estabilidade; alguns deles são:

- Determinante da matriz jacobiana.
- Sensibilidade.
- Múltiplas soluções.
- Autovalor.
- Mínimo valor singular.

Sua finalidade é definir uma grandeza escalar observável em função da mudança dos parâmetros.

- Margem de estabilidade:

A margem de estabilidade de tensão determina o quão próximo o sistema está do seu limite, ou seja, da instabilidade de tensão e é definida como a diferença entre o valor atual de um parâmetro e o valor no ponto crítico de estabilidade. Por exemplo, com relação à figura 2.3, a margem de estabilidade é dada por :

$$\Delta P = P_{cr} - P_0 \quad (2.1)$$

Existem vários métodos para obter a margem de estabilidade; desde os mais imediatos como o fluxo de carga convencional, até os que envolvem certa complexidade matemática. A seguir são apresentados alguns deles:

- Fluxo de carga convencional:

O fluxo de carga convencional pode ser apresentado de acordo com a seguinte formulação:

$$\underline{F}(\underline{x}) = \underline{0} \quad (2.2)$$

ou

$$\underline{F}(\underline{\theta}, \underline{V}) = \underline{0}, \quad (2.3)$$

em que $x \in \mathbf{R}^n$ representa o vetor das *variáveis de estado* composto por V , que é o vetor das magnitudes de tensões nodais e θ , que é o vetor dos ângulos de fase nodais. $\underline{F} \in \mathbf{R}^n$ é um vetor composto pelas equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais. Assim, a dimensão de \underline{F} e de x é a mesma.

A solução convencional deste conjunto de equações é obtida por um processo iterativo através do método de Newton, onde o seguinte sistema de equações é resolvido:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix}}_J \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

em que:

$$J_{P\theta} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad J_{PV} = \frac{\partial P}{\partial V}$$

$$J_{Q\theta} = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad J_{QV} = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

J é a matriz *Jacobiana*, ΔP e ΔQ são os *mismatches* de potência ativa e reativa, e $\Delta\theta$ e ΔV são as correções no estado da rede (magnitude de tensão e ângulo de fase).

Para ilustrar melhor, nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7 são apresentados os resultados das variáveis de estado e os mismatches do sistema *New England* utilizando o fluxo de carga convencional a partir da condição *flat start*, ou seja, todas as tensões (exceto nas barras *slack* e PV) em $1 \angle 0$. Os dados deste sistema são mostrados no Apêndice A.1. Para este caso o método convergiu em três iterações.

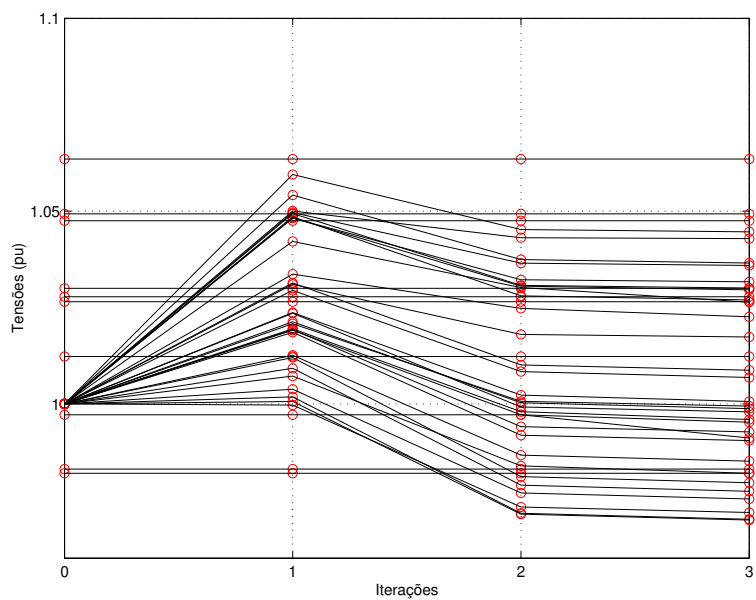


Figura 2.5: Evolução da convergência das tensões para o sistema *New England*.

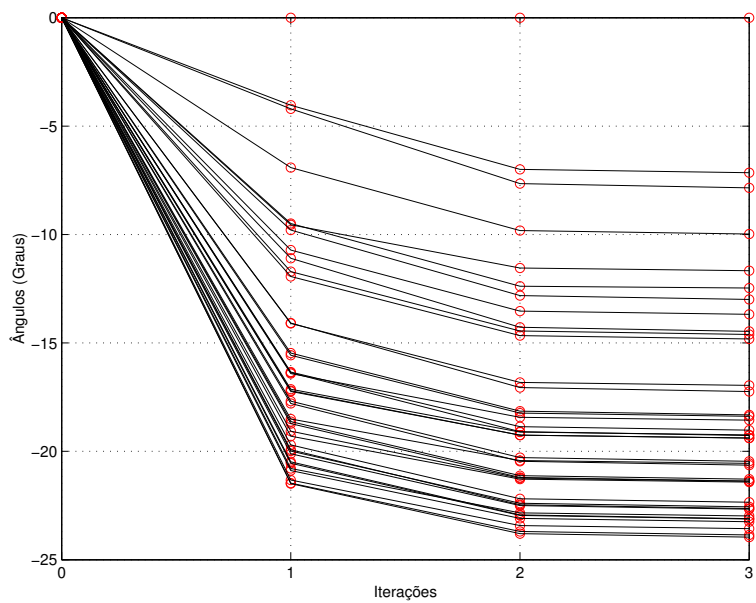


Figura 2.6: Evolução da convergência dos ângulos para o sistema *New England*.

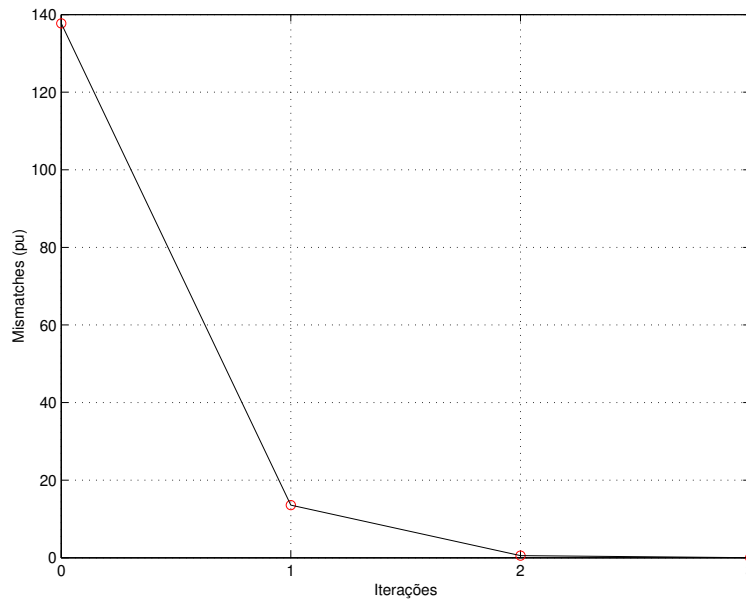


Figura 2.7: Evolução da soma dos valores absolutos dos mismatches ativos e reativos do fluxo de carga convencional para o sistema *New England*.

Para obter a margem de estabilidade deve-se que reformular o sistema acrescentando o parâmetro $\lambda \in \mathbf{R}$ que representa o fator de carregamento do sistema. Esta reformulação será abordada no capítulo 3.

Na obtenção, por exemplo, da curva PV e conseqüentemente do PMC, o sistema é progressivamente carregado e resolve-se o fluxo de carga convencional, até encontrar a divergência.

– Análise de sensibilidade:

Os métodos de análise de sensibilidade estão baseados no aumento progressivo de carga partindo das condições iniciais, normalmente chamadas de *caso base* até atingir o ponto de colapso de tensão. A identificação deste ponto pode ser feita analisando alguns elementos da matriz Jacobiana que fornecem a sensibilidade entre o fluxo de potência reativa e as mudanças nas tensões nos barramentos. Assim, quando a sensibilidade Q-V é positiva em todas as barras conclui-se que o sistema tem tensões estáveis. Este método apresenta dificuldades ao se aproximar da região não linear, fornecendo resultados imprecisos devido à singularidade da matriz Jacobiana.

– Método da continuação:

A idéia básica do fluxo de carga da continuação consiste na obtenção de sucessivas soluções do fluxo de carga objetivando traçar os perfis de tensão a partir do caso base até o PMC, variando automaticamente o parâmetro λ , reformulando conseqüentemente as equações do fluxo de carga convencional e evitando a singularidade da matriz jacobiana. O método de fluxo de carga da continuação será tratado com maiores detalhes no próximo capítulo.

– Métodos diretos:

Os métodos diretos são processos de otimização que possibilitam a obtenção do PMC sem determinar os pontos intermediários da trajetória entre o caso base e o PMC.

Um dos métodos mais conhecidos é o método do ponto de colapso estudado por [6] que analisa a bifurcação tipo *sela-nó* e determina o PMC quando a matriz Jacobiana apresenta um autovalor único igual a zero e os autovetores esquerdo e direito são não nulos.

Várias técnicas de otimização têm sido estudadas para obter a margem de estabilidade baseados nos multiplicadores de Lagrange e a otimalidade de Karush-Khunan-Tucker (KKT) que também analisam as características dos autovetores da matriz Jacobiana. Os métodos baseados na técnica de *pontos interiores* têm bastante aplicabilidade neste tipo de problemas [19].

Existem outros métodos que aplicam a *análise modal* para determinar áreas críticas em relação à estabilidade de tensão e apresentam vantagens de precisão e velocidade de cálculo [20]. Com os métodos de análise modal podem-se calcular a incidência de unidades geradoras, barramentos e ramos em problemas de estabilidade de tensão.

Até este ponto foram apresentados de maneira geral os métodos de análise de estabilidade em sistemas elétricos de potência. No capítulo seguinte é tratado com maiores detalhes o fluxo de carga da continuação na análise de estabilidade estática de tensão.

Capítulo 3

Fluxo de carga da continuação

3.1 Introdução

Como visto no capítulo anterior, existem vários métodos para determinar a margem de estabilidade e o ponto de máximo carregamento além de analisar algumas características do colapso de tensão em um sistema elétrico de potência. Alguns destes métodos possuem uma maior complexidade matemática e maior precisão, porém, com um maior esforço computacional.

O estudo geral deste trabalho é baseado no método da continuação e especificamente a sua parametrização e índices de estabilidade, tópicos que serão analisados mais adiante.

A seguir é apresentado um sistema teste para analisar numericamente e com mais detalhes alguns conceitos tratados no capítulo anterior e que servirão como informação introdutória desta seção. A rede exemplo utilizada possui três nós e duas linhas e é apresentada na figura 3.1.

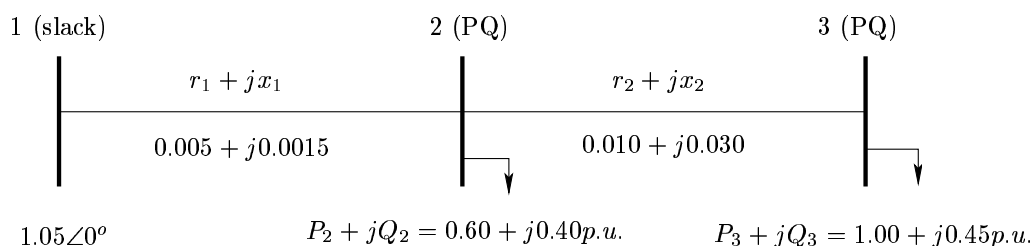


Figura 3.1: Rede de 3 barras e 2 ramos.

Utilizando o método de Newton - Raphson para resolver o problema de fluxo de carga, tentou-se traçar a curva PV partindo da condição inicial *caso base* e aumentando proporcionalmente a carga, como se mostra na figura 3.2.

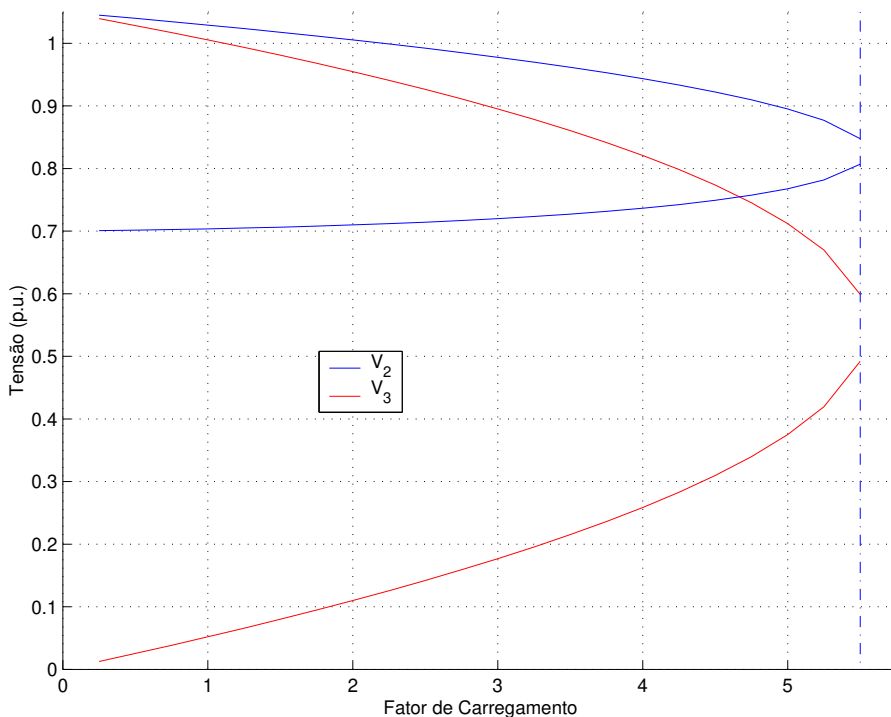


Figura 3.2: Curva PV para rede de 3 barras e 2 ramos.

A partir da figura 3.2 é possível fazer as algumas observações:

- Para um valor maior de 5.5 vezes a carga nominal do sistema, o método de fluxo de carga convencional não converge. É possível que o sistema não possa operar para esta condição de carga. Porém, também é possível que o sistema esteja em condições de operar para essa condição, mas o método de resolução de fluxo de carga não seja capaz de encontrar uma solução próxima ao ponto de bifurcação, neste caso, o ponto *selá-no* ou PMC. Neste ponto, J é singular. O fluxo de carga convencional apresenta dificuldades numéricas neste ponto, mesmo com o uso de cálculos com dupla precisão e algoritmos antidivergentes. Embora estes métodos possibilitem o cálculo de pontos operação muito próximos ao PMC, sempre será necessário ponderar se os problemas de não convergência são devidos aos problemas numéricos do algoritmo em particular ou às limitações físicas do sistema, como comentado em [4].
- A convergência do método de Newton - Raphson depende do ponto inicial. Assim,

para uma condição inicial *flat start* pode-se encontrar facilmente a parte superior da curva PV. Ao contrário, para desenhar a parte inferior da curva é preciso mudar as condições iniciais, e mesmo assim apresentam-se dificuldades numéricas para que o método consiga convergir, e também para definir uma estimativa inicial.

3.2 Método da continuação

Os métodos da continuação são ferramentas úteis para gerar curvas de solução encontrando os pontos de equilíbrio a partir da variação de um parâmetro no sistema, os quais correspondem às soluções para as equações algébricas não lineares da forma $f(z, \lambda) = 0$, para um grupo de parâmetros dado.

Estes métodos apresentam outras formas para determinar a proximidade ao ponto de bifurcação em sistema dinâmicos como ilustra [6]. De maneira geral, estes métodos estão perfeitamente descritos em [3] para sistemas gerais e foram aplicados para a análise do colapso de tensão para sistemas a.c. em [5].

Os métodos de continuação permitem a construção de curvas através do cálculo repetitivo ponto a ponto e são usados em muitos problemas de engenharia, inclusive em sistemas de potência como em [7]. A teoria dos métodos da continuação tem sido estudada extensamente e tem suas raízes na topologia algébrica e na topologia diferencial.

3.3 Fluxo de carga da continuação

Uma aplicação em engenharia dos métodos de continuação é o fluxo de carga da continuação, especificamente na área de sistemas elétricos de potência, determinando o estado do sistema de potência quando existe uma variação na geração e na carga do sistema.

O princípio geral do fluxo de carga da continuação é particularmente simples e utiliza um esquema preditor-corretor para encontrar a solução ao conjunto de equações de fluxo de carga as quais já têm inserido o parâmetro de carga λ . O processo parte de uma solução conhecida e usa o preditor para estimar a seguinte solução correspondente a um novo valor do parâmetro de carga. Esta estimativa corrige-se usando a mesma técnica do Newton-Rapson utilizada pelo fluxo de carga convencional.

O fluxo de carga da continuação foi proposto para encontrar as sucessivas soluções

de fluxo de carga para um cenário de carga dado objetivando traçar os perfis de tensão a partir de um *caso base* até o PMC. Obtém-se, com isso, não só a margem de carregamento, mas também informações adicionais a respeito do comportamento das tensões das barras do sistema em análise. Baseado em [2] o modelo utilizado pressupõe que o carregamento da rede é proporcional ao do *caso base* e considera o fator de potência constante com o modelo de carga de potência constante, visto que este fornece a condição operacional mais segura para o sistema de potência. Tradicionalmente obtém-se soluções sucessivas do sistema de equações:

$$\begin{aligned} \lambda P_k^{esp} - P_k(\theta, V) &= 0 & k = \{\text{barras } PV \text{ e } PQ\} \\ \lambda Q_k^{esp} - Q_k(\theta, V) &= 0 & k = \{\text{barras } PQ\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

pelo fluxo de carga convencional através da variação de λ , sendo este tratado como parâmetro no processo iterativo de Newton. Entretanto, nos métodos da continuação, λ pode ser considerada como variável dependente. A diferença entre os métodos da continuação está na forma de tratar esta nova variável e em como contornar a singularidade da matriz Jacobiana. Para a obtenção das curvas PV, a adição de equações parametrizadas é um procedimento padrão e fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória de soluções procuradas.

A matriz Jacobiana da equação (2.4) torna-se singular quando se atinge o limite de estabilidade de tensão. Conseqüentemente, os algoritmos de fluxo de carga convencional tendem a ter problemas de convergência em sua vizinhança, como foi apresentado na introdução. A análise de fluxo de carga da continuação utiliza a reformulação das equações de fluxo de potência para manter um bom comportamento para todas as possíveis condições de carga. Assim, garante-se a solução do problema de fluxo de carga tanto para pontos de equilíbrio estável quanto para os pontos de equilíbrio instável. Isto é, para a parte superior e inferior da curva PV.

A análise do fluxo de carga da continuação utiliza processos iterativos envolvendo passos preditor e corretor como se mostra na figura 3.3. A partir de uma solução conhecida (A) o preditor é usado para estimar a próxima solução (B) para um acréscimo de carga preestabelecido. O passo corretor então determina a solução exata (C) utilizando métodos de fluxo de carga convencionais com o sistema na nova condição de carga. Os novos valores de tensão para o próximo aumento de carga são estimados por um novo preditor. Se a nova carga estimada (D) é agora além da máxima carga na solução exata, o passo corretor com a carga estabelecida pode não convergir; conseqüentemente um passo corretor com um valor de tensão fixo na barra analisada é utilizado para encontrar a solução exata (E). Como o limite de estabilidade de tensão é atingido, para determinar a carga máxima exata o tamanho do aumento de carga deve ser reduzido gradualmente durante os próximos passos preditores.

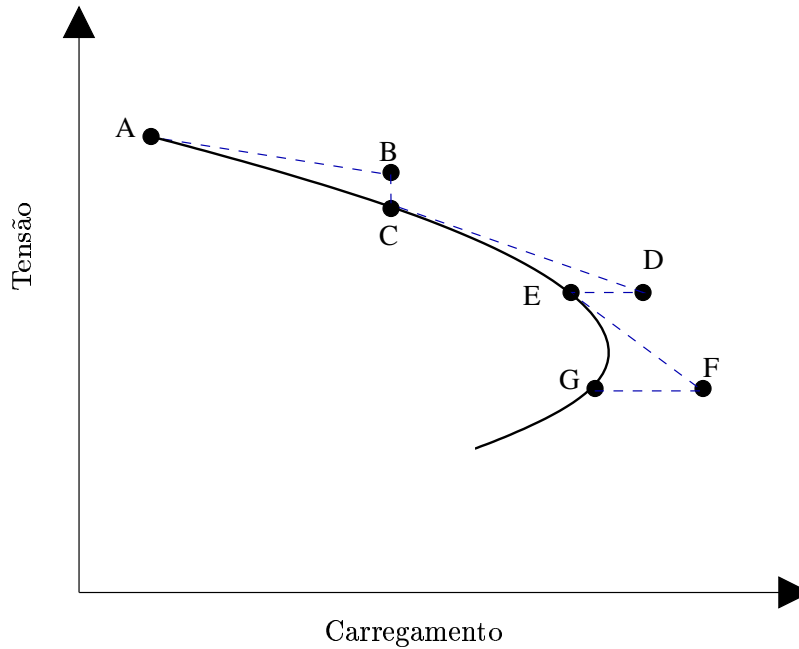


Figura 3.3: Procedimento preditor-corretor do fluxo de carga da continuação [12].

3.3.1 Reformulação das equações de fluxo de carga

As equações utilizadas para aplicar a técnica da continuação parametrizada localmente são semelhantes às do problema de fluxo de carga convencional, exceto que o parâmetro de carga λ (*fator de carregamento*) deve ser inserido no conjunto das equações conforme [5].

Com o parâmetro λ adicionado, as equações de fluxo de carga podem ser expressas como:

$$\underline{F}(\underline{\theta}, \underline{V}) = \lambda \underline{K} \quad (3.2)$$

em que λ é o parâmetro de carregamento, \underline{V} é o vetor de magnitudes de tensão, $\underline{\theta}$ é o vetor de ângulos de tensão e \underline{K} é o vetor que designa a mudança de carga em cada barra.

Com esta mudança o sistema passa a ter um conjunto de n equações com $n+1$ variáveis o que deixa o problema irrestrito porque existe uma variável a mais que o número de equações. No entanto se se especifica um valor de λ o problema pode ser resolvido. Assim, para cada valor de λ pode-se obter um ponto de solução definindo uma curva $x(\lambda)$. O parâmetro λ pode representar, inicialmente, qualquer um dos parâmetros P, Q, S permitindo a obtenção

de curvas PV, QV ou SV respectivamente.

Este parâmetro de carregamento necessário para resolver este sistema de equações não lineares pode ser especificado assim:

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{crítico} \quad (3.3)$$

onde $\lambda = 0$ corresponde ao *caso base* e $\lambda = \lambda_{crítico}$ ao carregamento máximo do sistema. Assim, a expressão (3.2) pode ser reformulada assim:

$$\underline{F}(\underline{\theta}, \underline{V}, \lambda) = 0 \quad (3.4)$$

A dimensão de \underline{F} é $[2NPQ + NPV]$, em que NPQ é o número de barras PQ e NPV é o número de barras PV . Para uma barra k :

$$\begin{aligned} 0 &= P_{Ger_k} - P_{Car_k} - P_k \\ 0 &= Q_{Ger_k} - Q_{Car_k} - Q_k \end{aligned} \quad (3.5)$$

sendo:

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Para simular a variação na carga, P_{Car_k} e Q_{Car_k} devem ser modificados como segue:

$$P_{Car_k} = P_{Car_{k0}} + \lambda(K_{Car_k})$$

$$Q_{Car_k} = Q_{Car_{k0}} + \lambda(K_{C_k})$$

A potência de geração ativa pode ser modificada para:

$$P_{Ger_k} = P_{Ger_{k0}}(1 + \lambda K_{Ger_k})$$

A implementação mais amplamente utilizada do fluxo de carga da continuação considera quatro elementos básicos: um passo preditor, um passo corretor, um controle de passo e uma parametrização.

3.3.2 Passo Preditor

O propósito do preditor é estimar um ponto aproximado para a próxima solução (ponto B na figura 3.3). Uma vez que a solução de (3.2) para o *caso base* tenha sido encontrada ($\lambda=0$), isto é, $(\theta^0, V^0, \lambda^0)$, o preditor tenta encontrar um ponto de aproximação para a solução seguinte $(\theta^n, V^n, \lambda^n)$. A qualidade da aproximação afeta o número de iterações requeridas para que o corretor obtenha a solução. Uma melhor aproximação produz um baixo número de iterações para atingir a solução.

Diferentes preditores têm sido propostos na literatura da análise numérica. Eles podem-se dividir em dois tipos:

- Métodos baseados em ODE (*Ordinary Differential Equations*): onde a solução atual e a sua derivada predizem a próxima solução. O método da tangente é um popular preditor baseado no método ODE de primeira ordem.
- Métodos baseados na extrapolação polinomial: onde somente se usam as soluções anterior e atual para encontrar uma solução aproximada. O método da secante é o mais popular destes métodos.

Alguns preferem utilizar as técnicas do vetor tangente [5], outros o método da secante e outros, como [7], utilizam a combinação dos dois métodos.

Na figura 3.4 são apresentadas as técnicas do preditor tangente e secante. A técnica do vetor tangente é usualmente mais precisa do que a secante. Em [5] a predição da solução seguinte é feita tomando apropriadamente o tamanho do passo na direção tangente do caminho da solução. O cálculo deste vetor tangente é realizado derivando os dois lados das equações de fluxo de carga:

$$d[\underline{F}(\underline{\theta}, \underline{V}, \lambda)] = \underline{F}_{\underline{\theta}} d\underline{\theta} + \underline{F}_{\underline{V}} d\underline{V} + \underline{F}_{\lambda} d\lambda = \underline{0} \quad (3.7)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \underline{F}_{\underline{\theta}} & \underline{F}_{\underline{V}} & \underline{F}_{\lambda} \end{bmatrix}}_{\text{Derivadas Parciais}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} d\underline{\theta} \\ d\underline{V} \\ d\lambda \end{bmatrix}}_{\text{Vetor Diferencial}} = \begin{bmatrix} \underline{J} & \underline{F}_{\lambda} \end{bmatrix} \cdot t = \underline{0} \quad (3.8)$$

onde:

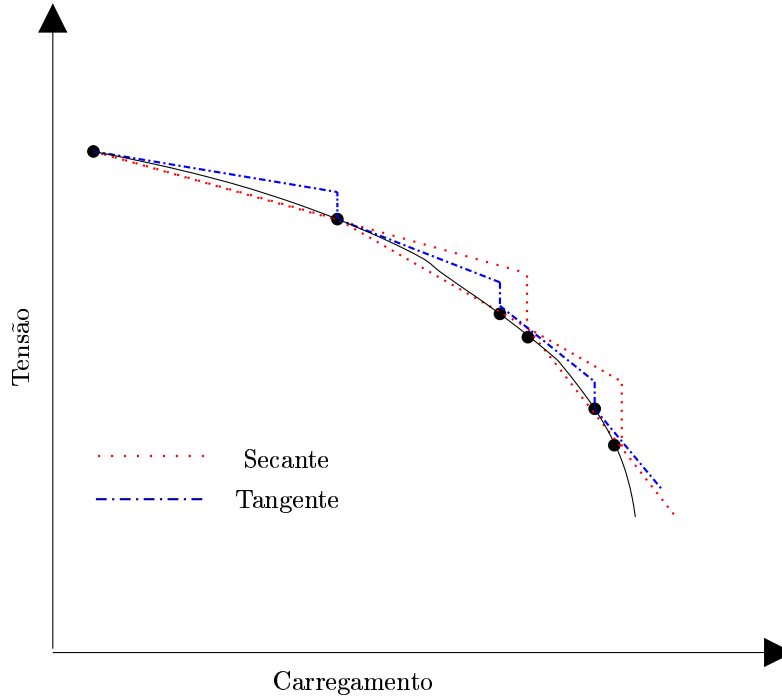


Figura 3.4: Preditor tangente e preditor secante.

$$\underline{F}_\theta = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{array} \right]^T \quad \underline{F}_V = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{array} \right]^T \quad e \quad \underline{F}_\lambda = \left[\begin{array}{cc} P^{esp} & Q^{esp} \end{array} \right]^T \quad (3.9)$$

Uma vez que λ foi inserido nas equações de fluxo de carga, o número de incógnitas é maior do que o número de equações. Assim, é necessária mais uma equação para solucionar o sistema. O problema pode ser resolvido escolhendo-se uma variável com valor diferente de zero para uma das componentes do vetor tangente. Esta variável é denominada *parâmetro de continuação*. Em outras palavras se t é usado para denotar o vetor tangente,

$$t = \left[\begin{array}{c} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{array} \right] \quad (3.10)$$

o conjunto de equações 3.8 passa a ter a seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{ccc} \underline{F}_\theta & \underline{F}_V & \underline{F}_\lambda \\ & e_k & \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} \underline{J}_a & \underline{F}_\lambda \end{array} \right] \cdot t = \left[\begin{array}{c} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right] \quad (3.11)$$

onde \underline{e}_k é um vetor linha apropriadamente dimensionado com todos os elementos iguais a zero exceto o k -ésimo o qual é igual a 1. A escolha do índice k é feita de forma que o vetor \underline{t} tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada (\underline{J}_a) seja não singular no PMC.

A princípio λ pode ser usado como parâmetro e a componente correspondente do vetor tangente é fixada em +1, porém somente até próximo de PMC onde \underline{J} torna-se singular. Para eliminar a singularidade da matriz Jacobiana deve-se acrescentar, por meio de uma equação, a informação perdida com a redução do posto de \underline{J} no PMC. Durante os passos preditores seguintes o parâmetro escolhido passa a ser a variável de estado que a maior variação na solução encontrada e o sinal da sua inclinação determina o sinal da componente correspondente do vetor tangente. Isto é, resolve-se esse problema através de uma técnica conhecida como parametrização local [5] que consiste na troca do parâmetro próximo ao PMC, sendo que λ passa a ser a partir daí tratado como uma variável dependente, enquanto que a variável escolhida passa a ser um novo parâmetro. Este tipo de parametrização é comentado na seção 3.3.4.

Uma vez que o vetor tangente é encontrado resolvendo (3.10), o processo de predição pode ser feito como segue:

$$\begin{bmatrix} \frac{\theta^e}{V^e} \\ \frac{\lambda^e}{\lambda^e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\theta^j}{V^j} \\ \frac{\lambda^j}{\lambda^j} \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\theta}{dV} \\ \frac{d\lambda}{d\lambda} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Em que o sobrescrito “e” indica estimativa, isto é o vetor \underline{t} é usado para obter uma estimativa para $\underline{\theta}$, \underline{V} e λ a partir da solução atual j . σ é um escalar que determina o tamanho do passo preditor cujo valor deve ser predefinido de modo que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor, ou seja, se para o tamanho do passo dado a solução não pode ser encontrada o tamanho do passo deve ser reduzido e o passo corretor é repetido até que a solução possa satisfazer o conjunto de equações de fluxo de carga.

No fluxo de carga da continuação os elementos do vetor tangente representam as variações do estado perante a variação de carga no sistema, isto é, os elementos do vetor tangente são úteis na identificação das barras com a maior variação de tensão em resposta de uma variação de carga.

3.3.3 Passo Corretor

Depois que o preditor produziu uma aproximação (x^e, λ^e) para a solução seguinte (x^{j+1}, λ^{j+1}) , deve-se corrigir o erro antes de se aumentar a carga [7], conforme a figura 3.5.

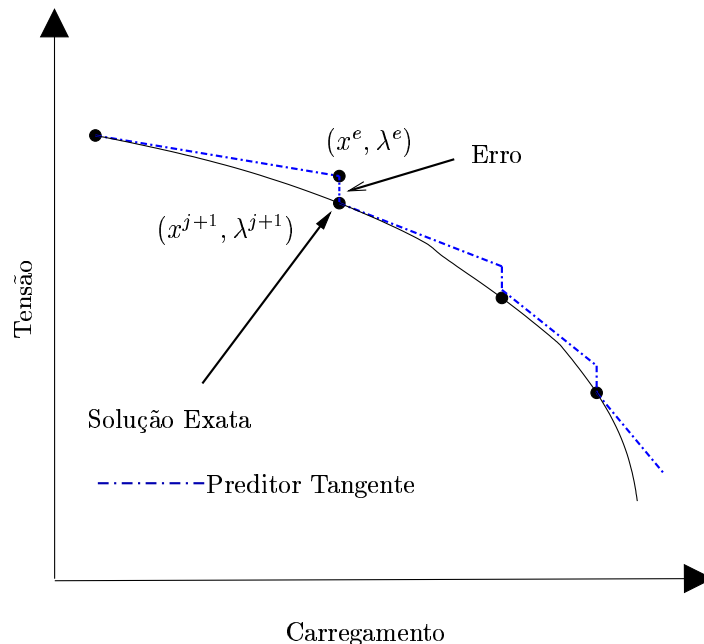


Figura 3.5: Curva PV traçada só com o passo preditor

No passo corretor, o conjunto de equações (2.2) é aumentado com mais uma equação que especifica a variável de estado selecionada como parâmetro de continuação $x(k)$ e η é um valor apropriado para o k -ésimo elemento de x (equação 3.13).

$$\begin{bmatrix} F(\underline{x}) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

onde,

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \underline{V} \\ \underline{\lambda} \end{bmatrix}, \quad \underline{x} \in \mathbf{R}^{2\text{NPQ}+\text{NPV}+1} \quad (3.14)$$

Em princípio, qualquer processo numérico efetivo para resolver equações algébricas pode ser usado como corretor. Este conjunto de equações pode ser resolvido comumente com o

método de resolução de fluxo de carga de *Newton-Raphson* levemente modificado. A introdução da equação que especifica x_k , que pode ser uma magnitude de tensão, um ângulo de tensão ou um parâmetro de carga λ em uma barra ou em um ramo, faz com que a matriz Jacobiana seja não singular no ponto de operação crítica.

O fluxo de carga da continuação pode ser utilizado após o PMC para obter sem dificuldades numéricas as soluções correspondentes à parte inferior da curva PV.

A componente λ do vetor tangente ($d\lambda$) é positiva na parte superior da curva, é zero no ponto crítico, e é negativa após o PMC. Assim, o sinal de $d\lambda$ indicará se o ponto crítico foi atingido ou não.

Se o parâmetro de continuação é o incremento da carga o corretor será a linha vertical. Se de outra maneira, a magnitude de tensão é o parâmetro de continuação o corretor será a linha horizontal como é apresentado na figura 3.3.

3.3.4 Parametrização

Cada técnica de continuação apresenta um esquema particular de parametrização com o objetivo de fornecer um método de identificação de cada solução ao longo do caminho a seguir. Vários esquemas utilizados referem-se à parametrização local [5], onde o conjunto original de equações aumenta de mais uma, a qual especifica o valor de uma das variáveis de estado.

Assim, segundo [7] a parametrização é uma forma matemática para identificar cada solução na curva de modo que as soluções anterior e seguinte possam ser quantificadas. Há três tipos de parametrizações:

- Parametrização Física: utilizando o parâmetro de controle λ , em cada caso o tamanho do passo é $\Delta\lambda$.
- Parametrização Local: a qual utiliza também o parâmetro controlador λ ou qualquer componente do vetor de estado x , chamado x_k para parametrizar a curva solução. O tamanho do passo é $\Delta\lambda$ ou Δx_k .
- Parametrização por comprimento de arco: é utilizado ao longo da curva solução para executar a parametrização. O tamanho do passo para este caso é Δs . Em trabalhos como o feito em [7] utiliza-se a parametrização por comprimento de arco.

A parametrização é necessária para se eliminar a singularidade da matriz Jacobiana no PMC. Parâmetros como a potência reativa gerada pelos bancos *shunt* e as potências ou as perdas ativa ou reativa das linhas de transmissão são utilizados em [9].

Outras parametrizações podem ser utilizadas para eliminar esta singularidade no PMC como em [8]:

$$W(\underline{\theta}, \underline{V}, \lambda, \mu) = \mu W^0 - F(\underline{\theta}, \underline{V}, \lambda) = 0 \quad (3.15)$$

onde

F : Perda total de P ou Q na barra *slack* ou de Q nas barras PV, ou perda de potência ativa ou reativa num determinado ramo l

W^0 : Valor da função no *caso base*

μ : Novo parâmetro.

Agora λ pode ser tratada como uma variável dependente e μ é considerado como um parâmetro. Para $\mu = 1$ a solução convergida deverá resultar em $\lambda = 1$. Na equação 3.15 pode-se especificar o valor desejado para a função, e a sua solução fornecerá o ponto de operação, incluindo o fator de carregamento para o qual os valores especificados ocorrem. Desenvolvendo a expressão 3.15 em série de Taylor, incluindo somente os termos da primeira derivada, resulta em:

$$\begin{bmatrix} \underline{J} & \underline{F}_\lambda \\ \underline{F}_x & \underline{F}_\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta x} \\ \underline{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = \underline{J}_m \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta x} \\ \underline{\Delta \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{\Delta k_W} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

x : θ, V

F_x : Derivadas de F com relação a x

$\Delta k_W = W^0 \Delta \mu$: Escalar que define a variação em W^0

Após a solução da equação (3.16) para o vetor \underline{t} , a estimativa para a próxima solução é dada por;

$$\begin{bmatrix} \underline{x}^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} \underline{\Delta x} \\ \underline{\Delta \lambda} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$k_W^e = k_W + \sigma \cdot \Delta k_W$$

Uma vantagem da parametrização através das funções W é que estas representam variáveis com significado claro para engenheiros de potência. Se não é possível obter o PMC de um sistema aumentando-se diretamente o parâmetro λ devido aos problemas de singularidade da matriz Jacobiana, então pode-se transformar este parâmetro em uma variável dependente, e simular aumentos de carga através da especificação das perdas totais de potência ativa, ou de qualquer outra variável dependente funcional no fluxo de carga convencional. Em resumo, em vez de especificar o carregamento e obter o estado convergido, especifica-se, por exemplo, as perdas de potência ativa em um determinado ramo, e obtém-se o estado convergido, incluindo o nível de carregamento para o qual aquelas perdas de potência especificadas ocorrem.

Assim, F corresponderá ao fluxo de potência ou perdas de potência, ativas ou reativas, dos ramos (linhas de transmissão ou transformadores), conforme proposto em [9].

3.3.5 Controle de tamanho do passo

Um elemento que afeta a eficiência computacional associada com o método da continuação é o controle de passo. É seguro escolher um valor constante e pequeno em qualquer método da continuação. Porém, este valor constante pode com frequência conduzir à ineficiência computacional, com muitos passos através da parte *quase linear* da curva, o que corresponde a situações de carga leve. Da mesma forma, um passo grande pode afastar o ponto calculado pelo preditor do ponto da solução real e como resultado o corretor precisa de mais iterações para convergir. Em casos extremos o corretor pode divergir.

Para uma condição de carga leve, uma variação de carga resultará em uma pequena mudança no ponto de operação. Portanto, o tamanho do passo (σ) poderá ser maior. Por outro lado, uma pequena mudança na carga resultaria em grandes variações do ponto de operação no caso do sistema estar estressado (altamente carregado). Um método simples de controle de passo é baseado no número de iterações do passo corretor. Se este é pequeno, o sistema ainda está sob condições de carga leve e o tamanho do passo para a próxima iteração pode ser maior, se for grande, o sistema está estressado e o tamanho do passo para a próxima iteração deve ser menor. Isto quer dizer que o tamanho do passo pode-se adaptar à forma da curva solução, um passo grande pode ser usado na parte quase linear (*flat*) da curva e um passo pequeno na parte não linear (*curly*) da curva solução (correspondente a alto carregamento). É claro que a forma da curva solução é desconhecida, tornando difícil a tarefa do cálculo do tamanho do passo. Assim, os bons controles de passo são definidos para aplicações específicas. Apesar disto, algumas considerações devem ser levadas em conta a fim de melhorar seu desempenho. De acordo com [7] uma outra estratégia para o controle de passo é fixar um limite máximo h_{max_i} para cada variável x_i . No tamanho do passo atual h o comprimento de arco s é escolhido tal que:

$$h \frac{dx_i}{ds} \leq h_{max_i} \quad i = 1, \dots, n + 1 \quad (3.18)$$

A motivação para tal implementação é que a curva $x(\lambda)$ pode ser linear com respeito a alguma outra x_j ; assim, o processo da continuação pode ter o passo maior para a parte linear e também manter pequenos passos na parte não linear da curva. O sucesso deste controle de tamanho do passo depende do valor próprio de h_{max_i} , onde se requer o conhecimento prévio do problema em consideração. No caso de estudos de sistemas elétricos de potência a experiência tem sido um bom guia. Por exemplo o h_{max_i} correspondente à barra de menor tensão pode ser um valor pequeno para um conjunto ao redor de $[0; 1,2]$, enquanto o h_{max_i} correspondente ao parâmetro λ que pode ser determinado como o valor mais alto.

Um outro método de controle de tamanho do passo é baseado no vetor \underline{t} normalizado [10]. O tamanho do passo é dado por:

$$\sigma = \frac{\sigma^0}{\|\underline{t}\|_2} \quad (3.19)$$

em que $\|\underline{t}\|_2$ é a norma euclidiana do vetor $[\Delta x \quad \Delta \lambda]$ e σ^0 é um escalar predefinido.

Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude da norma do vetor \underline{t} aumenta e σ diminui. A eficiência do processo depende de uma boa escolha de σ^0 . Seu valor depende do sistema elétrico considerado. A obtenção de um valor ótimo para σ^0 está além do escopo deste trabalho de pesquisa.

3.4 Parametrização por perdas de potência ativa em ramos

Na seção 3.3 foi apresentado de um modo geral o fluxo de carga da continuação, indicando suas modificações em relação à formulação do fluxo de Newton-Raphson.

A seguir é apresentada com maiores detalhes a formulação matemática do fluxo de carga da continuação utilizando como parâmetro as perdas ativas em um determinado ramo do sistema, por ser uma grandeza que apresenta uma tendência crescente tanto na parte superior da curva onde o carregamento aumenta, quanto na parte inferior dela onde, embora a tensão decresça, as correntes e as perdas são elevadas.

Pelo fluxo de carga convencional a atualização do vetor de estado é dada por:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta\theta} \\ \underline{\Delta V} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

e

$$\begin{bmatrix} \underline{\theta}^{novo} \\ \underline{V}^{novo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\theta}^{velho} \\ \underline{V}^{velho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\Delta\theta} \\ \underline{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

onde:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(P, \theta) & N(P, V) \\ M(Q, \theta) & L(Q, V) \end{bmatrix}$$

Durante o processo iterativo a solução será encontrada se $\underline{\Delta P}$ e $\underline{\Delta Q} \leq tol$, em que tol é uma tolerância previamente especificada.

Inserindo o parâmetro da continuação, neste caso as perdas de potência ativa ($W \rightarrow P_l$) em um ramo preestabelecido (l) e onde $\Delta\mu$ representa um aumento nas perdas nesse ramo, o conjunto de equações 3.16 fica:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta\theta} \\ \underline{\Delta V} \\ \underline{\Delta\lambda} \end{bmatrix} = J_m^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \\ P_l^0 \underline{\Delta\mu} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

onde

$$J_m = \begin{bmatrix} H(P, \theta) & N(P, V) & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ M(Q, \theta) & L(Q, V) & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial P_l}{\partial \theta} & \frac{\partial P_l}{\partial V} & \frac{\partial P_l}{\partial \lambda} \end{bmatrix}$$

As equações gerais de fluxo de potência ativa do ramo l que conecta as barras k e m estão dadas por:

$$\begin{aligned} P_{km} &= (a_{km}V_k)^2g_{km} - a_{km}V_kV_m[g_{km}\cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km}\text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ P_{mk} &= V_m^2g_{km} - a_{km}V_kV_m[g_{km}\cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km}\text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \end{aligned} \quad (3.23)$$

As perdas de potência ativa no ramo l são:

$$P_l = P_{km} + P_{mk} = g_{km}[(a_{km}V_k)^2 + V_m^2 - 2a_{km}V_kV_m\cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (3.24)$$

Assim, as novas componentes da matriz Jacobiana modificada ficam:

$$\frac{\partial P}{\partial \lambda} = \frac{\partial(\lambda P_{esp})}{\partial \lambda} = P_{esp}; \quad \frac{\partial Q}{\partial \lambda} = \frac{\partial(\lambda Q_{esp})}{\partial \lambda} = Q_{esp}; \quad \frac{\partial P_l}{\partial \lambda} = 0;$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial \theta_k} = g_{km}[2a_{km}V_kV_m\text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})]; \quad \frac{\partial P_l}{\partial \theta_m} = g_{km}[-2a_{km}V_kV_m\text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})];$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial V_k} = g_{km}[2a_{km}V_k - 2V_m\cos(\theta_{km} + \varphi_{km})]; \quad \frac{\partial P_l}{\partial V_m} = g_{km}[2V_m - 2V_k\cos(\theta_{km} + \varphi_{km})]$$

A componentes $H(P, \theta)$, $N(P, V)$, $M(Q, \theta)$ e $L(Q, V)$ aparecem descritas em [29].

3.5 Testes e resultados

O programa utilizado para a realização de testes e a obtenção de resultados foi desenvolvido utilizando o MATLAB versão 6.1 baseado na metodologia utilizada em [25].

3.5.1 Controle de passo

Utilizando o sistema teste do Apêndice A.1 foram traçadas as curvas dos ângulos das tensões em cada barra em função de fator de carregamento. Na figura 3.6 é utilizado um tamanho de passo igual a 0,1. É claro que o tempo computacional usado é menor, porém, se é utilizado um passo menor (p.e 0,01) como mostra a figura 3.7 pode-se obter uma solução mais precisa, mas com um custo computacional maior. Na figura 3.8 é utilizado um passo de 0,001. A diferença não é muito grande se é comparada com a figura 3.7 e a diferença em tempo computacional é considerável para este caso.

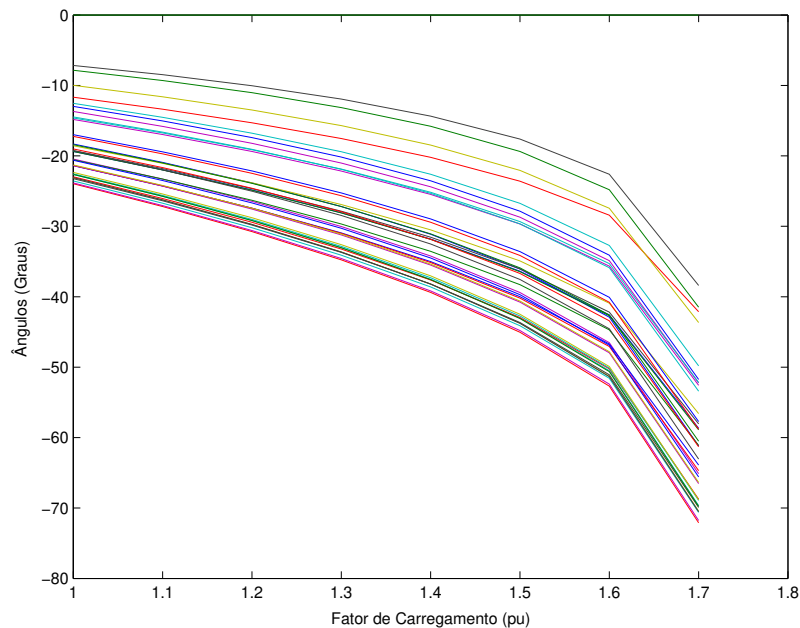


Figura 3.6: Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,1

Para $\lambda \geq 1,7$ o fluxo não converge, o que significa que se está próximo ao PMC onde a matriz Jacobiana do sistema de equações torna-se singular.

3.5 Testes e resultados

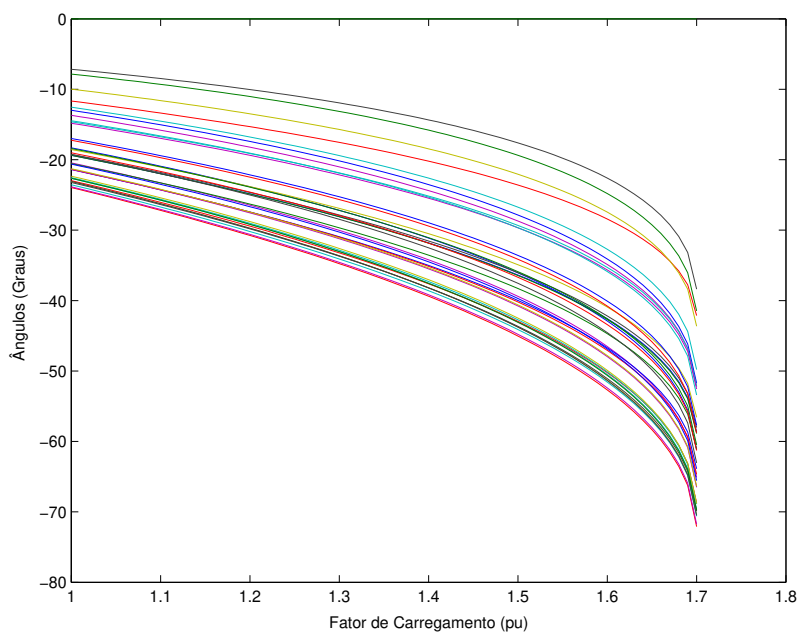


Figura 3.7: Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,01

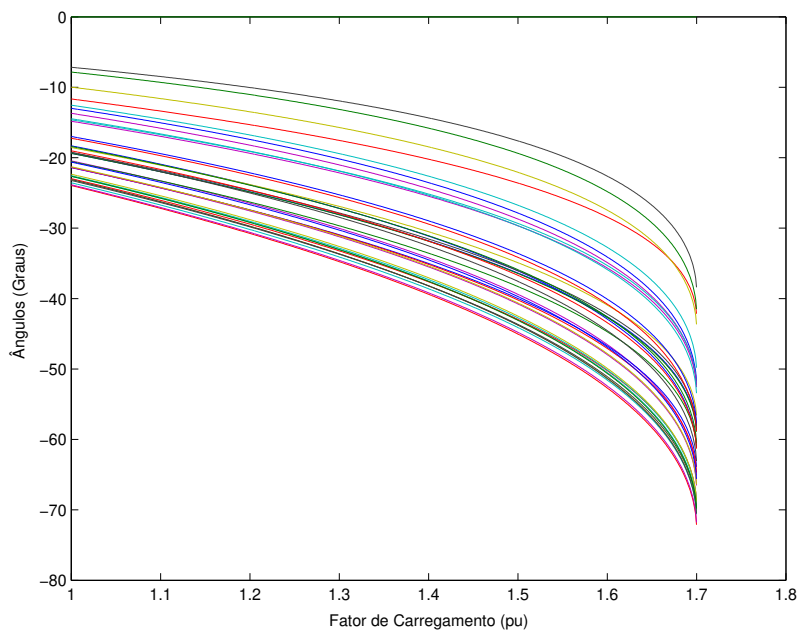


Figura 3.8: Curva $P\theta$ com tamanho de passo igual a 0,001

3.5.2 Parametrização

3.5.2.1 Carregamento como parâmetro da continuação

Para obter-se a curva PV utilizando o método de fluxo da continuação é necessário determinar um parâmetro como foi apresentado ao longo deste capítulo. A figura 3.9 mostra as tensões de todas as barras traçadas a partir do *caso base* (fator de carregamento igual a 1) até chegar próximo do PMC. O tamanho de passo usado foi de 0,01 (aumento da carga e geração do sistema em 1%). Esta figura mostra só a parte superior das curvas PV dadas as estimativas iniciais do sistema teste.

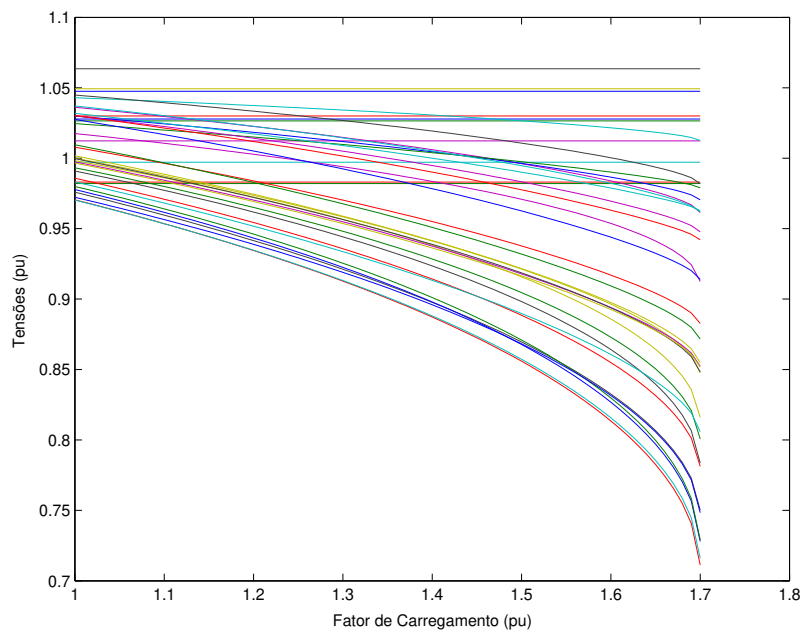


Figura 3.9: Curva PV utilizando λ como parâmetro da continuação

3.5.2.2 Consideração dos limites de potência reativa

Além das condições já apresentadas do sistema, foram considerados os limites de geração de potência reativa nos geradores fazendo com que a curva atinja o PMC em um valor menor de carregamento como se observa na figura 3.10. O que indica uma menor margem de estabilidade.

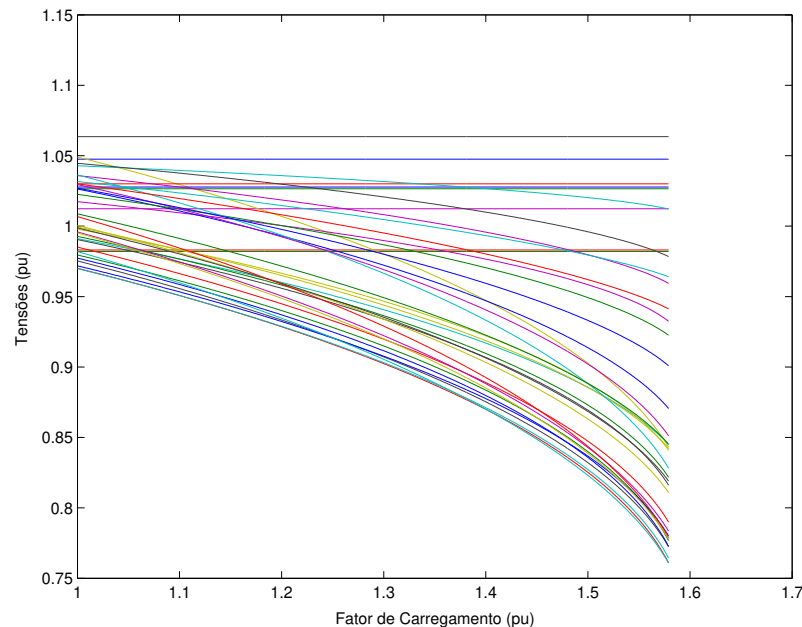


Figura 3.10: Curva PV utilizando λ como parâmetro da continuação e considerando limites de potência reativa

3.5.2.3 Magnitude de tensão como parâmetro da continuação

A mudança de parâmetro de continuação apresenta-se como uma alternativa para obter o PMC e a parte inferior das curvas PV ante a dificuldade para traçá-las pelos métodos já apresentados na figuras anteriores. Para este caso, o parâmetro escolhido foi a magnitude de tensão o qual tem um melhor desempenho na região próxima do PMC. Porém, é preciso escolher convenientemente a barra cuja tensão será escolhida como parâmetro da continuação, pois os resultados obtidos tem esforços computacionais com diferenças consideráveis. As figuras 3.11 a 3.15 evidenciam comportamentos diferentes em função da escolha do parâmetro de continuação. Assim, se é escolhida a tensão da barra 1 como parâmetro observa-se que as curvas PV são traçadas desde a parte superior chegando só até o PMC com um tamanho de passo de 0,01. A dificuldade para obter a curva utilizando a tensão da barra 1 como parâmetro baseia-se no comportamneto quase linear da tensão desta barra como se mostra na figura 3.13 onde para pequenas variações de tensão existem grandes variações no carregamento do sistema. Assim, é necessário reduzir o tamanho do passo conforme ao exposto na seção 3.3.5. Se o passo é de 0,001 atinge-se um valor de carregamento de 1,6537 p.u. da parte inferior da curva PV (figura 3.12) melhorando os resultados apresentados quando é utilizado λ como parâmetro da continuação.

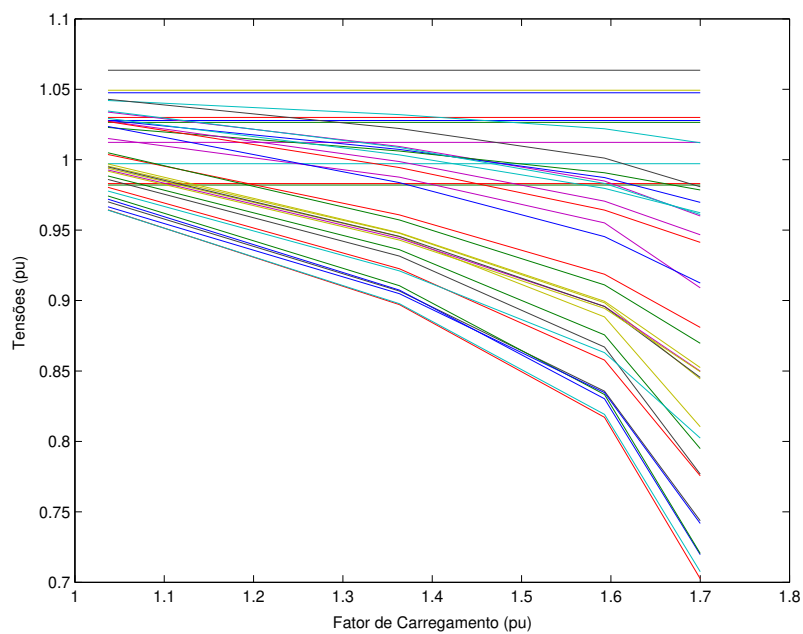


Figura 3.11: Curva PV utilizando V_1 como parâmetro da continuação com passo igual a 0,01

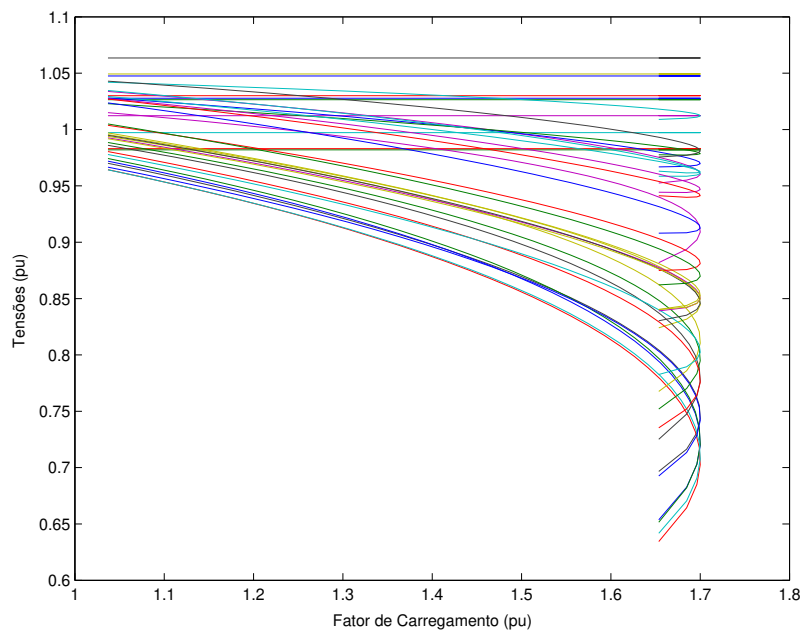


Figura 3.12: Curva PV utilizando V_1 como parâmetro da continuação com passo igual a 0,001

3.5 Testes e resultados

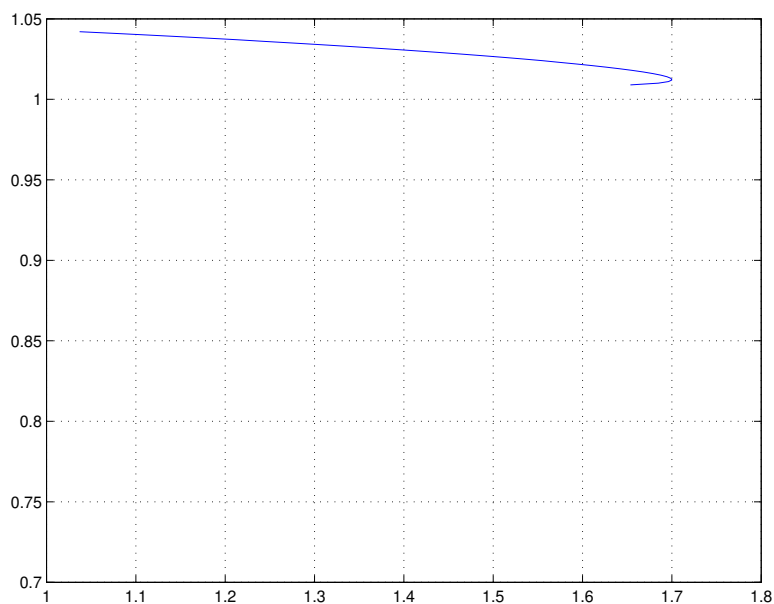


Figura 3.13: Magnitude de tensão na barra 1. Comportamento quase plano

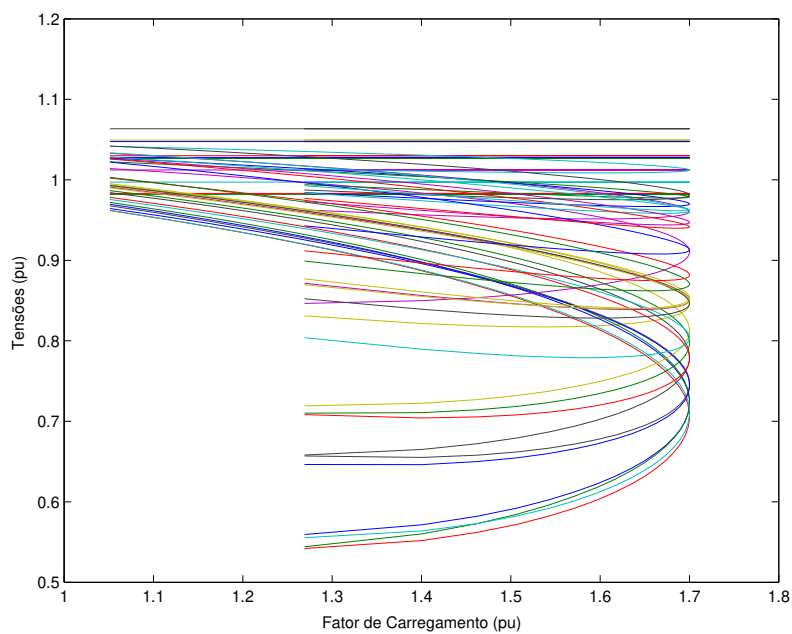


Figura 3.14: Curva PV utilizando V_7 como parâmetro da continuação

A figura 3.14 mostra a curva PV quando o parâmetro é a tensão da barra 7 a qual é a de menor tensão do sistema, apresentando um melhor resultado comparado com as demais barras do sistema. Por último, na figura 3.15 apresenta-se a curva PV tomando como parâmetro a tensão da barra 25 a qual tem um valor elevado de tensão e obtendo-se uma curva com menores informações comparada com a figura 3.14. Em geral sugere-se escolher a barra de menor tensão como *barra piloto* na parametrização do método da continuação, mas, nem sempre este critério serve para a escolha do parâmetro.

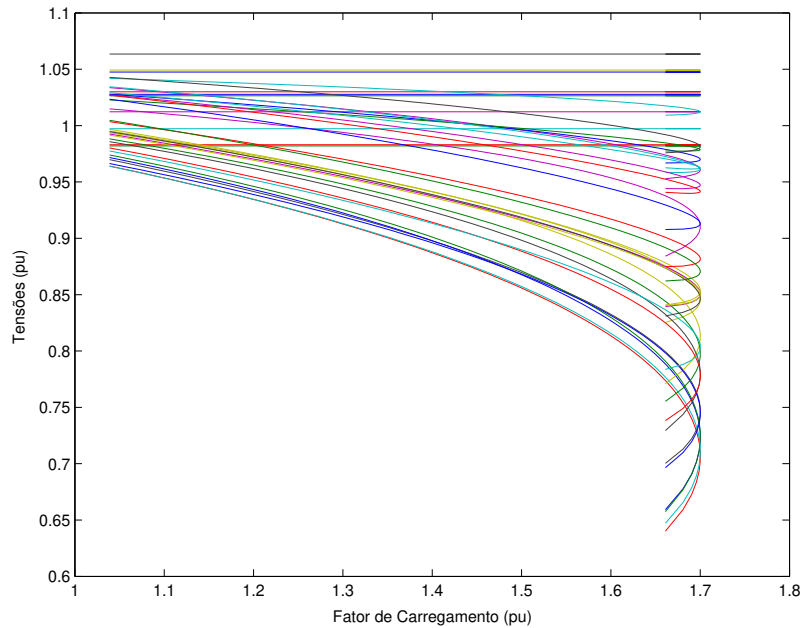


Figura 3.15: Curva PV utilizando V_{25} como parâmetro da continuação

3.5.2.4 Perdas de potência ativa nos ramos como parâmetro da continuação

Baseado na dedução feita na seção 3.4 foi implementado o fluxo de carga da continuação parametrizado por perdas em um ramo. Porém, existe o problema de qual ramo escolher, pois nem todos os ramos servem para traçar a totalidade da curva. Aliás, às vezes é preciso utilizar diferentes ramos como parâmetro para conseguir traçar toda a curva. Este fato verifica-se na figura 3.16 onde é apresentada a curva PV traçada pelo método de fluxo de carga da continuação utilizando como parâmetro as perdas de potência ativa nos ramos 2, 7, 12 e 17 do sistema IEEE de 14 barras (cujo diagrama unifilar é mostrado no Apêndice A.2 e os dados podem ser obtidos em [28]). Pode-se observar que embora se consiga ultrapassar o PMC para todos estes ramos, é possível traçar a curva PV completa só com as perdas de potência ativa do ramo 17 (os ramos 13, 19 e 20 também permitem traçar a totalidade da

curva, mas não são apresentados na figura 3.16).

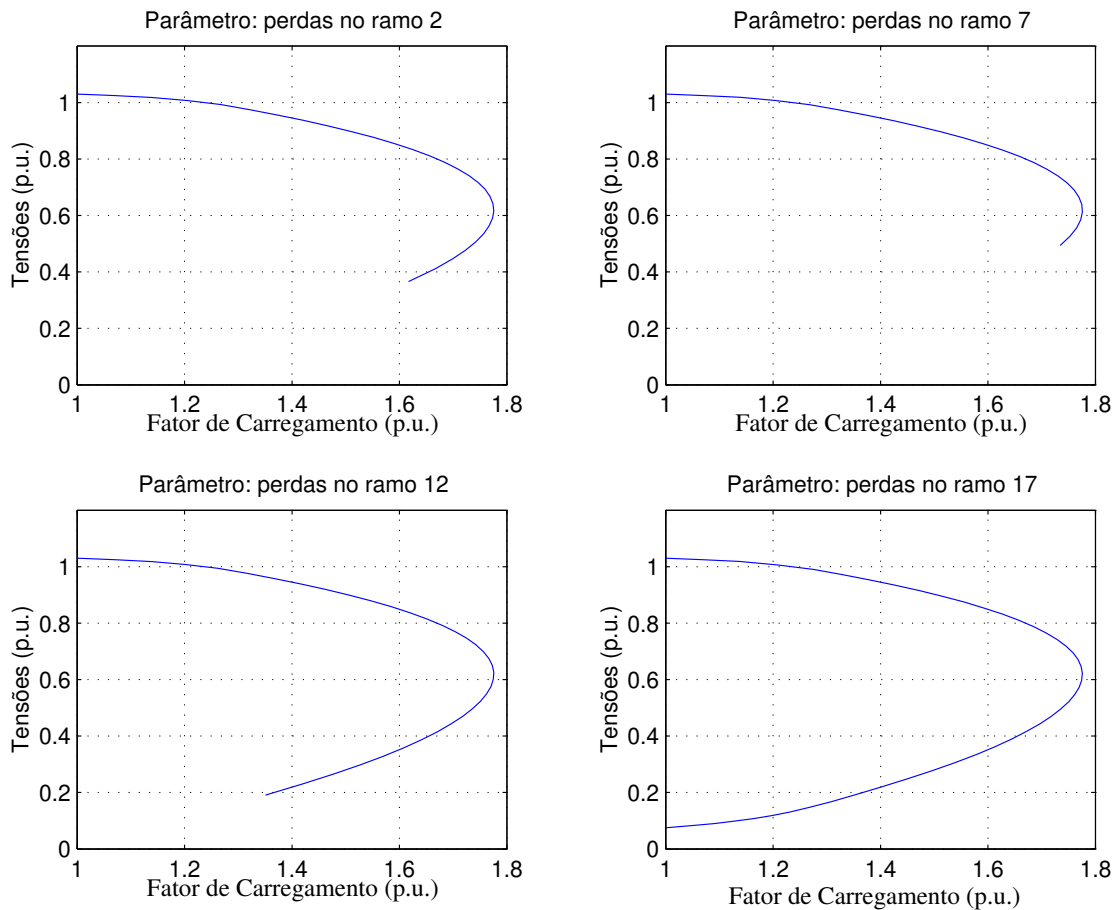


Figura 3.16: Curva PV para o sistema de 14 barras utilizando diferentes ramos como parâmetro da continuação.

Para a obtenção destes resultados foi preciso realizar o processo de determinação do parâmetro para cada um dos 20 ramos do sistema IEEE de 14 barras, traçando a curva para a tensão da barra 14. Na tabela 3.1 são mostrados os últimos valores de λ atingidos para os 20 ramos do sistema. Note-se que para os ramos 8, 9, 10, 14 e 15 não é possível traçar nem o primeiro ponto da curva (além do *caso base*) devido a que estes ramos teoricamente não têm perda de potência ativa a qual é utilizada neste caso como parâmetro da continuação, e não é possível calcular uma variação no parâmetro, o que é essencial no método da continuação.

Tabela 3.1: Últimos valores de λ atingidos usando as perdas ativas nos ramos como parâmetro da continuação (sistema IEEE 14).

Ramo utilizado como parâmetro	Último valor de λ atingido	Perdas Ativas(p.u.)	Abertura Angular
1	1.6900	0.2984	0.1553
2	1.6170	0.2143	0.3135
3	1.7342	0.1551	0.4158
4	1.6259	0.1315	0.2528
5	1.5548	0.0787	0.1570
6	1.7443	0.0238	-0.1560
7	1.7345	0.0324	-0.0849
8	1.0000*	0.0000	0.0543
9	1.0000*	0.0000	0.0826
10	1.0000*	0.0000	0.0951
11	1.5339	0.0054	0.0651
12	1.3506	0.0157	0.1672
13	0.9524	0.0610	0.0842
14	1.0000*	0.0000	0.0000
15	1.0000*	0.0000	0.0282
16	1.4759	0.0031	0.0408
17	0.9640	0.2386	0.7022
18	1.6263	0.0008	-0.0271
19	0.9740	0.0077	-0.0099
20	0.9938	0.1030	0.6337

* Estes valores correspondem à parte superior da curva *PV* (*caso base*) os demais à parte inferior.

Segundo o apresentado na figura 3.16 e na tabela 3.1 é necessário estabelecer um critério de escolha do parâmetro (ramo) da continuação. Desta maneira no capítulo 4 são apresentados alguns índices de proximidade ao colapso de tensão que poderão ser úteis na escolha do parâmetro.

Capítulo 4

Índices de proximidade ao colapso de tensão

4.1 Introdução

Vários métodos para determinar problemas de estabilidade de tensão têm sido propostos, como foi apresentado anteriormente em [12], [13] e [14]. Uma das motivações para desenvolver este projeto de pesquisa é determinar um critério de seleção automática do parâmetro da continuação baseado nos índices de proximidade ao colapso de tensão, os quais, aparecem como uma ferramenta interessante na análise de estabilidade de tensão devido à sua facilidade de cálculo e baixo custo computacional. Estes índices podem ser classificados segundo o método de identificação, isto é, para barras críticas ou para ramos críticos de um sistema. Este trabalho utilizará os índices para identificação de ramos críticos por oferecer uma melhor localização e indicação da causa do colapso de tensão seja por carregamentos de potência ativa ou reativa.

4.2 Índices nas linhas

A seguir será apresentada a dedução de um índice de proximidade ao colapso de tensão que foi proposto [11] e que pode servir de critério para a escolha automática do parâmetro de continuação. Considerar a rede exemplo mostrada na figura 4.1.

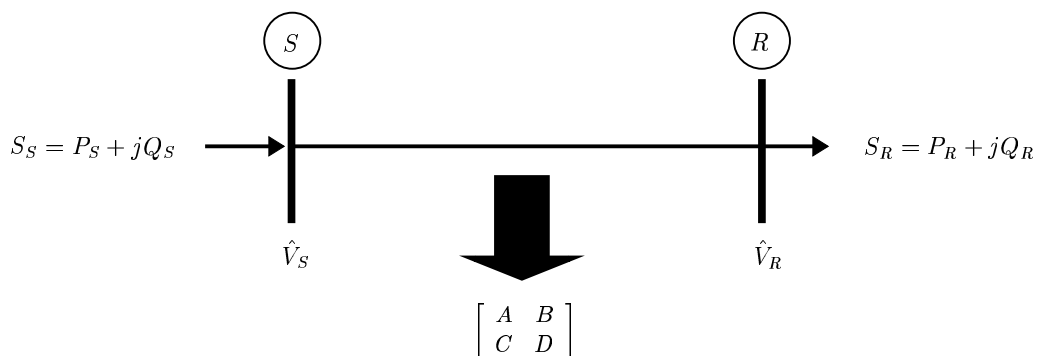


Figura 4.1: Rede exemplo de 2 barras

As barras S (*sending*) e R (*receiving*), cujas tensões são representadas pelos fasores \hat{V}_S e \hat{V}_R respectivamente, são conectadas através de uma linha de transmissão. A linha é representada como um quadripolo em que as constantes A , B , C e D são normalmente chamadas de *constantes generalizadas da linha de transmissão*. S_S e S_R são as injeções líquidas de potência nas barras S e R respectivamente as quais podem se apresentadas como:

$$S_R = P_R + jQ_R = \hat{V}_R \hat{I}_R^* \quad (4.1)$$

$$S_S = P_S + jQ_S = \hat{V}_S \hat{I}_S^* \quad (4.2)$$

A rede da figura 4.1 em geral pode ser representada como um circuito equivalente T como mostrado na figura 4.2

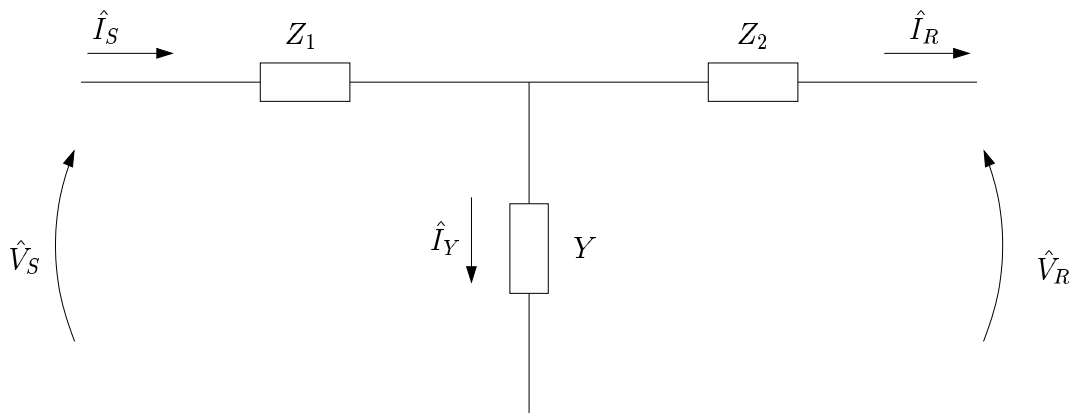


Figura 4.2: Circuito equivalente T

Pode-se pelas Leis de Kirchoff deduzir que:

$$\begin{aligned}
 \hat{I}_S &= \hat{I}_R + \hat{I}_Y \\
 &= \hat{I}_R + Y(\hat{V}_R + \hat{I}_R Z_2) \\
 &= Y\hat{V}_R + (1 + Y Z_2)\hat{I}_R
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

e que

$$\begin{aligned}
 \hat{V}_S &= \hat{V}_R + \hat{I}_R Z_2 + \hat{I}_S Z_1 \\
 &= \hat{V}_R + \hat{I}_R Z_2 + [Y\hat{V}_R + (1 + Y Z_2)\hat{I}_R] Z_1 \\
 &= (1 + Y Z_1)\hat{V}_R + (Z_1 + Z_2 + Y Z_1 Z_2)\hat{I}_R
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Considerando

$$\begin{aligned}
 A &= (1 + Y Z_1) \\
 B &= (Z_1 + Z_2 + Y Z_1 Z_2) \\
 C &= Y \\
 D &= (1 + Y Z_2)
 \end{aligned}$$

as equações (4.3) e (4.4) pode ser mostradas assim:

$$\hat{V}_S = A\hat{V}_R + B\hat{I}_R \tag{4.5}$$

$$\hat{I}_S = C\hat{V}_R + D\hat{I}_R \tag{4.6}$$

Em forma matricial fica:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_S \\ \hat{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_R \\ \hat{I}_R \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

em que

$$\begin{aligned}
 AD - BC &= (1 + Y Z_1) \cdot (1 + Y Z_2) - (Z_1 + Z_2 + Y Z_1 Z_2) \cdot (Y) \\
 &= 1
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Isolando \hat{I}_R de (4.5):

$$\hat{I}_R = \frac{1}{B} \hat{V}_S - \frac{A}{B} \hat{V}_R \quad (4.9)$$

Definindo:

$$\begin{aligned} A &= |A| \angle \alpha & \hat{V}_S &= |V_S| \angle \delta \\ B &= |B| \angle \beta & \hat{V}_R &= |V_R| \angle 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

a equação (4.9) fica:

$$\hat{I}_R = \frac{1}{B} \cdot |V_S| \angle (\delta - \beta) - \frac{A}{B} \cdot |V_R| \angle (\alpha - \beta) \quad (4.11)$$

Assim, substituindo (4.11) em (4.1) pode-se mostrar que a potência em R é dada por:

$$S_R = \frac{1}{B} \cdot |V_S| \cdot |V_R| \angle (\beta - \delta) - \frac{A}{B} \cdot |V_R|^2 \angle (\beta - \alpha) \quad (4.12)$$

Separando a parte real e a imaginária tem-se:

$$P_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \cdot \cos(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (4.13)$$

$$Q_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \cdot \text{sen}(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cdot \text{sen}(\beta - \alpha) \quad (4.14)$$

Considerando o caso mais simples de uma linha curta, onde Y é desprezível e $Z = Z_1 + Z_2$, para a qual:

$$A = 1 \angle 0$$

$$B = Z \angle \theta$$

em que $Z \angle \theta = R + jX$ é a impedância série da linha, as expressões (4.13) e (4.14) podem ser reescritas como:

$$P_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{Z} \cdot \cos(\theta - \delta) - \frac{|V_R|^2}{Z} \cdot \cos \theta \quad (4.15)$$

$$Q_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{Z} \cdot \sin(\theta - \delta) - \frac{|V_R|^2}{Z} \cdot \sin \theta \quad (4.16)$$

Baseado na forma de um polinômio quadrático $ax^2 + bx + c$ com $a \neq 0$, (4.15) e (4.16) são expressas respectivamente como:

$$|V_R|^2 \cdot \cos \theta - |V_S| \cdot |V_R| \cdot \cos(\theta - \delta) + ZP_R = 0 \quad (4.17)$$

$$|V_R|^2 \cdot \sin \theta - |V_S| \cdot |V_R| \cdot \sin(\theta - \delta) + ZQ_R = 0 \quad (4.18)$$

Considerando $|V_S| = 1$, $X = |Z| \sin \theta$ e $R = |Z| \cos \theta$ as raízes de (4.18) são dadas por:

$$V_R = \frac{\sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[\sin(\theta - \delta)]^2 - 4Q_RX}}{2 \sin \theta} \quad (4.19)$$

Realizando operações semelhantes a partir de (4.17) tem-se:

$$V_R = \frac{\cos(\theta - \delta) \pm \sqrt{[\cos(\theta - \delta)]^2 - 4P_R R}}{2 \cos \theta} \quad (4.20)$$

Para que as expressões de V_R em (4.19) e (4.20) tenham raízes reais:

$$L_M = \{[\text{sen}(\theta - \delta)]^2 - 4Q_R X\} \geq 0 \quad (4.21)$$

e:

$$L_P = \{[\cos(\theta - \delta)]^2 - 4P_R R\} \geq 0 \quad (4.22)$$

Os índices L_M e L_P dependem do carregamento P_R e Q_R e, em particular, diminuem com o aumento do carregamento. Se este carregamento for maior que um certo limite crítico, V_R torna-se imaginário, indicando que o limite de estabilidade de tensão foi atingido. Como em geral $R \ll X$ para redes de transmissão, L_M deve ser usado na maioria dos casos para avaliação das condições de estabilidade. O índice L_P pode tornar-se atraente para a avaliação das condições de estabilidade de redes de distribuição de energia, em que se tem uma relação R/X mais elevada.

A idéia é escolher o ramo com o menor índice como parâmetro, baseado em que este parâmetro será o que tem menor margem de segurança à estabilidade de tensão. Caso o parâmetro seja as perdas de potência ativa em ramos, o ramo ℓ escolhido como em um determinado passo será aquele que tiver o menor índice L_M .

Em [22] é apresentada a dedução do índice de proximidade ao colapso de tensão em função da potência reativa para a representação da rede com o modelo "π", mantendo a condição de desprezar o valor da admitância *shunt* da seguinte maneira:

$$L_{mn} = \frac{4Q_R X}{[\text{sen}(\theta - \delta)]^2} \geq 1 \quad (4.23)$$

Pode-se deduzir da forma semelhante o índice de proximidade em função da potência ativa obtendo-se:

$$L_{pn} = \frac{4P_R R}{[\cos(\theta - \delta)]^2} \geq 1 \quad (4.24)$$

As duas expressões anteriores concordam com (4.21) e (4.22) o que permite utilizá-las tanto no modelo “ T ” quanto no modelo “ π ”.

Estes índices não consideram linhas longas com admitâncias *shunt*, a posição do *tap* de transformadores em fase e defasadores nem os elementos *shunt* conectados às barras. As referências [23] e [27] fazem estas considerações apresentando diferenças importantes comparadas com os resultados dos índices L_{mn} e L_{pn} . A seguir são apresentados os índices para cada consideração citada.

4.2.1 Consideração de linhas longas

Levando em conta os valores da admitâncias *shunt* os índices ficam:

$$L'_M = [\text{sen}(\theta - \delta)]^2 - 4Q_R X + 4Q_R Z^2 y_{sh} \geq 0 \quad (4.25)$$

$$L'_P = \{[\cos(\theta - \delta)]^2 - 4P_R R\} \geq 0 \quad (4.26)$$

4.2.2 Consideração da posição do *tap*

Levando em conta a posição do *tap* de transformadores em fase e defasadores para um determinado ramo SR , utilizando o modelo do transformador ideal de relação $1 : t$ conectado à barra S em série com uma admitância conectada à barra R de acordo com a referência [24].

$$l_p = -\frac{4 \cdot r_{SR} \cdot P_{RS}}{\{1/t \cdot V_S \cdot [\cos(\theta_{SR} - \delta_{SR} + \varphi_{SR})]\}^2} \leq 1 \quad (4.27)$$

$$l_q = -\frac{4 \cdot Q_{RS} (-x_{SR} + b_{SR}^{sh} \cdot |z_{SR}|)^2}{\{1/t \cdot V_S \cdot [\text{sen}(\theta_{SR} - \delta_{SR} + \varphi_{SR})]\}^2} \leq 1 \quad (4.28)$$

4.2.3 Consideração de *shunt* de barra (na barra R)

O seguinte índice considera de forma aproximada a contribuição de elementos *shunt* conectados às barras como os bancos de capacitores, os quais são muito importantes no fornecimento de reativos na rede. Para esta condição o índice l_p permanece inalterado, e:

$$l_q'' = \frac{4 \cdot (-x_{SR} + b_{SR}^{sh} \cdot |z_{SR}|)^2 + |z_{SR}|^2 \cdot b_R^{sh} \cdot Q'_{RS}}{\{1/t \cdot V_S \cdot [\text{sen}(\theta_{SR} - \delta_{SR} + \varphi_{SR})]\}^2} \leq 1 \quad (4.29)$$

A seguir é apresentada a tabela 4.1 resumindo os índices até aqui estudados:

Tabela 4.1: Índices de estabilidade deduzidos para o ramo S-R.

Consideração	Índice em função da Potência ativa	Índice em função da Potência Reativa
Linha curta modelo T	L_M	L_P
Linha curta modelo π	L_{mn}	L_{pm}
Linha longa	L'_M	L'_P
Linha longa com <i>tap</i> de transformador	l_p	l_q
Linha longa com <i>tap</i> e com <i>Shunt</i> de barra	l_p	l_q''

4.3 Índices em função da máxima transferência de potência

Os índices apresentados a seguir foram desenvolvidos em [26] considerando os fluxos de potência pelas linhas e o máximo fluxo de potência que pode ser transferido. A seguir é apresentada a dedução com maiores detalhes, partindo da figura 4.1 os parâmetros da rede podem ser apresentados como se mostra na figura 4.3.

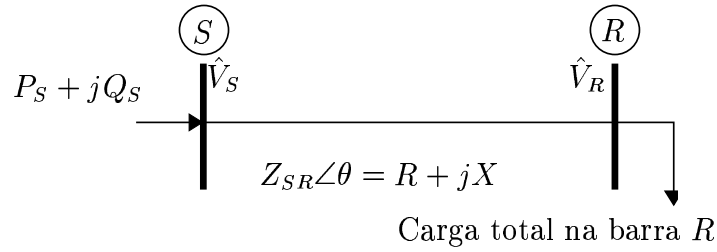


Figura 4.3: Modelamento típico de uma linha de transmissão. Parâmetros para rede de duas barras

Porém, sob este modelamento todo o fluxo de potência que sai da barra S (*sending*) chega até a carga conectada à barra R (*receiving*). Como em geral em redes de transmissão é muito comum ter sistemas malhados onde uma barra pode estar conectada a vários ramos, é preciso fazer uma aproximação do modelo como se apresenta na figura 4.4. Agora S_R representa além da potência da carga S_L na barra, a somatória de todos os fluxos entrando ou saindo da barra R (*receiving*).

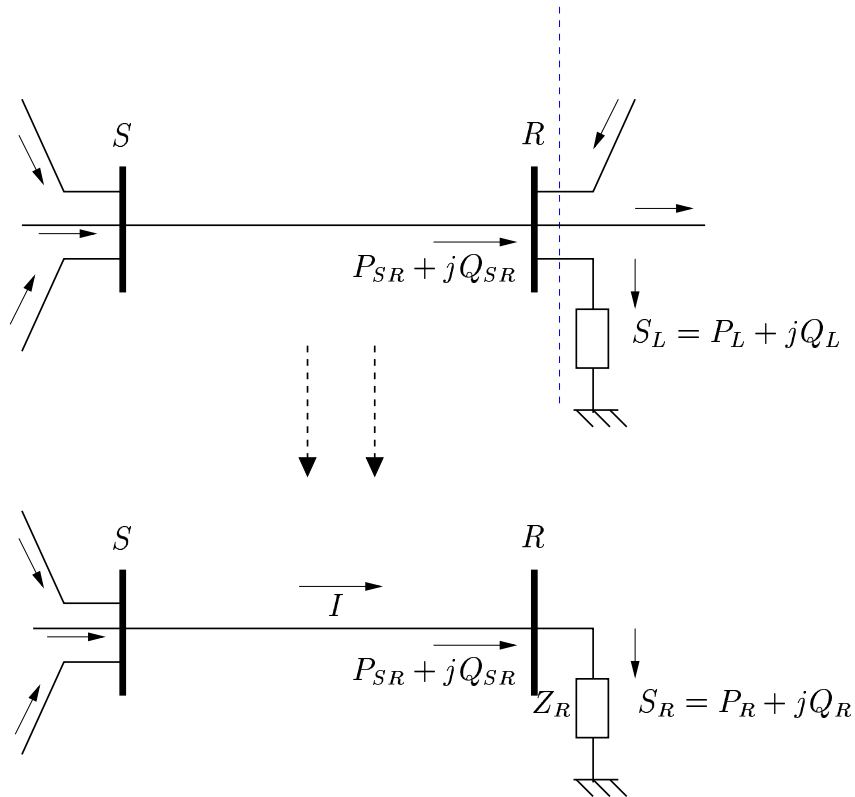


Figura 4.4: Aproximação da carga para uma barra conectada a vários ramos.

4.3 Índices em função da máxima transferência de potência

Das figuras 4.3 e 4.4 observa-se que a corrente que passa pelo ramo SR é dada por:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{V_S}{Z_{eq}} = \frac{V_S}{Z_{ramo} + Z_R} \\
 &= \frac{V_S}{\sqrt{(r_{SR} + r_R)^2 + (x_{SR} + x_R)^2}} \\
 &= \frac{V_S}{\sqrt{(Z_{SR} \cos \theta + Z_R \cos \phi)^2 + (Z_{SR} \sin \theta + Z_R \sin \phi)^2}}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

e como a tensão na barra R (*receiving*) é $V_R = Z_R \cdot I$:

$$V_R = Z_R \cdot \frac{V_S}{\sqrt{(Z_{SR}^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) + 2Z_{SR}Z_R (\cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) + Z_R^2 (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi))}} \tag{4.31}$$

Sabendo que

$$\cos^2 A + \sin^2 A = 1 \text{ e}$$

$$\cos A \cdot \cos B + \sin A \cdot \sin B = \cos(A - B) \text{ tem-se:}$$

$$V_R = Z_R \cdot \frac{V_S}{\sqrt{(Z_{SR}^2 + 2Z_{SR}Z_R \cos(\theta - \phi) + Z_R^2)}} \tag{4.32}$$

Dividindo o numerador e o denominador do lado direito da equação 4.32 por Z_{SR} :

$$V_R = \frac{Z_R}{Z_{SR}} \cdot \frac{V_S}{\sqrt{1 + 2\frac{Z_R}{Z_{SR}} \cos(\theta - \phi) + \left(\frac{Z_R}{Z_{SR}}\right)^2}} \tag{4.33}$$

A potência ativa que chega na barra R (*receiving*) é:

$$P_{SR} = \Re\{S_{SR}\} = V_R \cdot I \cdot \cos \phi = \frac{V_S^2}{1 + 2\frac{Z_R}{Z_{SR}} \cos(\theta - \phi) + \left(\frac{Z_R}{Z_{SR}}\right)^2} \cdot \frac{Z_R}{Z_{SR}^2} \cdot \cos \phi \tag{4.34}$$

A máxima transferência de potência ativa ocorre quando $Z_R = Z_{SR}$ ou seja $\frac{Z_R}{Z_{SR}} = 1$. Assim:

$$P_{SR(max)} = \frac{\frac{V_S^2}{Z_{SR}}}{2 + 2 \cos(\theta - \phi)} \cdot \cos \phi \tag{4.35}$$

Pela seguinte propriedade da função coseno e considerando que $A = B$:

$$\begin{aligned}\cos(A + B) &= \cos(A) \cos(B) - \operatorname{sen}(A) \operatorname{sen}(B) \\ \cos(2A) &= \cos^2(A) - \operatorname{sen}^2(A)\end{aligned}$$

Agora

$$\begin{aligned}\cos(2A) &= \cos^2(A) - (1 - \cos^2(A)) \\ \cos(2A) &= 2 \cos^2(A) - 1 \\ 2 \cos^2(A) &= \cos(2A) + 1\end{aligned}$$

Se $A = \frac{\theta - \phi}{2}$:

$$2 \cos^2 \left(\frac{\theta - \phi}{2} \right) = \cos(\theta - \phi) + 1 \quad (4.36)$$

Substituindo 4.36 em 4.35:

$$P_{SR(max)} = \frac{\frac{V_S^2}{Z_{SR}}}{4 \cos^2 \left(\frac{\theta - \phi}{2} \right)} \cdot \cos \phi \quad (4.37)$$

O índice pode ser estabelecido como a relação entre a potência ativa transferida da barra S (*sending*) para a barra R (*receiving*) e a máxima potência ativa transferida no ramo SR :

$$L_{SR} = \frac{P_{SR}}{P_{SR(max)}} \quad (4.38)$$

Fazendo cálculos similares para as perdas de potência ativa no ramo SR :

$$P_{l_{SR}} = I^2 \cdot Z_{SR} \cdot \cos \theta = \frac{\frac{V_S^2}{Z_{SR}}}{1 + 2 \frac{Z_R}{Z_{SR}} \cos(\theta - \phi) + \left(\frac{Z_R}{Z_{SR}} \right)^2} \cdot \cos \theta \quad (4.39)$$

E se $Z_R = Z_{SR}$:

$$P_{l_{SR}(max)} = \frac{V_S^2}{Z_{SR}} \cdot \frac{1}{4 \cos^2\left(\frac{\theta-\phi}{2}\right)} \cdot \cos \theta \quad (4.40)$$

Assim, o índice em função das perdas de potência ativa está dado por:

$$L_{l_{SR}} = \frac{P_{l_{SR}}}{P_{l_{SR}(max)}} \quad (4.41)$$

Tanto L_{SR} quanto $L_{l_{SR}}$ no caso base têm um valor pequeno e devido ao aumento de carregamento do sistema devem chegar próximos de 1 (um) no PMC. Esta análise é feita com detalhes na subseção 4.5.2.

4.4 Índices l_{pq}

Os índices apresentados na seção 4.2 levam em conta os fluxos de potência ativa e reativa de maneira independente. O índice l_{pq} é deduzido a partir das equações gerais tanto de fluxo de potência ativa quanto de potência reativa, as quais são encontradas em [29], como segue:

$$\begin{aligned} P_{km} &= (a_{km}V_k)^2 g_{km} - a_{km}V_kV_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sen(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ Q_{km} &= -(a_{km}V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - a_{km}V_kV_m [g_{km} \sen(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ P_{mk} &= V_m^2 g_{km} - a_{km}V_kV_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \sen(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ Q_{mk} &= -(b_{km} + b_{km}^{sh})V_m^2 + a_{km}V_kV_m [g_{km} \sen(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \end{aligned} \quad (4.42)$$

Considerando que:

$$\begin{aligned} g_{km} &= y_{km} \cos(\delta_{km}) \\ b_{km} &= y_{km} \sen(\delta_{km}) \end{aligned} \quad (4.43)$$

Substituindo (4.43) em (4.42) os fluxos de potência de m para k ficam:

$$\begin{aligned}
 P_{mk} &= V_m^2 y_{km} \cos(A) - a_{km} V_k V_m [y_{km} \cos(A) \cos(B) - y_{km} \sin(A) \sin(B)] \\
 Q_{mk} &= -(y_{km} \sin(A) + b_{km}^{sh}) V_m^2 + a_{km} V_k V_m [y_{km} \cos(A) \sin(B) + y_{km} \sin(A) \cos(B)]
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

Em que $A = \delta_{km}$ e $B = \theta_{km} + \varphi_{km}$.

Utilizando as seguintes propriedades de soma e resta de ângulos:

$$\begin{aligned}
 \cos(A + B) &= \cos(A) \cos(B) - \sin(A) \sin(B) \\
 \sin(A + B) &= \cos(A) \sin(B) + \sin(A) \cos(B)
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

o conjunto de equações (4.44) pode ser apresentado como:

$$\begin{aligned}
 P_{mk} &= V_m^2 y_{km} \cos(A) - a_{km} V_k V_m [y_{km} \cos(A + B)] \\
 Q_{mk} &= -(y_{km} \sin(A) + b_{km}^{sh}) V_m^2 + a_{km} V_k V_m [y_{km} \sin(A + B)]
 \end{aligned} \tag{4.46}$$

ou como:

$$\begin{aligned}
 P_{mk} &= \frac{V_m^2}{z_{km}} \cos(A) - \frac{a_{km} V_k V_m \cos(A-B)}{z_{km}} \\
 Q_{mk} &= \frac{V_m^2}{z_{km}} \sin(A) - \frac{a_{km} V_k V_m \sin(A-B)}{z_{km}} - V_m^2 b_{km}^{sh}
 \end{aligned} \tag{4.47}$$

sabendo que $\sin(-A) = -\sin(A)$ e $\cos(-A) = \cos(A)$.

Assim,

$$\begin{aligned}
 \frac{a_{km} V_k V_m \cos(A-B)}{z_{km}} &= \frac{V_m^2}{z_{km}} \cos(A) - P_{mk} \\
 \frac{a_{km} V_k V_m \sin(A-B)}{z_{km}} &= \frac{V_m^2}{z_{km}} \sin(A) - Q_{mk} - V_m^2 b_{km}^{sh}
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

Elevando ao quadrado e somando tem-se:

$$\frac{a_{km}^2 V_k^2 V_m^2}{z_{km}^2} = \left(\frac{V_m^2}{z_{km}} \cos(A) - P_{mk} \right)^2 + \left(\frac{V_m^2}{z_{km}} \sin(A) - Q_{mk} - V_m^2 b_{km}^{sh} \right)^2 \tag{4.49}$$

Renomeando $U = V_m^2$:

$$a_{km}^2 V_k^2 U = U^2 \cos^2(A) - 2U \cos(A) z_{km} P_{mk} + z_{km}^2 P_{mk}^2 + U^2 \sin^2(A) - 2U \sin(A) z_{km} (U b_{km}^{sh} + Q_{mk}) + z_{km}^2 (U b_{km}^{sh} + Q_{mk})^2 \quad (4.50)$$

$$0 = -a_{km}^2 V_k^2 U + U^2 \cos^2(A) - 2U \cos(A) z_{km} P_{mk} + z_{km}^2 P_{mk}^2 + U^2 \sin^2(A) - 2U^2 \sin(A) z_{km} b_{km}^{sh} - 2U \sin(A) z_{km} Q_{mk} + z_{km}^2 U^2 b_{km}^{sh\ 2} + 2z_{km}^2 U b_{km}^{sh} Q_{mk} + z_{km}^2 Q_{mk}^2 \quad (4.51)$$

Agrupando:

$$0 = U^2 [\cos^2(A) + \sin^2(A) - 2 \sin(A) z_{km} b_{km}^{sh} + z_{km}^2 b_{km}^{sh\ 2}] + U [-a_{km}^2 V_k^2 - 2 \cos(A) z_{km} P_{mk} - 2 \sin(A) z_{km} Q_{mk} + 2z_{km}^2 b_{km}^{sh} Q_{mk}] + z_{km}^2 P_{mk}^2 + z_{km}^2 Q_{mk}^2 \quad (4.52)$$

Definindo:

$$\begin{aligned} a &= 1 - 2 \sin(A) z_{km} b_{km}^{sh} + z_{km}^2 b_{km}^{sh\ 2} \\ b &= -a_{km}^2 V_k^2 - 2 \cos(A) z_{km} P_{mk} - 2 \sin(A) z_{km} Q_{mk} + 2z_{km}^2 b_{km}^{sh} Q_{mk} \\ c &= z_{km}^2 (P_{mk}^2 + Q_{mk}^2) \end{aligned}$$

a equação 4.52 fica da forma $aU^2 + bU + c = 0$ cuja solução é dada por:

$$U = V_m = \pm \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}}$$

Assim, para que as expressões de V_m na equação 4.52 forneçam valores reais e positivos, deve-se ter que:

$$I : b^2 - 4ac \geq 0$$

$$II : \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \geq 0$$

ou

$$III : \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \geq 0$$

II e *III* têm um comportamento simétrico, além de ter uma forte relação com a curva PV. *I* tem relação com a distância entre as tensões da parte superior e inferior da curva. Para os objetivos deste trabalho foi escolhido o índice *I* para ser implementado ao fluxo de carga da continuação. Assim, l_{pq} fica:

$$l_{pq} = b^2 - 4ac \geq 0 \quad (4.53)$$

ou,

$$l_{pq1} = \frac{4ac}{b^2} \leq 1 \quad (4.54)$$

Na subseção 4.5.3 são apresentados alguns resultados que mostram claras diferenças numéricas entre as equações 4.53 e 4.54 as quais serão muito importantes para determinar os critérios de seleção do parâmetro da continuação nos capítulos seguintes.

4.5 Testes e resultados

4.5.1 Índices l_p e l_q''

Em função dos objetivos propostos neste trabalho, a seguir são apresentados alguns resultados obtidos com os índices de linhas l_p e l_q'' os quais levam em conta as considerações descritas nas seções anteriores. Inicialmente foi utilizado o sistema de 14 barras e 20 ramos.

A figura 4.5a. mostra os valores normalizados do índice l_p e das perdas de potência ativa para cada ramo do sistema no caso base ($\lambda = 1$). Observa-se que os ramos de 1 até 7 apresentam os maiores valores em l_p e não aparecem valores nos ramos 8, 9, 10, 14 e 15 devido a que estes ramos são transformadores ou linhas cuja resistência é nula, o que concorda com as apreciações feitas ao longo do capítulo.

Da mesma maneira são apresentados para a figura 4.5b. o índice l_q'' e as perdas reativas pelas linhas. Nos ramos 2 e 3 l_q'' é igual a zero já que os fluxos de potência reativa tanto de

S para R quanto de R para S são positivos.

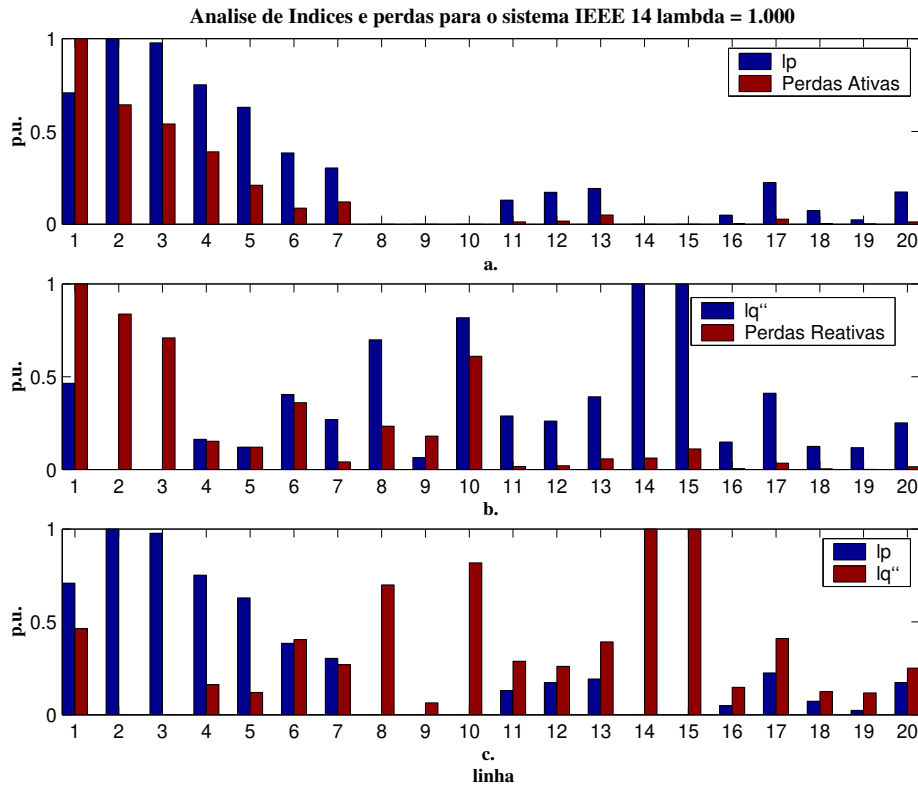


Figura 4.5: Índices e perdas pelos ramos para o sistema de 14 barras.

A figura 4.5c. mostra os índices l_p e $l_{q''}$; claramente pode-se comprovar que não existe uma relação direta entre estes índices como se previa na sua dedução teórica. Os valores dos índices e as perdas para as condições normais de operação da rede (*caso base*) são mostradas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Índices l_p e l_q para o sistema IEEE 14 (caso base)

Linha	De	Para	l_p	l_q	Perdas Ativas (MW)	Perdas Reativas (MVar)
1	1	2	0.6828	0.0465	4.2948	7.2636
2	1	5	0.9642	0.0000	2.7638	6.0843
3	2	3	0.9421	0.0000	2.3202	5.1494
4	2	4	0.7242	0.0163	1.6770	1.1062
5	2	5	0.6070	0.0121	0.9023	-0.8712
6	3	4	0.3704	0.0405	0.3713	-2.6120
7	4	5	0.2924	0.0270	0.5165	0.2990
8	4	7	0.0000	0.0701	0.0000	1.6918
9	4	9	0.0000	0.0064	0.0000	1.3035
10	5	6	0.0000	0.0820	0.0000	4.4290
11	6	11	0.1249	0.0289	0.0547	0.1146
12	6	12	0.1661	0.0262	0.0717	0.1492
13	6	13	0.1855	0.0393	0.2115	0.4166
14	7	8	0.0000	0.1003	0.0000	0.4466
15	7	9	0.0000	0.1002	0.0000	0.8023
16	9	10	0.0473	0.0148	0.0131	0.0348
17	9	14	0.2168	0.0412	0.1168	0.2484
18	10	11	0.0701	0.0125	0.0123	0.0288
19	12	13	0.0231	0.0118	0.0062	0.0056
20	13	14	0.1673	0.0252	0.0536	0.1091

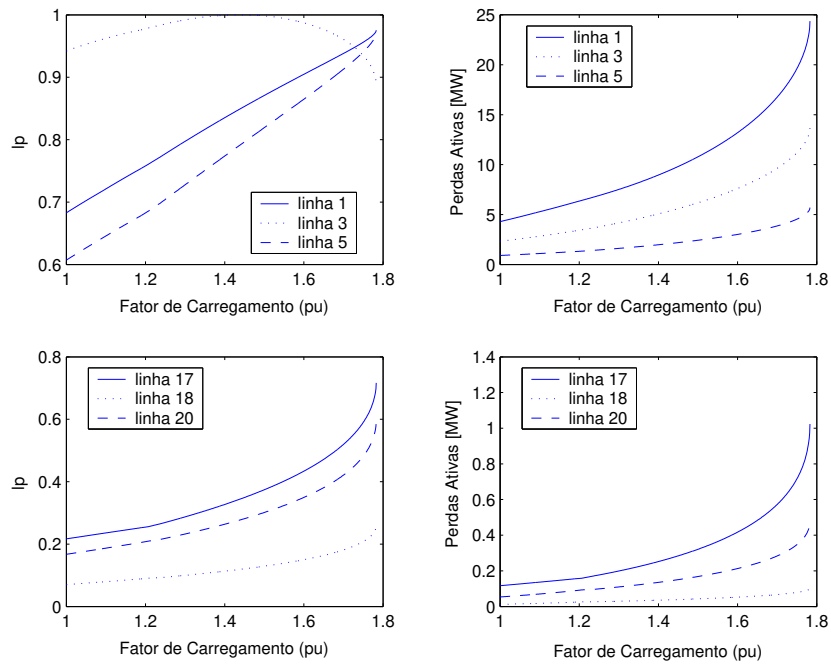


Figura 4.6: Índice l_p e perdas ativas pelos ramos para o sistema de 14 barras.

Em função do aumento de carregamento tanto os índices quanto as perdas têm um comportamento crescente; porém, este comportamento torna-se irregular dependendo do ramo. A figura 4.6 apresenta os índices e as perdas para 6 dos 20 ramos do sistema de 14 barras. As linhas 1 e 5 têm um crescimento relativamente constante; já o índice do ramo 3 tem o seu maior valor (aproximadamente 1) entre $1.42 \leq \lambda \leq 1.45$ e logo decresce. Para os ramos 17, 18 e 20 mostra-se uma melhor correspondência entre o índice l_p e as perdas ativas em cada ramo.

Para o caso reativo, observa-se da mesma maneira, alguns comportamentos dispares nos ramos 1, 4 e 9, já as últimas linhas aparecem melhor comportadas (figura 4.7).

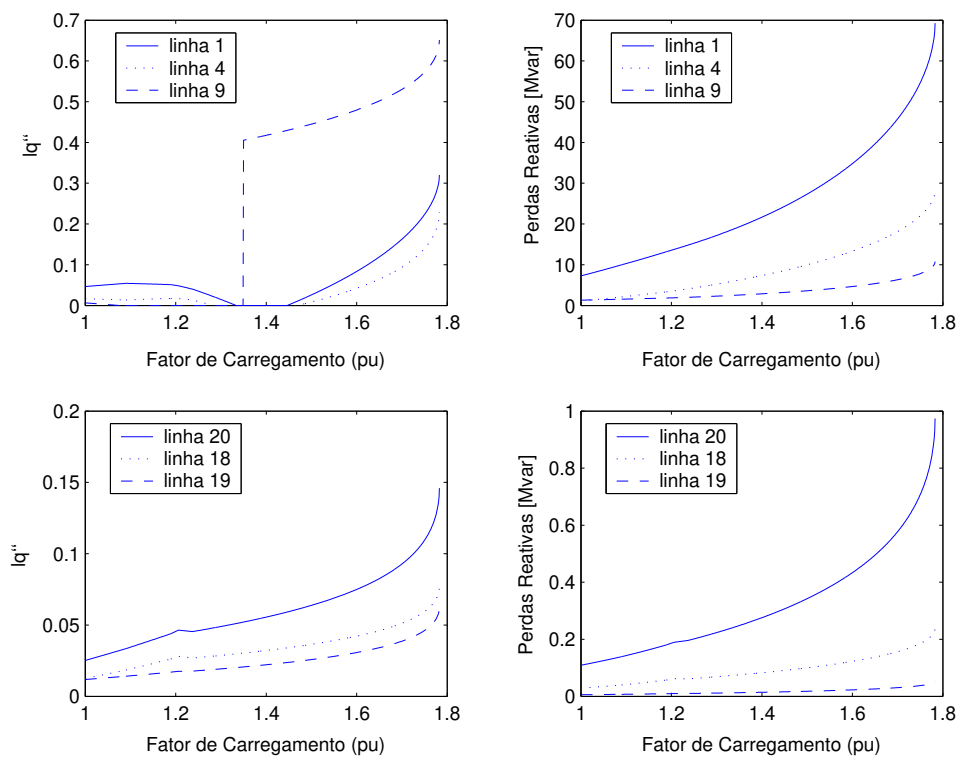


Figura 4.7: Índice l_q e perdas reativas pelos ramos para o sistema de 14 barras.

A figura 4.8 mostra o comportamento do índice l_p ao longo da curva PV, isto é tanto na parte superior quanto a parte inferior da curva. No primeiro gráfico verifica-se o traçado da totalidade da curva PV para a barra 14 no sistema de 14 barras. Para cada ponto da curva PV foi calculado o índice l_p . Nos outros três gráficos mostra-se o comportamento deste índice onde seus valores variam consideravelmente para cada ramo.

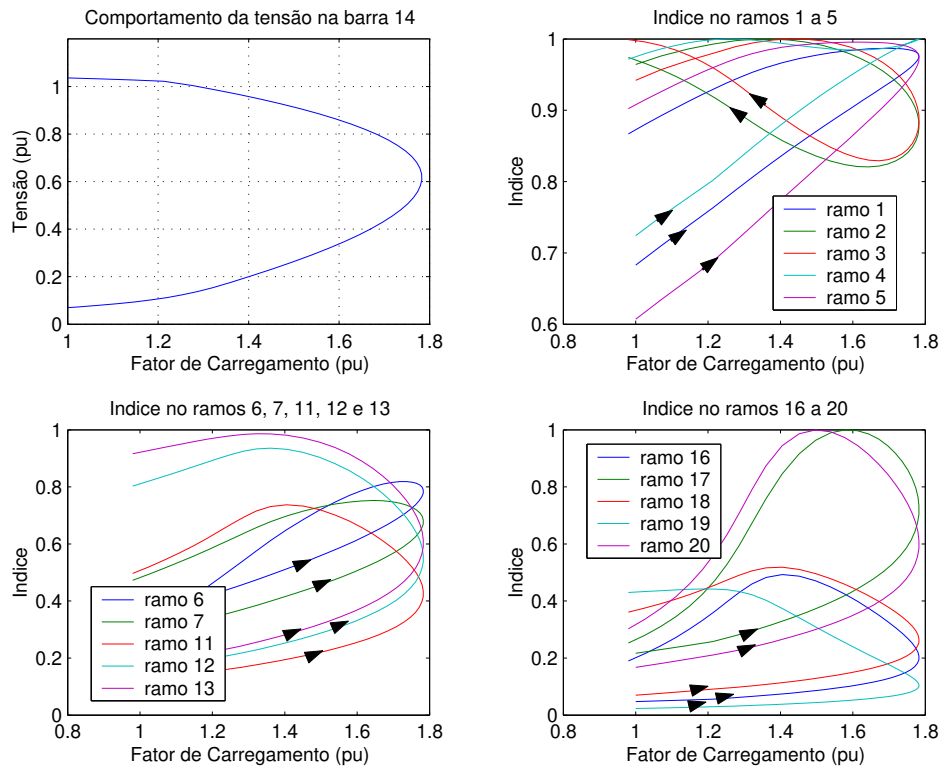


Figura 4.8: Índice l_p ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.

4.5.2 Índices L_{SR} e $L_{l_{SR}}$

De maneira similar nas figuras 4.9 e 4.10 mostra-se o comportamento do índice L_{SR} e $L_{l_{SR}}$ tanto para a região estável quanto para a região instável da curva PV. No caso do L_{SR} para a última parte da curva os ramos que têm os maiores valores no índice são 12, 13, 10 e 14, destes ramos, os dois primeiros possuem uma semelhança com o índice de proximidade ao colapso de tensão l_p .

A diferença das figuras apresentadas para os índice l_p , a figura 4.9 o comportamento do índice L_{SR} para todos os ramos do sistema de 14 barras, isto é, incluindo os ramos que são transformadores, mesmo que suas perdas ativas sejam praticamente desprezíveis.

4.5 Testes e resultados

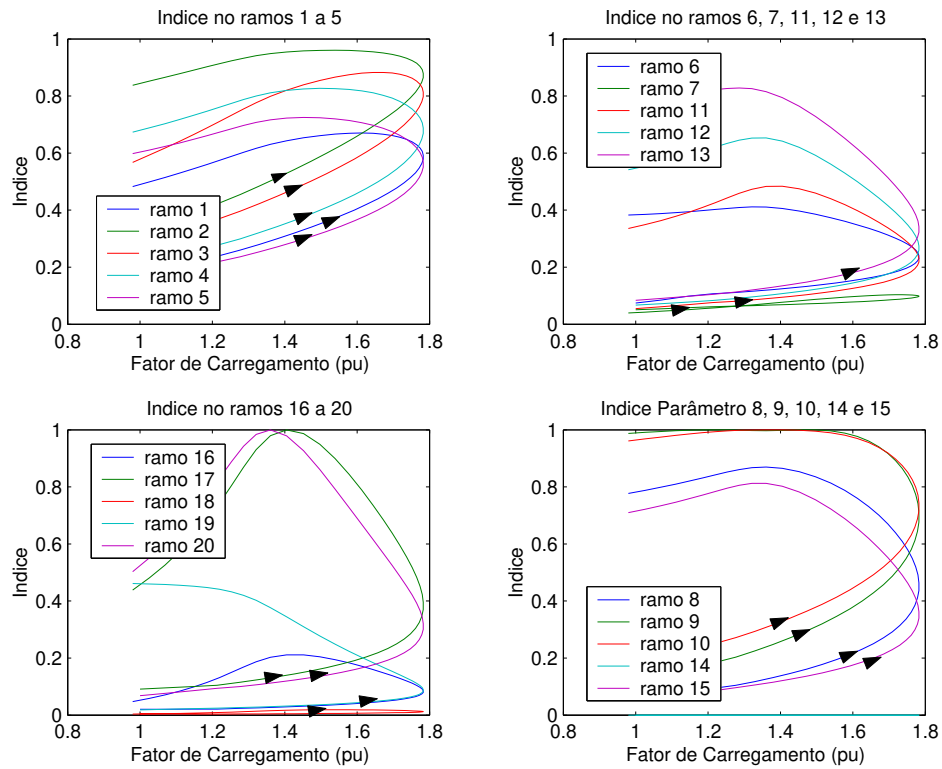


Figura 4.9: Índice L_{SR} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.

No índice $L_{l_{SR}}$ aparece um comportamento um pouco diferente. Na parte instável da curva os valores mais altos são atingidos pelos ramos 17 e 20, mantendo-se até o final da curva a diferença do que acontece com os índices lp e L_{SR} . Igualmente existem diferenças entre L_{SR} e $L_{l_{SR}}$ para os ramos 8, 9, 10, 14 e 15 onde o seu valor do índice é zero como era de se esperar devido a que o índice $L_{l_{SR}}$ depende das perdas de potência ativa que para estes ramos por serem transformadores ($r = 0$) é nula.

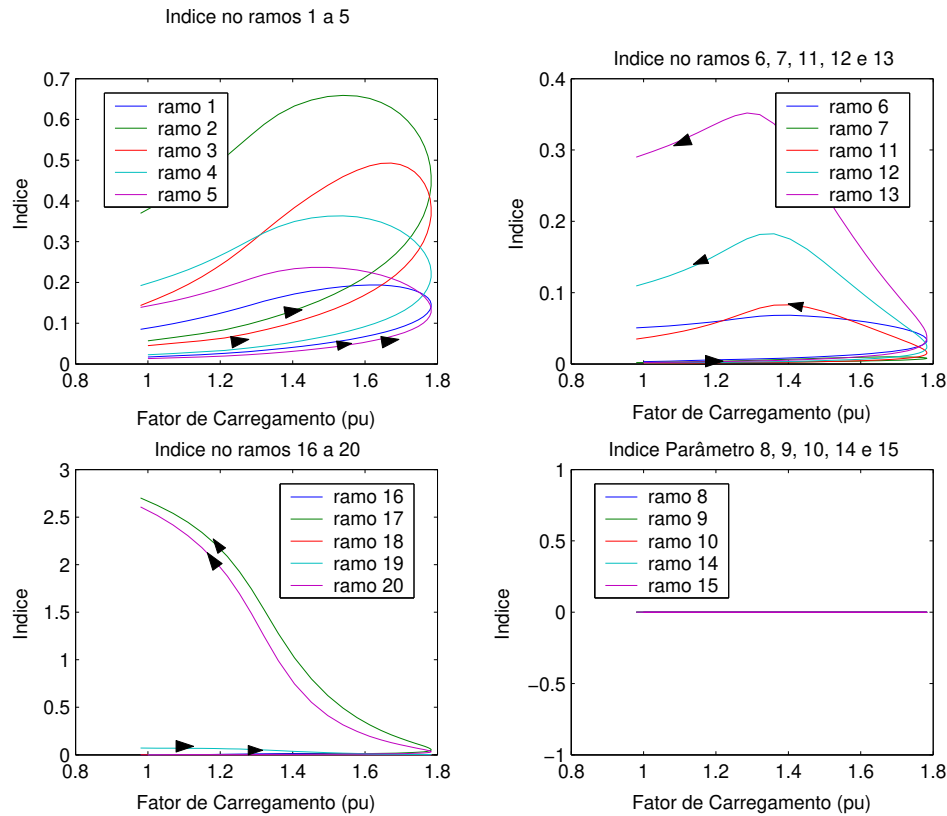


Figura 4.10: Índice L_{SR} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.

4.5.3 Índice l_{pq}

Como foi descrito na seção 4.4 o índice l_{pq} leva em conta os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos. Nessa mesma seção foram deduzidas as expressões para l_{pq} (equação 4.53) e para l_{pq1} (equação 4.54).

No primeiro caso, o índice l_{pq} para cada ramo parte de um valor relativamente alto e teoricamente, conforme aumenta o carregamento tende a diminuir até chegar a 0 (zero). Na figura 4.11 é apresentado o comportamento do índice l_{pq} para o sistema de 14 barras onde os valores dos índices para cada ramo diminuem, mas não chegam a zero possivelmente devido às aproximações feitas na sua dedução. Porém, as curvas de cada ramo são melhor comportadas do que as da figura 4.12.

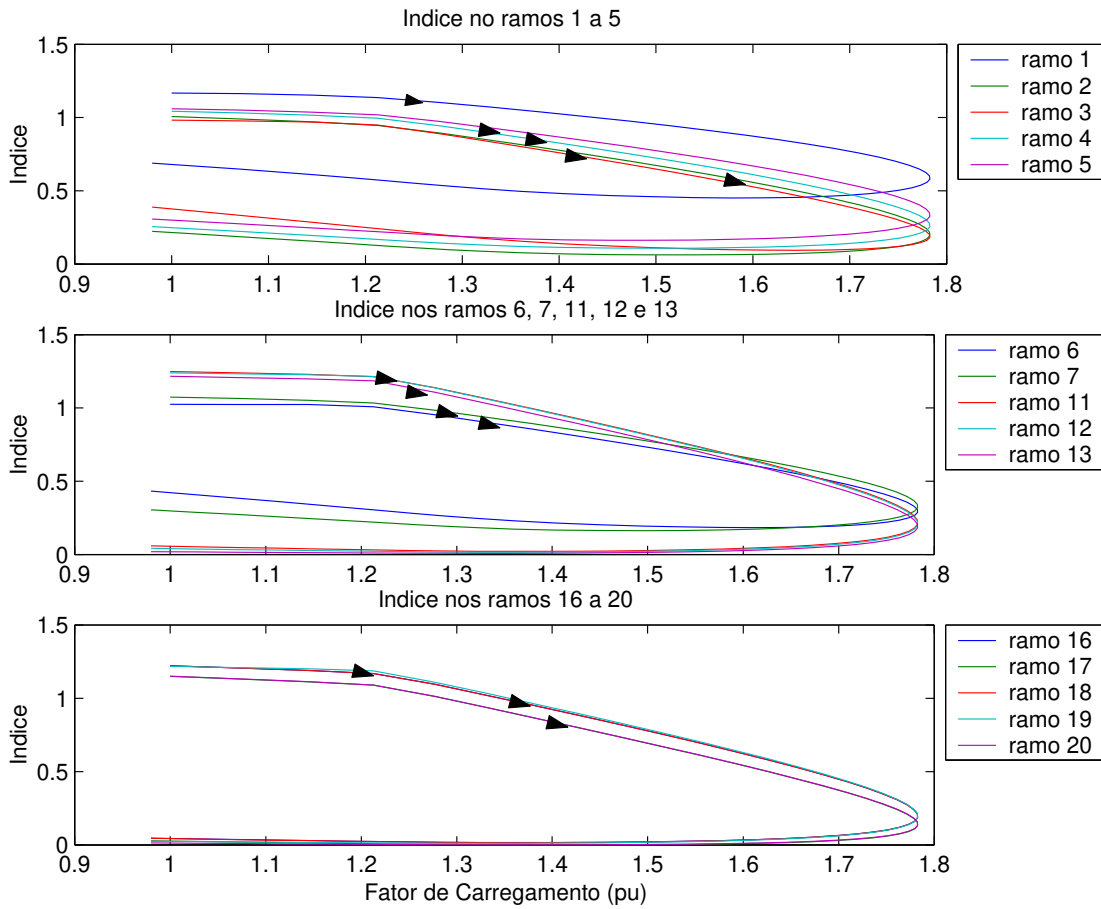


Figura 4.11: Índice l_{pq} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.

Fazendo uma análise semelhante para o índice l_{pq1} mostra-se a figura 4.12. Teoricamente os valores dos índices devem partir de zero e chegar até 1 (um). Observa-se que o comportamento deste índice ao longo da curva PV é bastante irregular justificado, não só pelas aproximações feitas na dedução, mas também pelas dificuldades numéricas quando é calculada a relação entre b^2 e $4ac$ quando estes valores são próximos de zero. Por outro lado, existe também um comportamento similar entre o L_{SR} e l_{pq1} para a maioria dos ramos incluindo a variação significativa dos ramos 17 e 20 ao longo da curva PV.

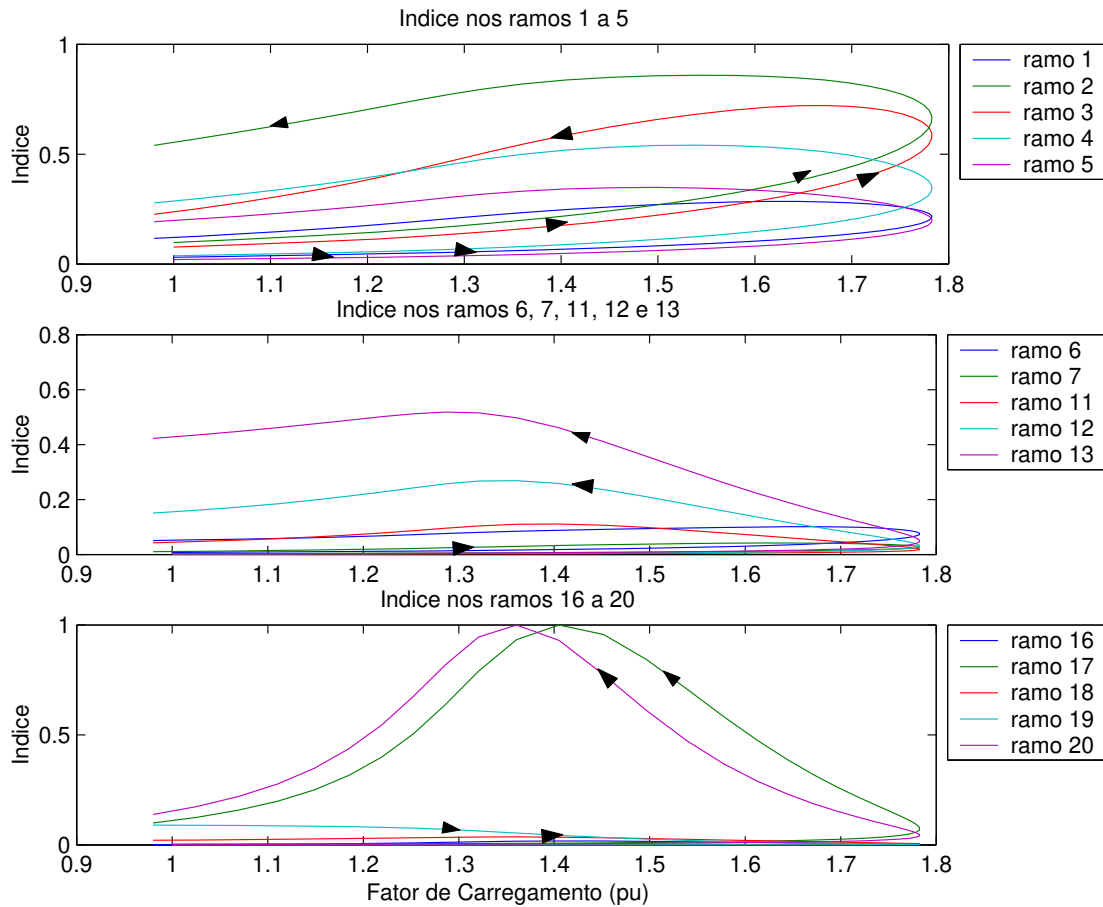


Figura 4.12: Índice l_{pq1} ao longo da curva PV ramos para o sistema de 14 barras.

Para todos os índices apresentados anteriormente pode-se observar claramente a variedade de comportamentos para cada índice e para cada ramo. Isto é, por exemplo na figura 4.10 as curvas do índice L_{LSR} para os ramos 1-5 apresentam comportamentos muito diferentes a dos ramos 6-7, 11-13 e 16-20. Isto acontece também para todos os demais índices. Podem existir alguns motivos para ter este tipo de resultados. O principal poderia ser que todos os índices foram deduzidos para determinar a proximidade ao colapso de tensão, ou seja, só para a parte superior da curva. Um outro motivo é que estes índices inicialmente são modelados para um sistema de duas barras. Para sistemas com um maior número de barras e ainda com barras conectadas a vários ramos são feitas aproximações que podem ter algum efeito no valor dos índices. Finalmente, existem dificuldades numéricas consideráveis, principalmente próximos do PMC e na parte inferior da curva PV (região instável).

4.6 Dificuldades numéricas e aproximações

A diferença dos comportamentos apresentados nas figuras 4.11 e 4.12 está baseada em vários fatores entre eles certas aproximações que foram levadas em conta quando da dedução dos índices e em algumas dificuldades numéricas que são mostradas a seguir.

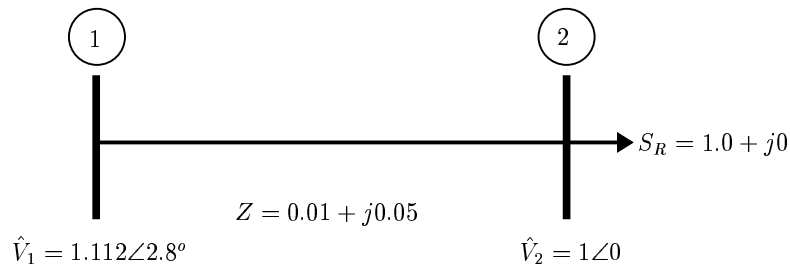


Figura 4.13: Rede de duas barras

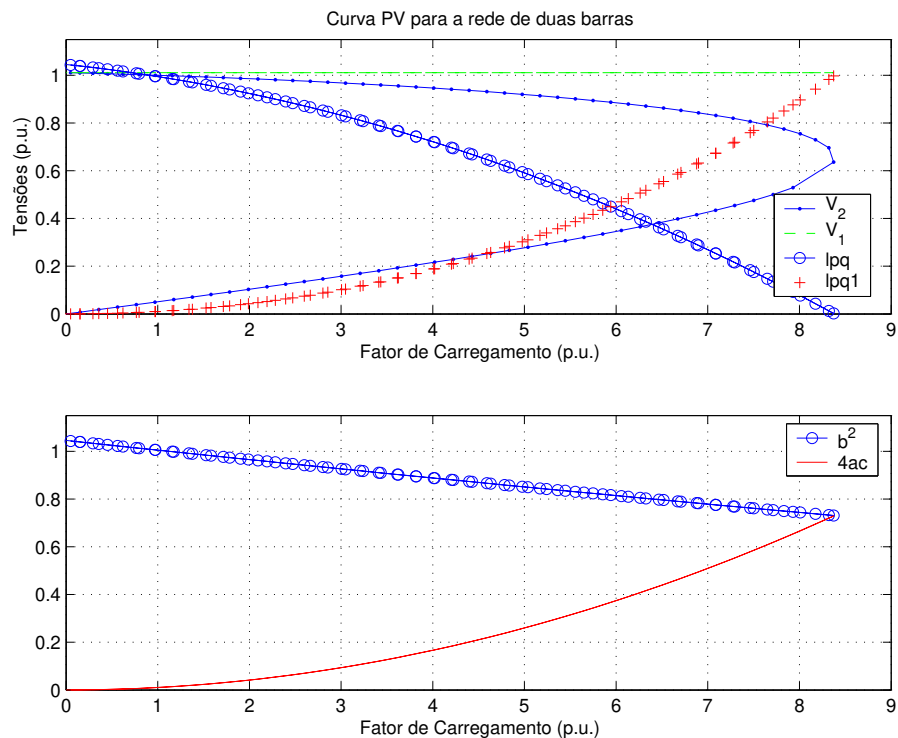


Figura 4.14: Curva PV e índices para sistema de duas barras.

Utilizando uma rede exemplo de duas barras como apresentada na figura 4.13, observa-se que existe uma forte correspondência entre os índices lpq , $lpq1$ e a distância entre as tensões da região estável e instável da curva PV como é mostrado na figura 4.14 o que concorda com a expressão I da seção 4.4. Fica claro que no PMC, lpq vai para 0 e $lpq1$ tende a 1. Além disso tanto lpq quanto $lpq1$ utilizam o mesmo *caminho* antes e depois do PMC. Nesta figura é também ilustrado o comportamento de b^2 e $4ac$ para verificar que para altos carregamentos estes valores tendem a chegar ao mesmo ponto.

No sistema de 14 barras aparecem diferenças consideráveis no comportamento dos índices lpq e $lpq1$ para o ramo 17 (figura 4.15).

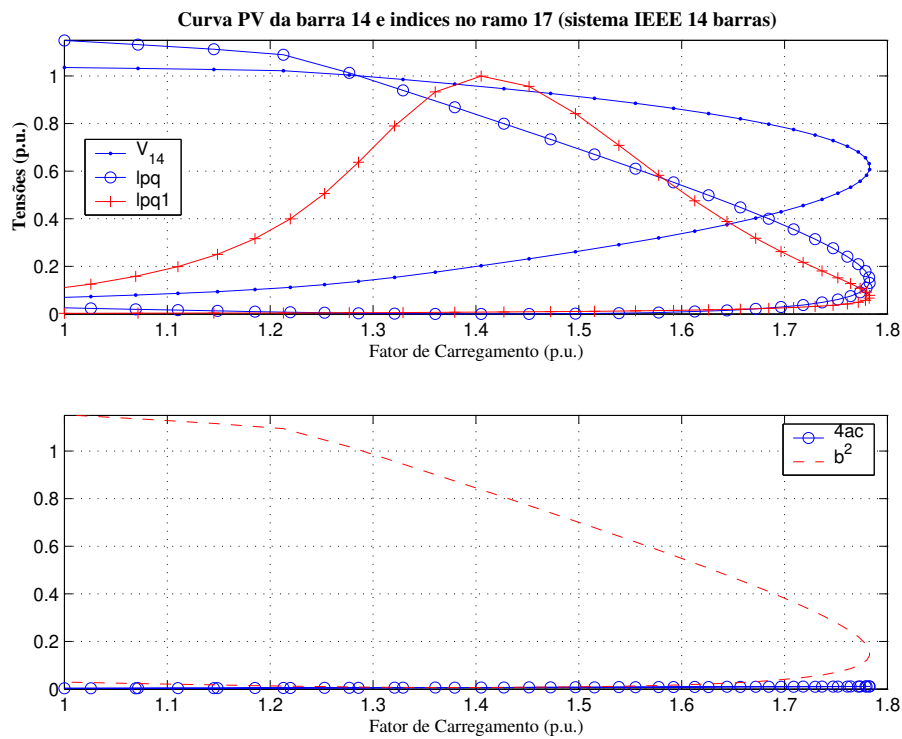


Figura 4.15: Curva PV e índices para sistema de 14 barras.

Estas diferenças entre os índices para o sistema de duas barras e os índices do sistema de 14 barras, estão em função das aproximações feitas na seção 4.4 e nas dificuldades numéricas encontradas no seu cálculo. A figura 4.16 e a tabela 4.3 facilitam a compreensão destas dificuldades numéricas. Foram selecionados quatro pontos da curva PV da barra 14, dois acima e dois abaixo do PMC. Para o *caso base* lpq inicia num valor alto e $lpq1$ num valor próximo de 0, conforme à rede de duas barras, mas já na parte inferior da curva estes dois índices não atingem o valor esperado, ou seja, $lpq1$ chegar próximo de 0 e lpq próximo de

1. Isto se deve a que b^2 e $4ac$ estão muito próximo de 0, o que faz com que a relação entre eles ($lpq1$) apresente resultados muito diferentes aos esperados.

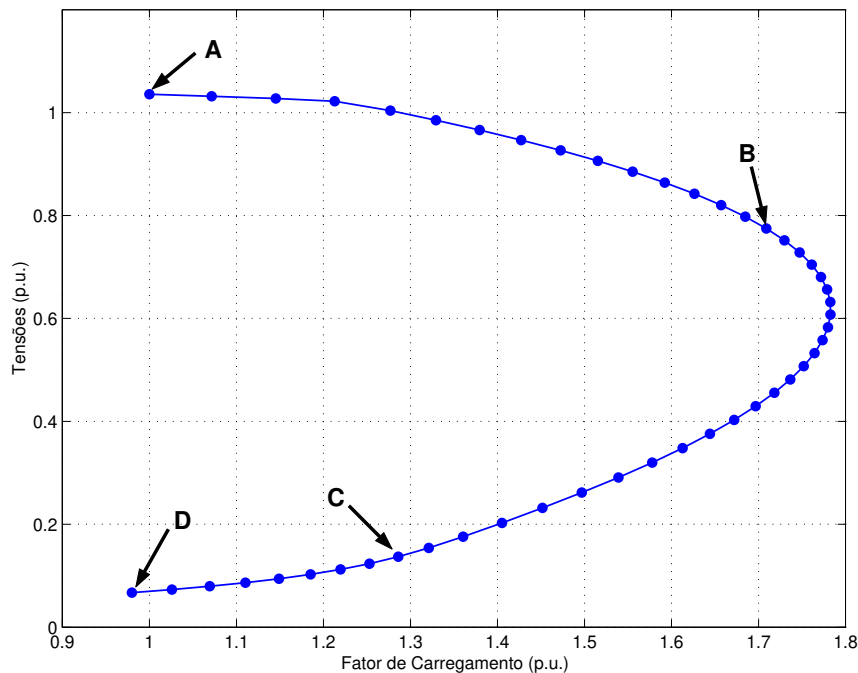


Figura 4.16: Pontos escolhidos para o cálculo dos índices lpq e $lpq1$

Tabela 4.3: Cálculo dos índices lpq e $lpq1$ para o sistema IEEE 14

Ponto	Carregamento	a	b	c	b^2	$4ac$	lpq	$lpq1$
A	*1.0000	1.0000	-1.0737	0.0009	1.1528	0.0035	1.1493	0.0031
B	1.7089	1.0000	-0.6046	0.0025	0.3656	0.0100	0.3556	0.0273
C	**1.2859	1.0000	-0.0942	0.0014	0.0089	0.0057	0.0032	0.6375
D	**0.9798	1.0000	-0.1767	0.0008	0.0312	0.0031	0.0281	0.0999

* Caso Base.

** Valores na parte inferior da curva PV.

Para análises que levem em conta a parte instável de curva PV os índices baseados na subtração ($b^2 - 4ac$), como é o caso de lpq , apresentam maiores vantagens do que aqueles baseados numa relação ($4ac/b^2$), como é o caso de $lpq1$, lp , L_{SR} ou $L_{l_{SR}}$.

Capítulo 5

Determinação automática do parâmetro da continuação

5.1 Introdução

Nos capítulos anteriores foi visto que uma mudança no parâmetro, a qual implica em alterações na matriz Jacobiana modificada, mostra resultados diferentes na hora de se obter a curva PV. Isto é, para a mesma curva PV o último valor atingido de λ (fator de carregamento) é diferente. Além disso, nos casos em que não é possível traçar toda a curva PV, pode-se ter singularidade na matriz Jacobiana modificada antes ou depois do PMC. Assim, por exemplo, utilizando λ como parâmetro só é possível chegar até próximo do PMC; no entanto, às vezes, utilizando a tensão de uma barra como parâmetro consegue-se traçar a curva PV além do PMC. Para algumas tensões obtêm-se melhores resultados do que para outras. A escolha do parâmetro de qual barra ou ramo será usado é um dos objetivos deste trabalho.

5.2 Determinação inicial do parâmetro

Como foi descrito no capítulo do método da continuação, a parametrização utilizando variáveis de claro significado físico oferece vantagens para os engenheiros. Segundo o mencionado na seção 3.4, neste trabalho escolheu-se utilizar como parâmetro da continuação as perdas de potência ativa nos ramos, devido ao fato de esta variável ter um comportamento crescente ao longo da curva PV.

5.3 Algoritmo proposto

Como o algoritmo a ser proposto deve ser robusto, tomou-se por objetivo escolher parâmetros que possibilitem o traçado da curva PV completa.

Baseados nas análises feitas no método da continuação, na dedução e cálculo dos índices de proximidade ao colapso de tensão e na determinação do critério para a escolha do parâmetro da continuação; apresenta-se em termos gerais o algoritmo proposto para traçar a curva PV (figuras 5.1 e 5.2), utilizando o fluxo de carga da continuação parametrizado pelas perdas de potência ativa em um determinado ramo, o qual é escolhido automaticamente segundo os critérios indicados neste capítulo.

5.4 Critérios para a seleção automática do ramo

Observando na seção 3.5.2.4 que alguns ramos (13, 17, 19 e 20) podem funcionar melhor do que outros quando escolhido como parâmetro da continuação para o traçado da curva PV, é preciso adotar um critério para a escolha automática do ramo.

A idéia inicial era adotar um critério único para a escolha automática do parâmetro. Foi preciso pesquisar e testar vários outros critérios para se obter os resultados esperados. O critério inicial foi o de selecionar o ramo com o maior valor do índice lp , pois na teoria seria o ramo *crítico* com o qual seria possível traçar a curva PV completa. Porém, utilizando este critério não foi possível identificar alguns dos ramos que permitissem traçar a totalidade da curva PV, devido a que segundo a tabela 4.2, para o *caso base* os cinco primeiros ramos são os que têm os maiores valores de lp e com nenhum destes ramos consegue-se traçar a totalidade da curva PV. A seguir são apresentados este e outros critérios implementados para selecionar de maneira automática o ramo cujas perdas serão o parâmetro no método da continuação.

5.4.1 Maior índice lp (mi)

Neste caso escolhe-se o ramo com o maior valor do índice lp para cada ponto da curva PV. Isto é, executa-se o fluxo de carga da continuação com seus passos preditor, corretor e controle de passo, e o índice lp é calculado em cada ponto obtido escolhendo o maior destes. Assim, só é possível traçar até um valor de $\lambda = 1,5521$ na parte inferior da curva. A figura 5.3 mostra claramente este comportamento.

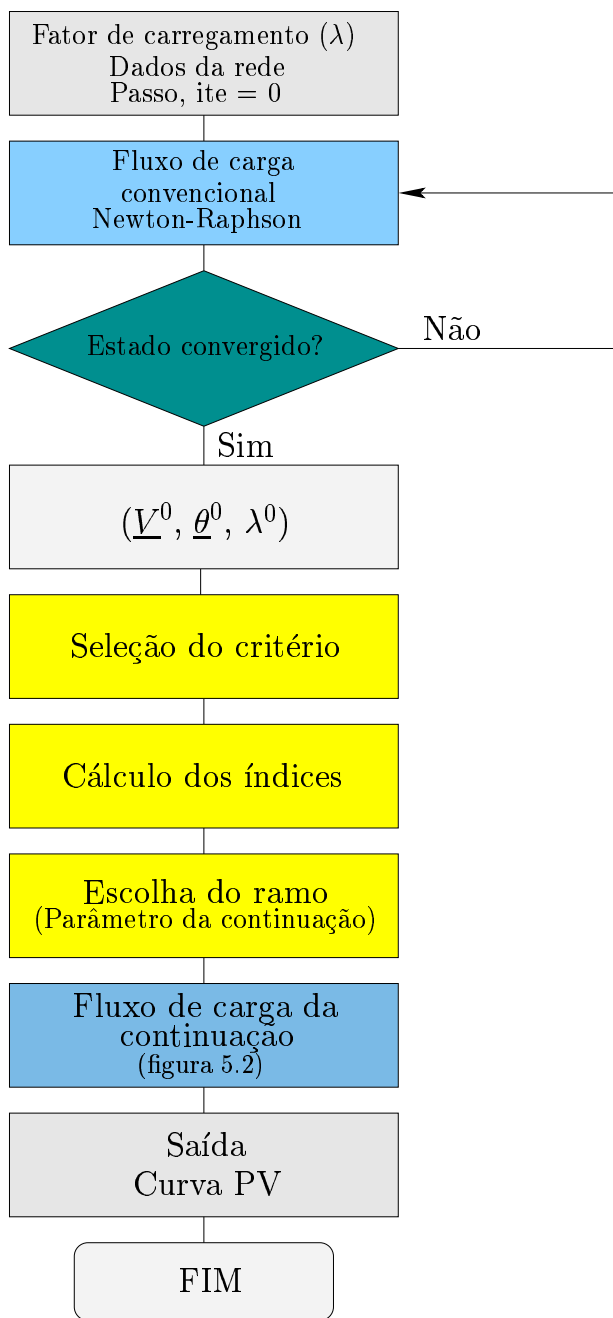


Figura 5.1: Algoritmo para seleção automática do parâmetro da continuação

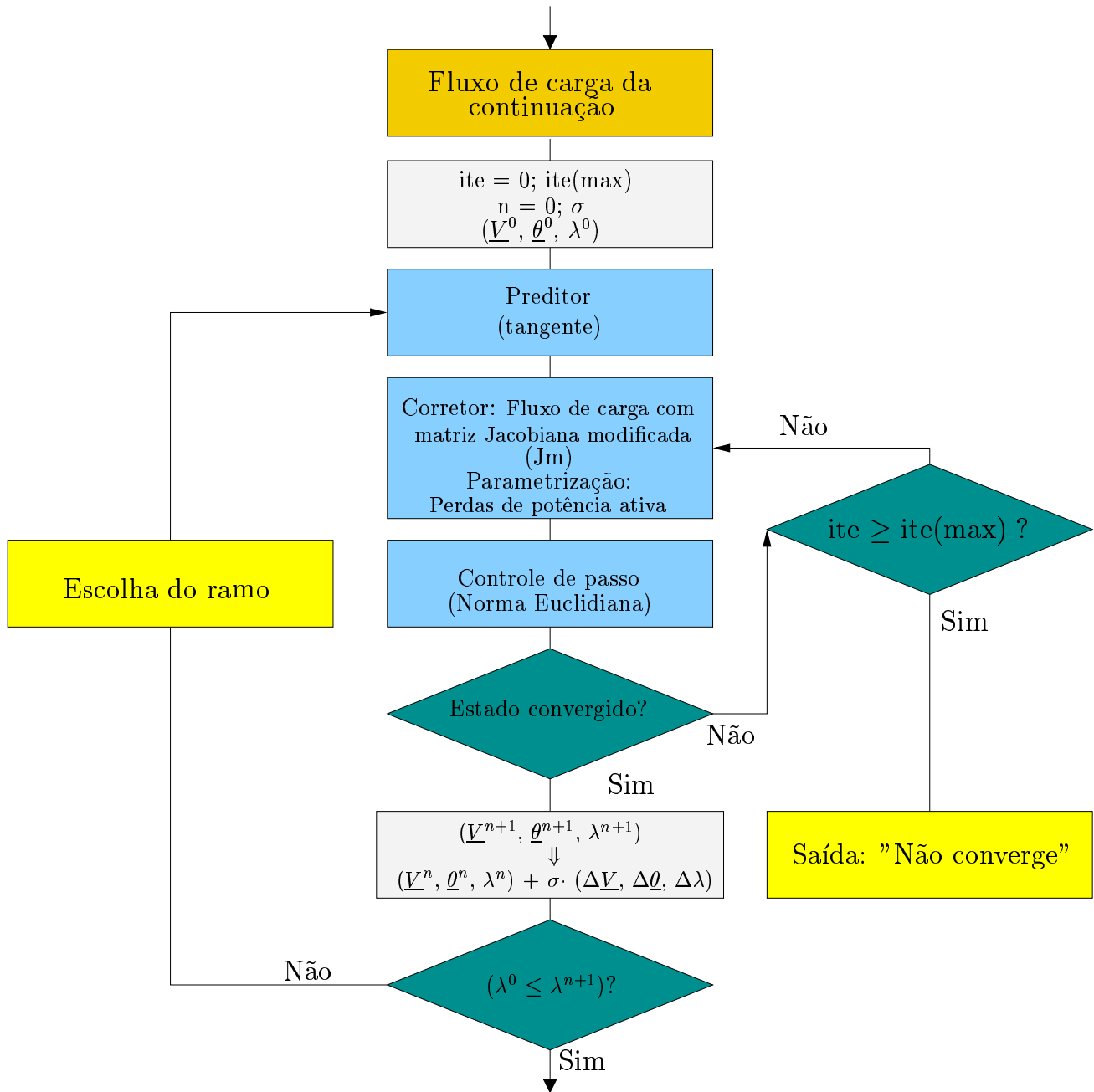


Figura 5.2: Algoritmo do fluxo da continuação com parametrização por perdas

Para o *caso base* o primeiro ramo escolhido é o número 2 (1-5) o que concorda com a tabela 4.2. Logo muda o ramo escolhido conforme o segundo gráfico da figura 5.3. Embora com esse critério consiga-se chegar ao ramo 17 o qual permitiria traçar a totalidade da curva, devido ao comportamento apresentado no gráfico 4.8 escolhe-se um outro ramo que não permite seguir adiante no traçado da curva.

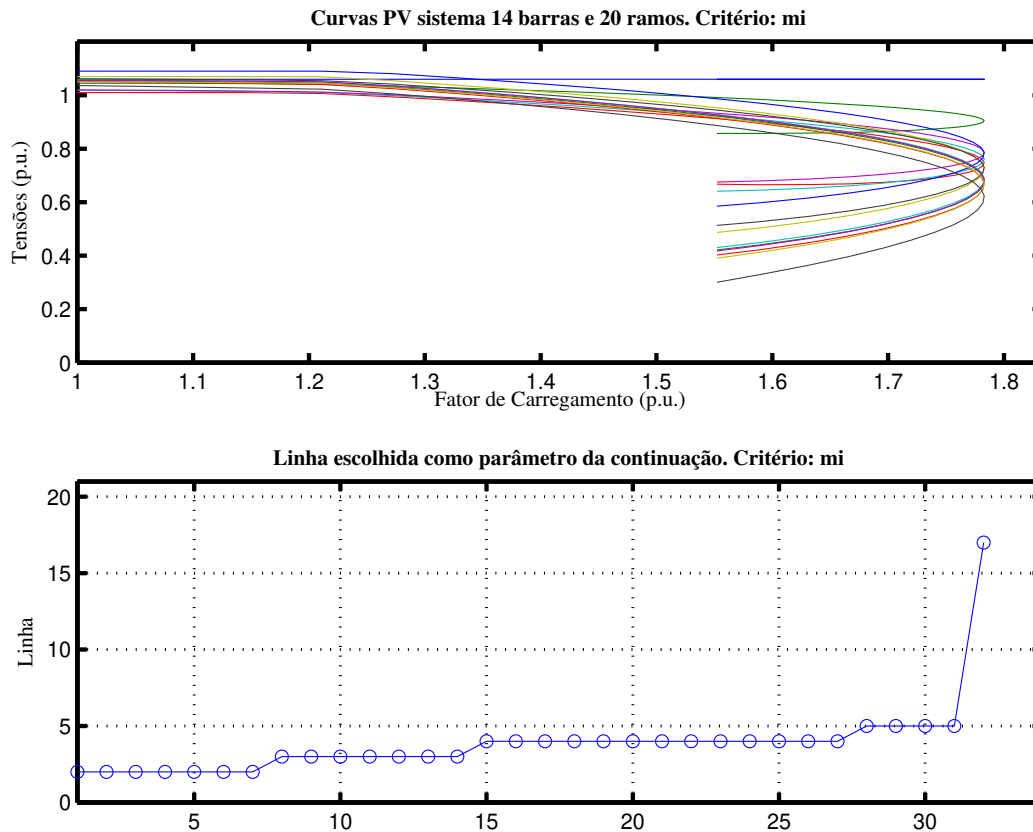


Figura 5.3: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério *mi*.

5.4.2 Barra da menor tensão (*mt*)

Para este critério escolhe-se a barra de menor tensão a qual está associada a um ou mais ramos da primeira vizinhança. Se houver mais de um ramo conectado à barra de menor tensão escolhe-se aquele que tenha o maior valor de perdas de potência ativa. A figura 5.4 mostra que as curvas para todas as barras foram traçadas na sua totalidade para o sistema IEEE de 14 barras utilizando este critério. No gráfico da parte inferior da figura apresenta-se a mudança nos ramos escolhidos como parâmetro da continuação ao longo da curva PV.

5.4 Critérios para a seleção automática do ramo

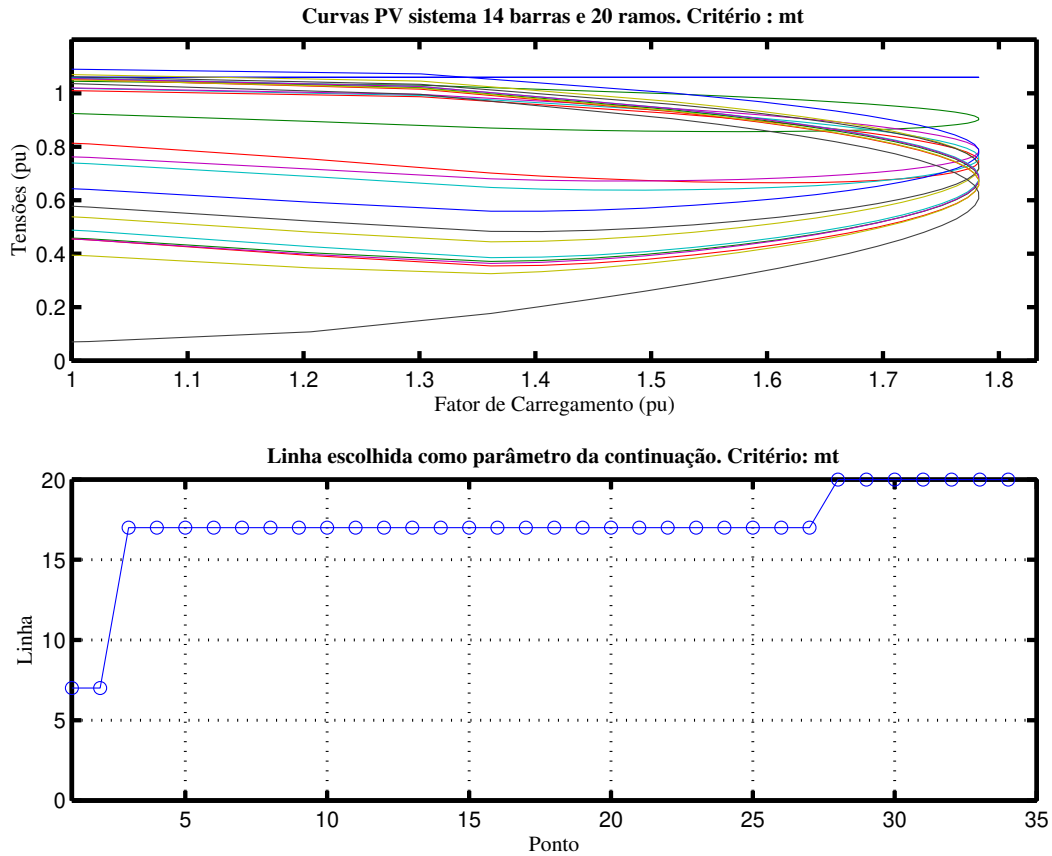


Figura 5.4: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mt .

5.4.3 Maior abertura angular (ma)

Este critério está baseado na seleção do ramo que tenha a maior abertura angular, isto é, a diferença entre os valores do ângulo de tensão das barras conectadas ao ramo. Na figura 5.5 pode-se observar que a curva só pode ser traçada até um valor de λ igual a 1,7323 e que quase não existem mudanças no ramo escolhido.

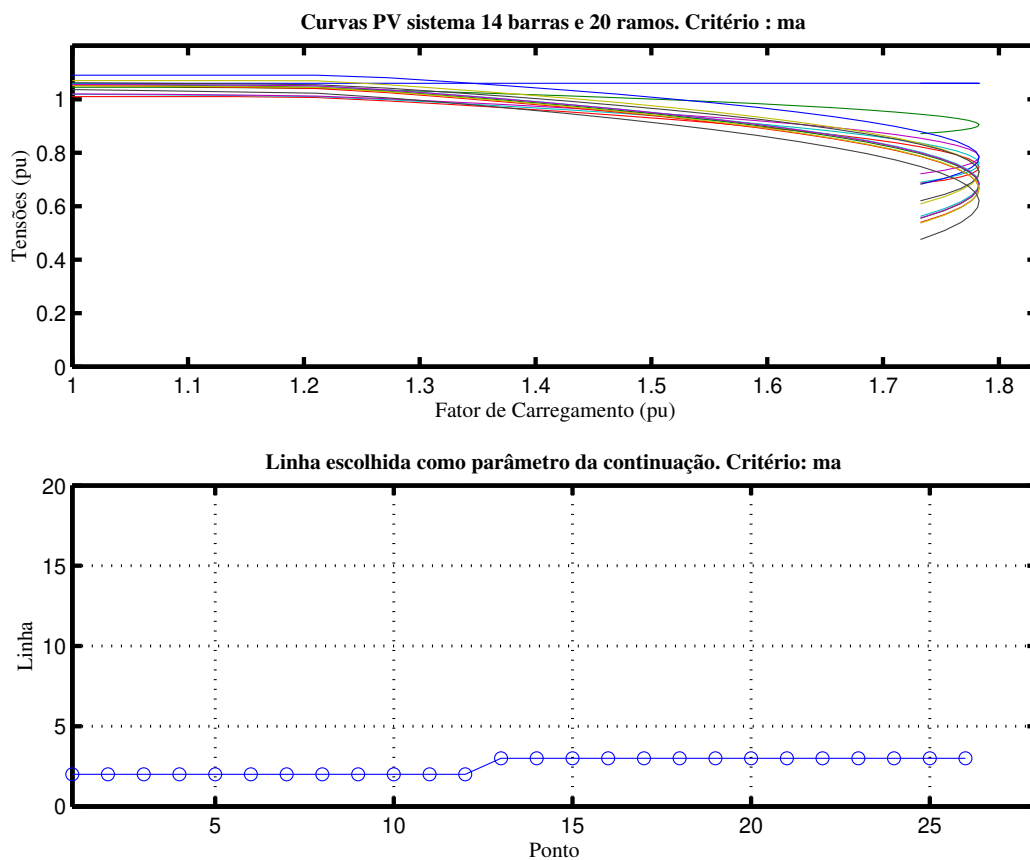


Figura 5.5: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério *ma*.

5.4.4 Maiores perdas ativas (mp)

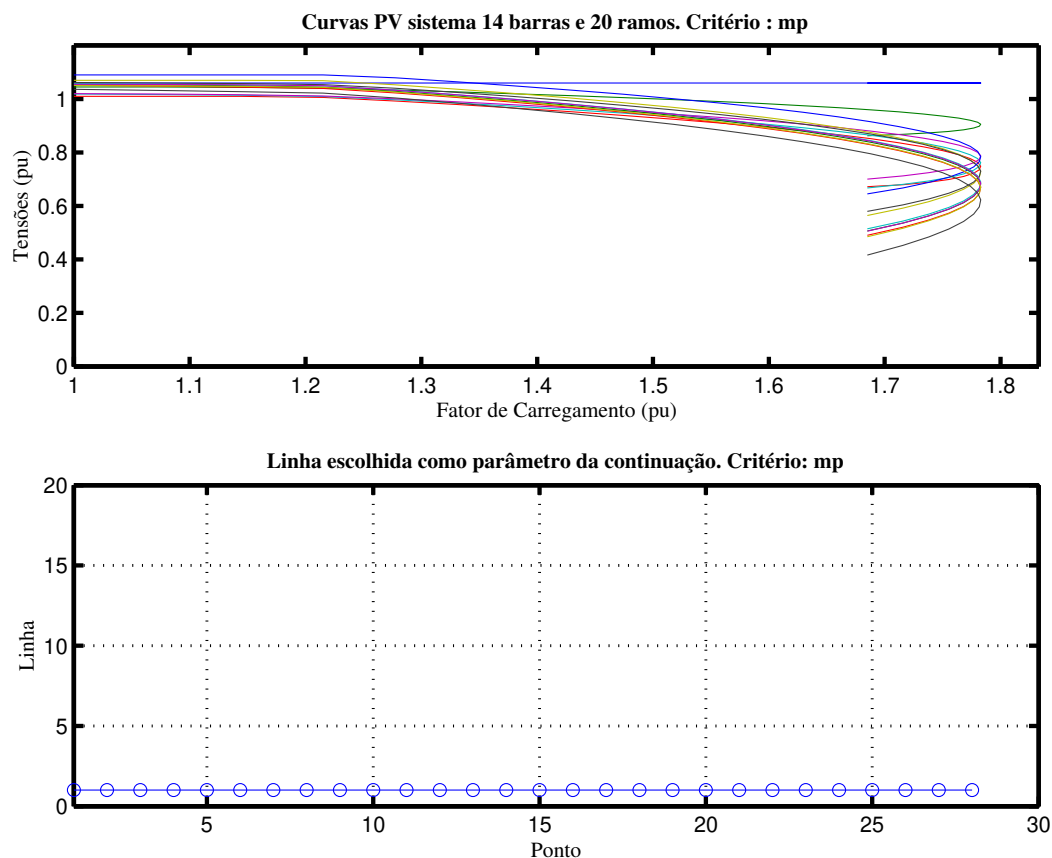


Figura 5.6: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mp .

Este critério considera a seleção do ramo que tenha o maior valor em cada ponto das perdas de potência ativa. Na figura 5.6 pode-se observar que a curva só pode ser traçada até um valor de λ igual a 1,6850 e que não existem mudanças no ramo escolhido. Isto, deve-se ao ramo 1 (1-2) do sistema IEEE de 14 barras ter os maiores valores de perdas de potência ativa conforme à tabela 4.2.

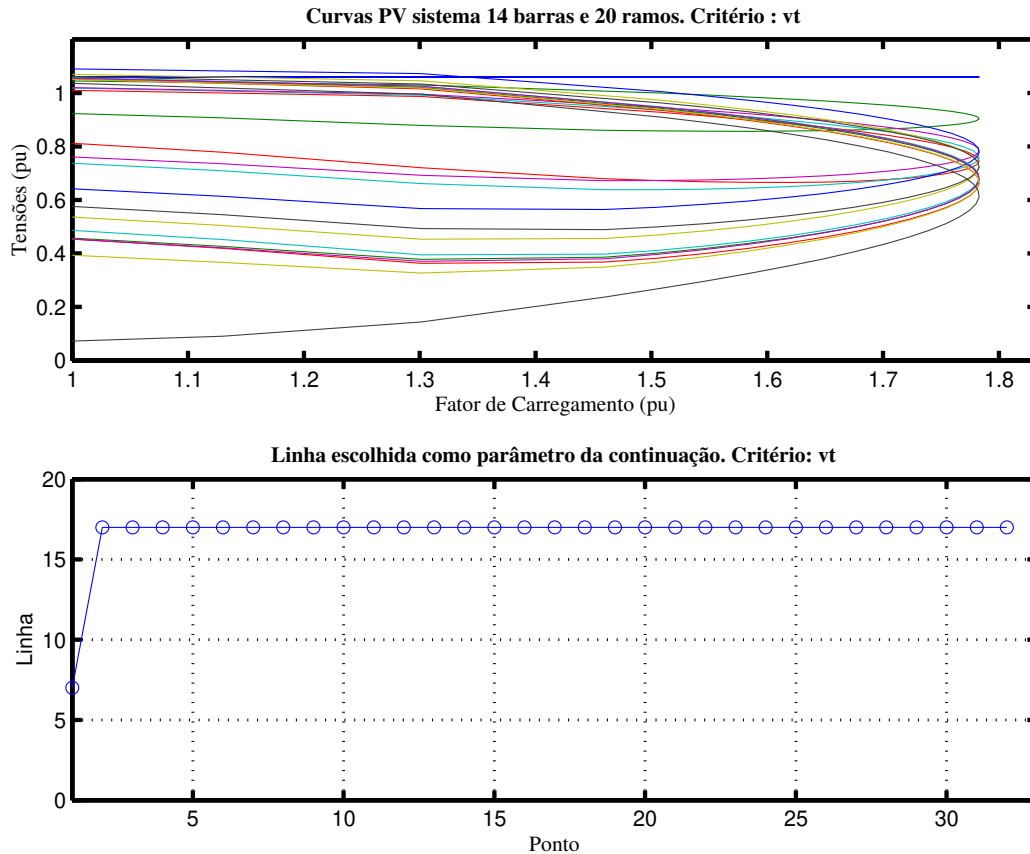
5.4.5 Barra com a maior variação de tensão (vt)

Figura 5.7: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério vt .

A seleção da barra pelo critério vt está baseada na seleção da barra que tenha a maior variação de tensão entre o ponto atual da curva e o ponto anterior. O ramo escolhido como parâmetro deverá estar conectado a esta barra e possuir o maior valor do índice lp . Com este critério é possível traçar a totalidade das curvas PV sem dificuldades numéricas como é mostrado na figura 5.7. Este critério mostra que rapidamente (a partir do segundo ponto) é escolhida a linha 17 como parâmetro da continuação, ou seja, apresenta uma menor variação na escolha do ramo quando comparado com a figura 5.4 (critério mt).

5.4.6 Maior variação do índice (vi)

Baseado no comportamento do índice lp apresentado nas figuras 4.6 e 4.8, surgiu a idéia de analisar a variação dos índices, devido a que para estas figuras e principalmente para 4.8 os ramos 17 e 20, os quais são candidatos para traçar a curva, apresentam fortes variações. A figura 5.8 mostra os bons resultados obtidos utilizando este critério para o sistema IEEE de 14 barras. Nota-se que há uma maior variação de escolha do parâmetro, se comparado com a figura 5.7.

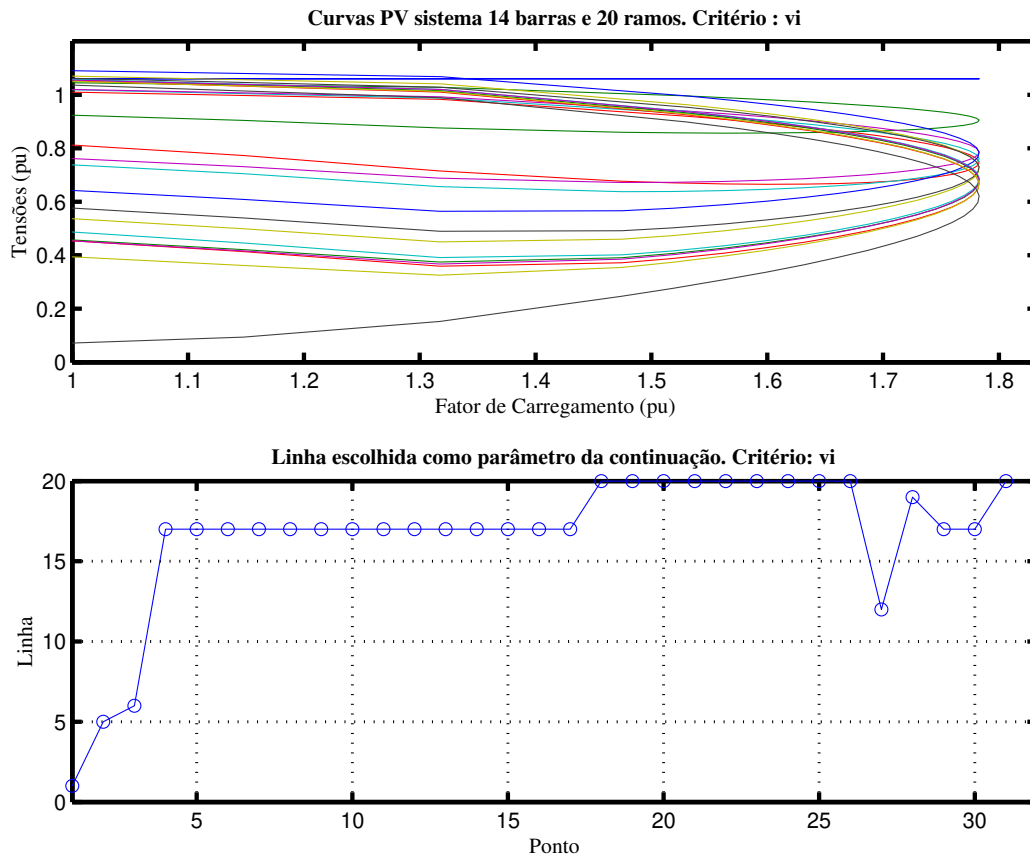


Figura 5.8: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério vi .

5.4.7 Maior variação da abertura angular (va)

Foi testado também o que aconteceria se fosse usado como critério que escolhesse o ramo com a variação da abertura angular, obtendo também bons resultados para este sistema como se pode verificar na figura 5.9.

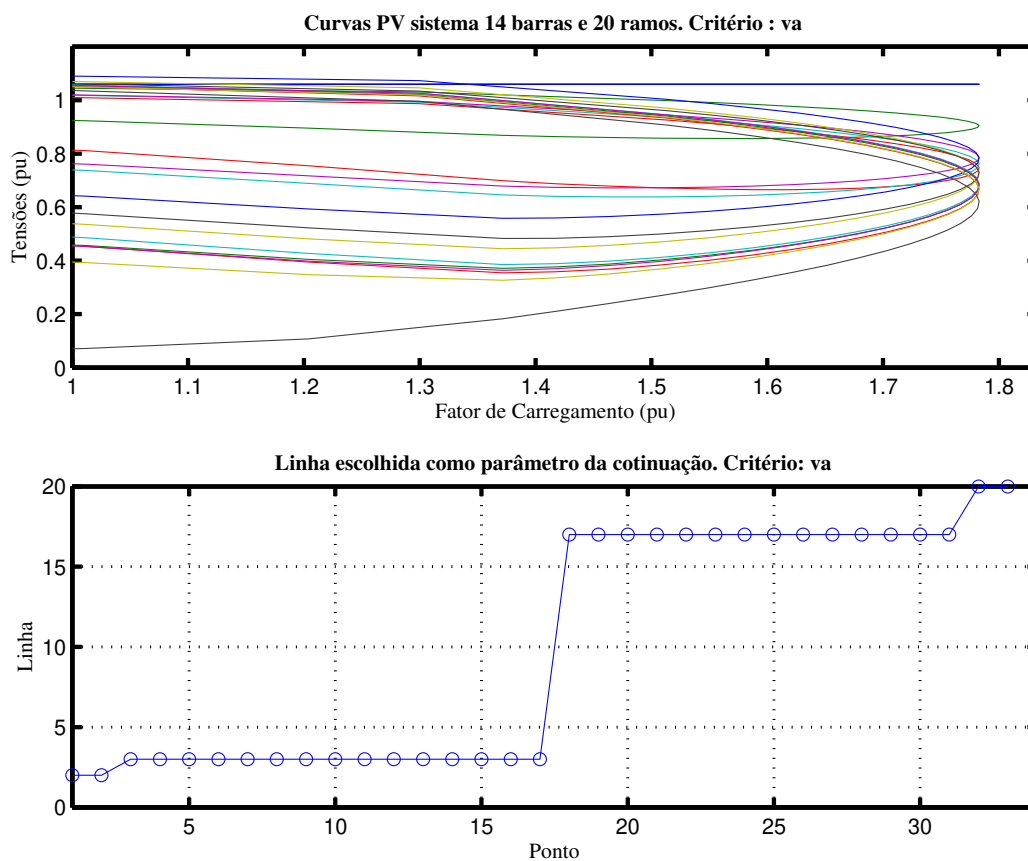


Figura 5.9: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério va .

5.4.8 Maior variação das perdas ativas (vp)

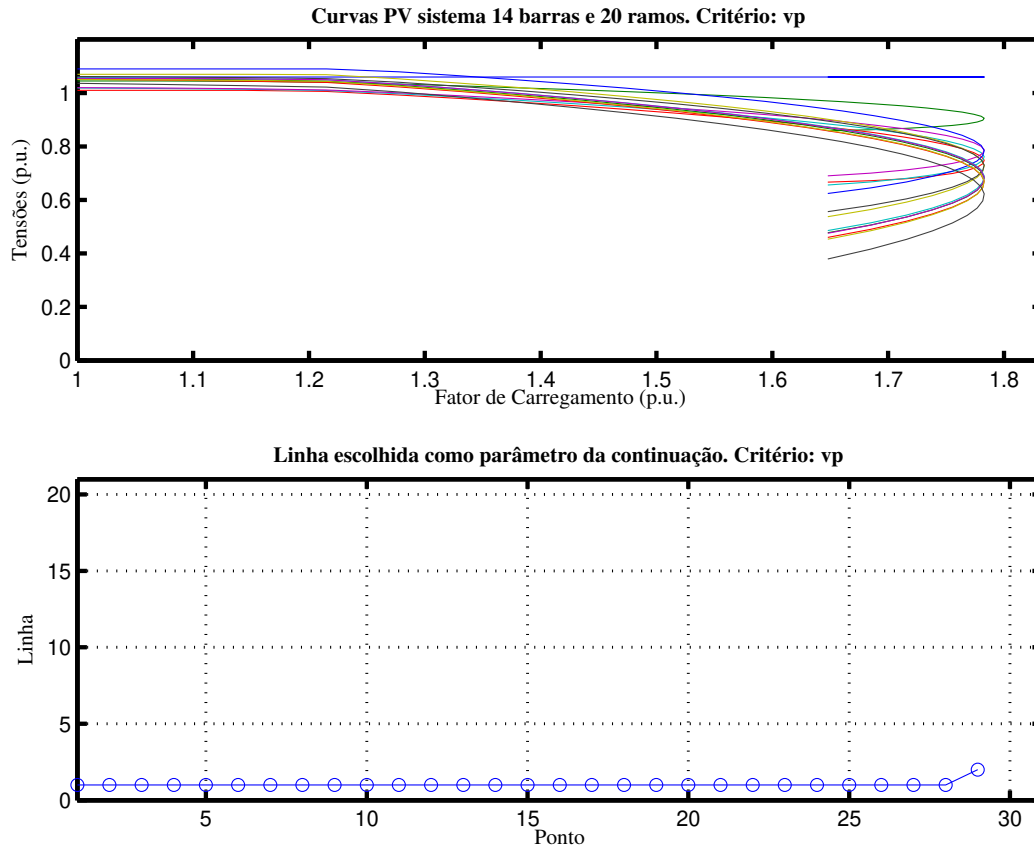


Figura 5.10: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério vp .

Para o critério de escolha baseado na variação das perdas de potência ativa entre o ponto atual e o ponto anterior, não se conseguiu traçar com sucesso toda a curva PV como se ilustra na figura 5.10 ($\lambda = 1,6479$).

5.4.9 Outros critérios utilizados

Além dos critérios mencionados anteriormente, foram testados mais alguns utilizando convenientemente os índices L_{SR} e lpq . A seguir, a relação destes critérios, os quais escolhem o ramo que apresente:

- mm : Maior índice de transferência de potência ativa L_{SR} .
- ml : Maior índice de perdas de potência ativa $L_{l_{SR}}$.

- mq : Menor índice lpq ($b^2 - 4ac$).
- qm : Maior índice $lpq1$ ($4ac/b^2$).
- im : Menor índice lp ($b^2 - 4ac$).
- vm : Maior variação do índice de transferência de potência ativa L_{SR} .
- vl : Maior variação do índice de perdas de potência ativa $L_{l_{SR}}$.
- vq : Maior variação do índice lpq .
- $mtlpq$: Barra de menor tensão com o menor índice lpq .
- $vtlpq$: Barra de maior variação de tensão com o menor índice lpq .

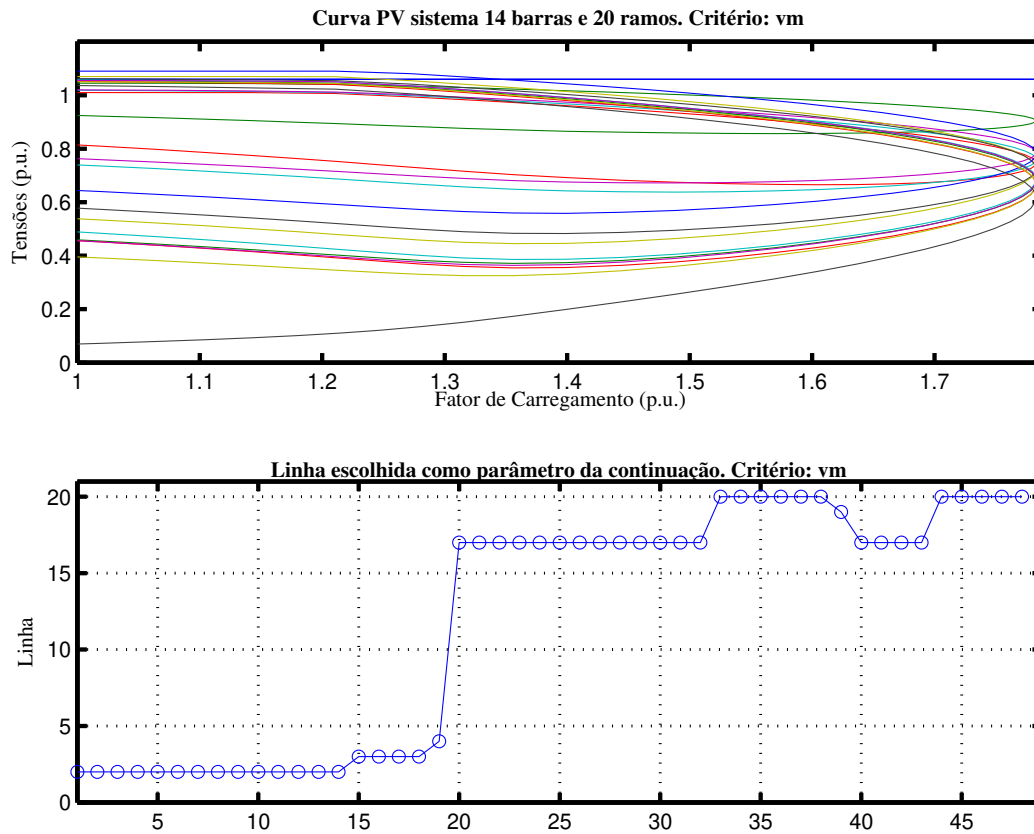


Figura 5.11: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério vm .

5.4 Critérios para a seleção automática do ramo

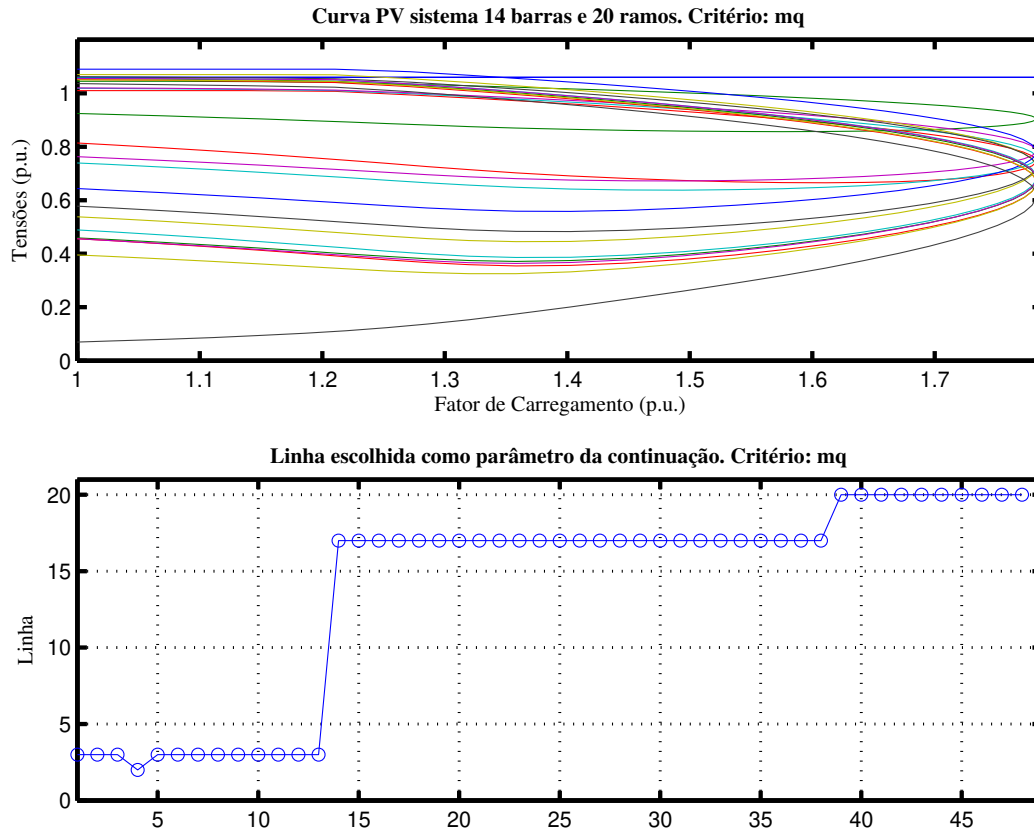


Figura 5.12: Curvas PV para o sistema de 14 barras utilizando o critério mq .

Vários critérios conseguem traçar a totalidade da curva para o sistema de 14 barras. Porém, devido à quantidade de testes realizados, nas figuras 5.11 e 5.12 são mostrados somente os resultados de dois critérios, vm e mq , os quais tiveram sucesso no traçado da curva PV. Por outro lado, outros critérios não apresentaram bons resultados. No capítulo seguinte são relacionados estes critérios aplicados a vários sistemas, analisando suas vantagens e desvantagens.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Introdução

Este capítulo explora os critérios anteriormente mencionados apresentando os resultados de alguns deles não só no sistema *IEEE* de 14 barras, testado no capítulo anterior, mas também para sistemas maiores de 30, 57, 118, e 300 barras disponíveis também na referência [28]. Levaram-se em consideração os limites de potência reativa em barras PV, e foram obtidos bons resultados em alguns critérios tais como, menor tensão, maior variação de tensão e maior índice.

Na apresentação dos resultados foram escolhidas duas barras de maneira aleatória com o propósito de analisar os comportamentos das curvas PV, as quais não são iguais em todas as barras do sistema.

Tentando explorar a robustez de cada critério foram escolhidos sistemas ainda com pouca margem de carregamento como é o caso do sistema de 300 barras, mesmo utilizando uma tolerância pequena ($10^{-4}p.u.$ ou $0,01MVA$). Além disso, as figuras apresentadas tem três gráficos cada; o primeiro com as curvas PV, o segundo mostrando qual foi o ramo escolhido como parâmetro da continuação e o terceiro com o número de iterações para cada ponto convergido.

Adicionalmente, o fluxo de carga da continuação parametrizado por perdas de potência ativa nos ramos foi testado para mais dois sistemas reais e com um maior número de barras. O sistema Norte-Nordeste Brasileiro de 398 barras e 552 ramos e parte do sistema Sudoeste dos Estados Unidos de 904 barras e 1283 ramos.

Para cada sistema testado são apresentados dois critérios, alguns deles com bons resultados e outros não. Embora a quantidade de simulações feitas permita indicar só algumas figuras, no final do capítulo é apresentada uma tabela resumindo o sucesso ou não de cada critério para cada sistema testado.

Por último, são apresentadas algumas comparações entre o fluxo de carga da continuação parametrizado por perdas e parametrizado por tensão o qual é encontrado comumente na literatura, avaliando as vantagens do método proposto.

6.2 Sistema de 14 barras 20 ramos

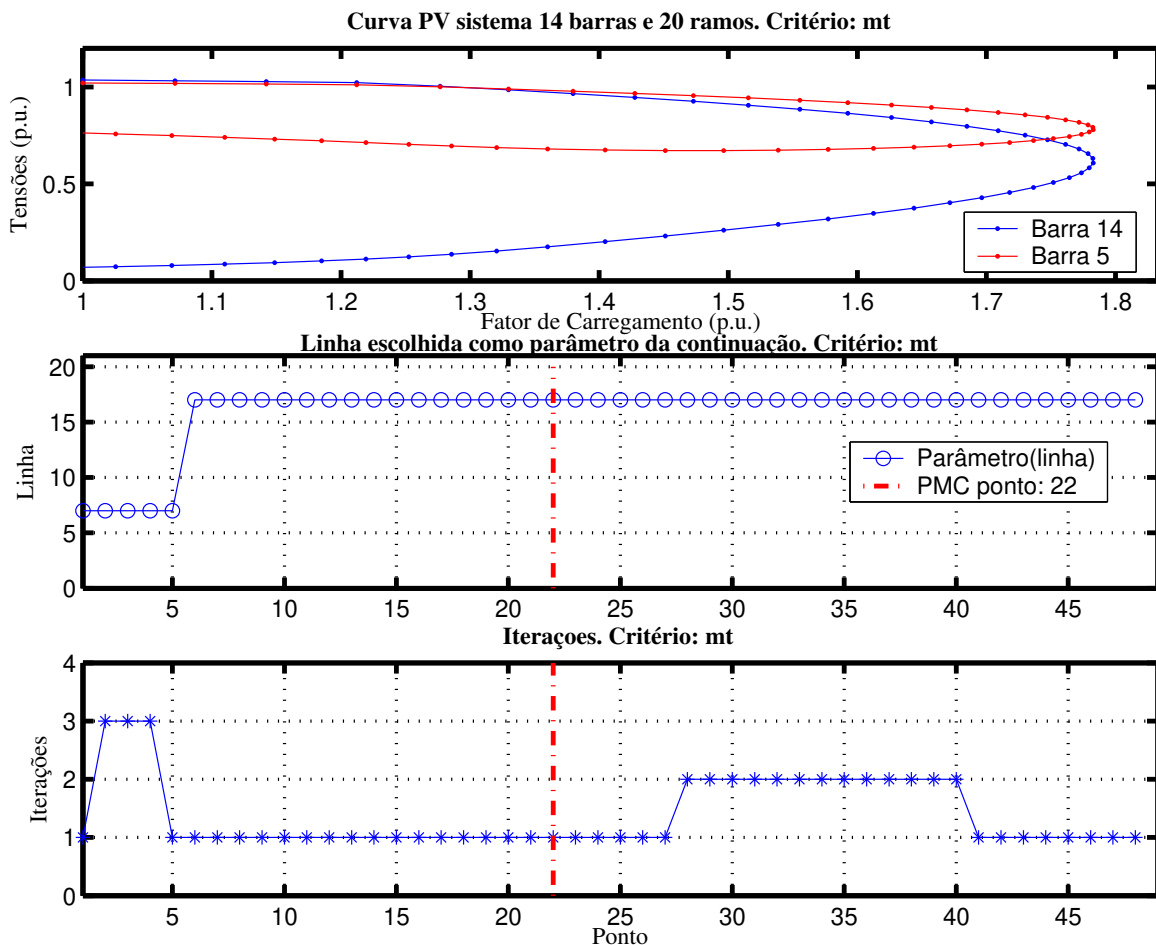


Figura 6.1: Resultados sistema de 14 barras utilizando o critério *mt*.

Da figura 6.1 verifica-se a totalidade no traçado das curvas PV para as barras 5 e 14, esta última com uma maior distância entre as tensões da parte estável e instável da curva. Além do PMC o ramo escolhido como parâmetro mantém-se fixo, independentemente do cálculo do critério tentando obter algumas vantagens em termos de esforço computacional.

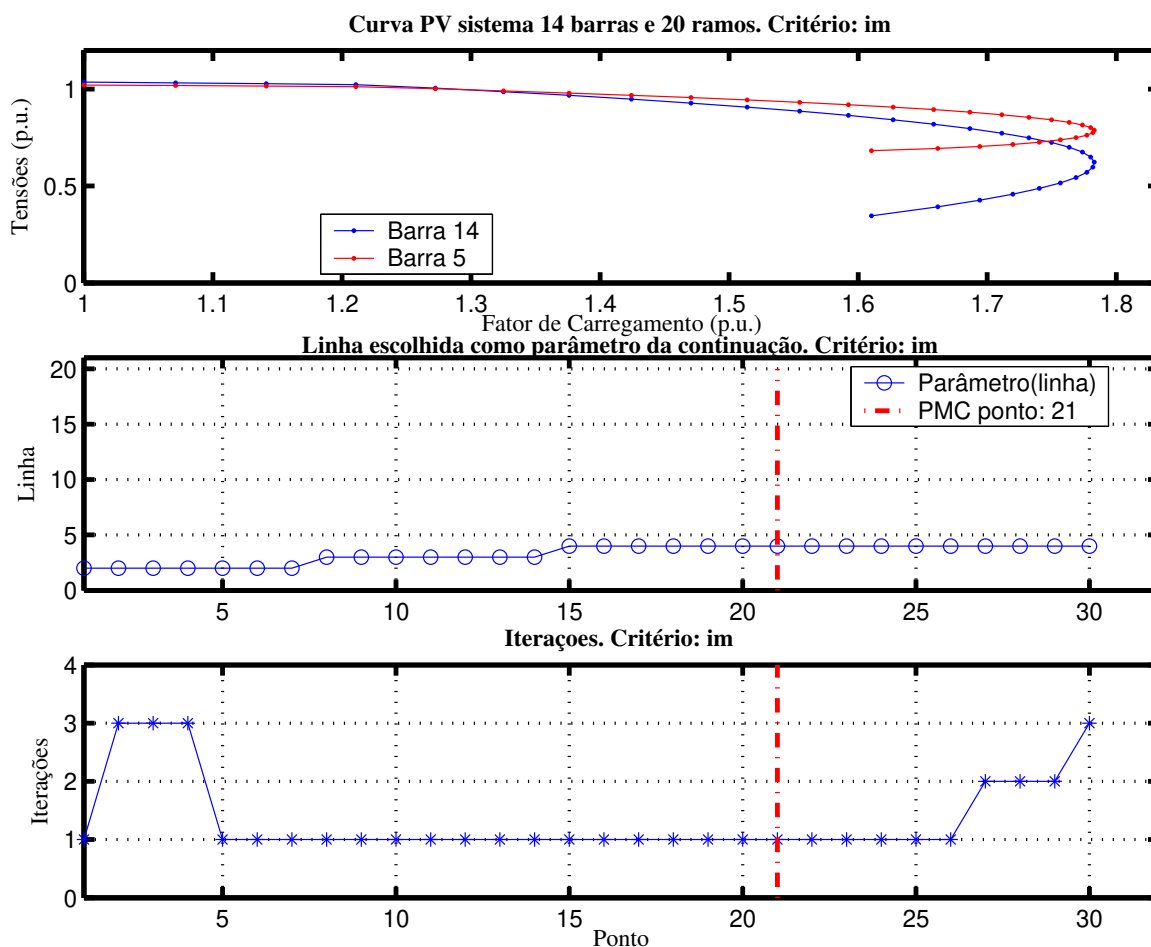


Figura 6.2: Resultados sistema de 14 barras utilizando o critério *im*.

Na figura 6.2 são apresentadas as curvas PV para as mesmas barras (14 e 5) da figura 6.1. Porém, com este critério, menor índice lp ($b^2 - 4ac \leq 0$) não foi possível traçar a curva PV completa, pois o critério escolhe sempre os índices dos ramos 2,3 ou 4 os quais não são bons candidatos para o traçado da curva PV.

6.3 Sistema de 30 barras 41 ramos

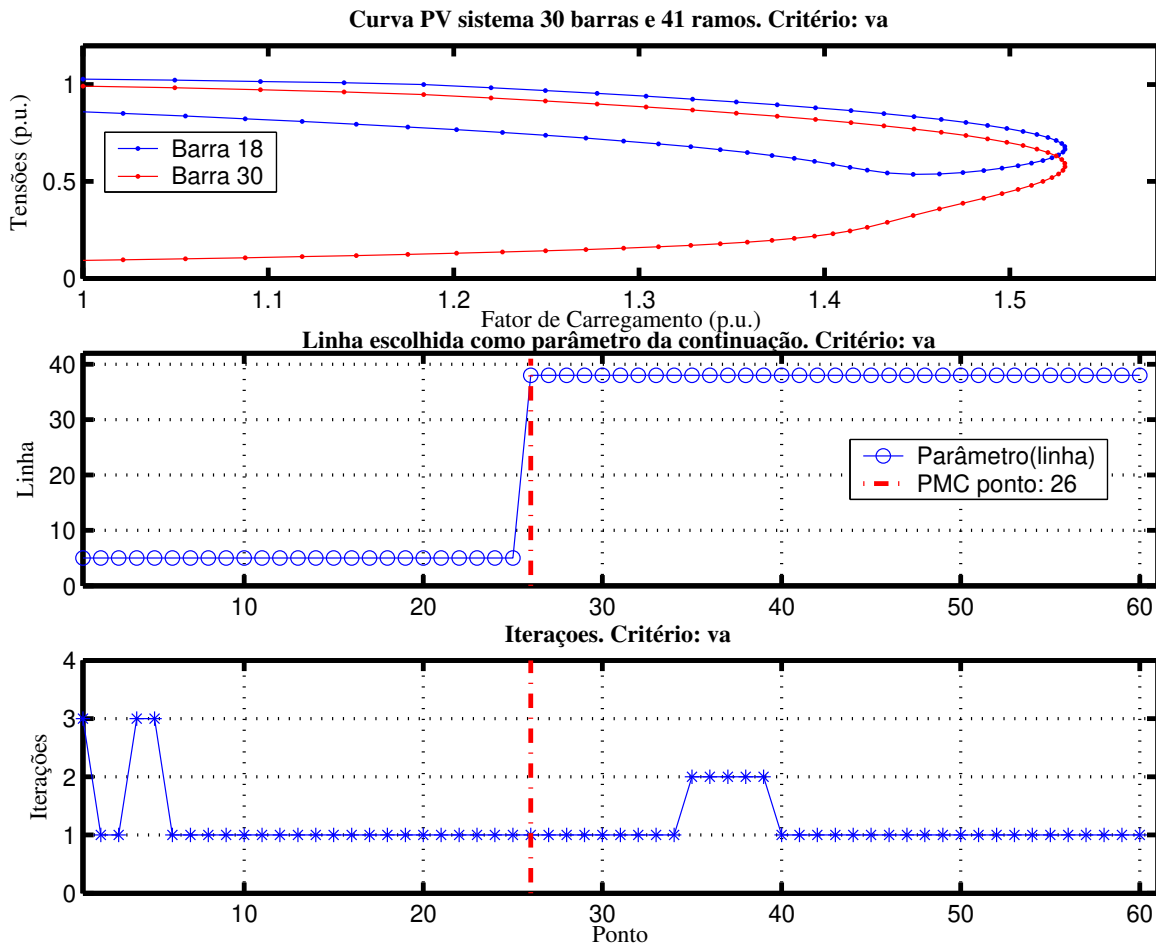


Figura 6.3: Resultados sistema de 30 barras utilizando o critério *va*.

Para o sistema de 30 barras, cujo diagrama unifilar aparece no apêndice A.3, a figura 6.3 mostra a utilização do critério que escolhe o ramo que apresente uma maior variação na abertura angular entre os ângulos das tensões nas barras conectadas pelo ramo. Com este critério também são obtidos bons resultados, como indicam as curvas das barras 18 e 30, as quais têm comportamentos bem diferentes. Isto comprova a robustez do método.

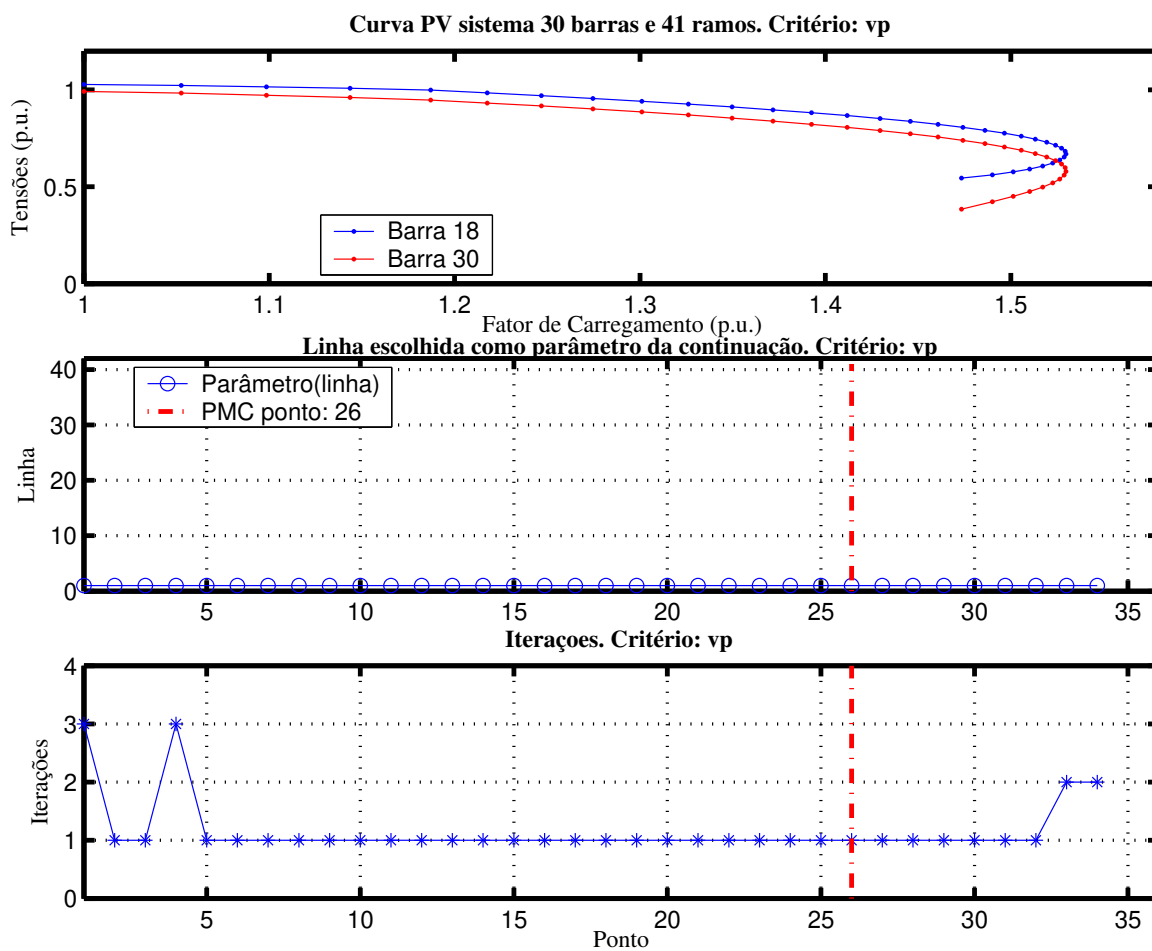


Figura 6.4: Resultados sistema de 30 barras utilizando o critério *vp*.

O critério de variação de perdas de potência ativa foi implementado para a rede de 30 barras e 41 ramos sem sucesso, conforme mostrado na figura 6.4.

6.4 Sistema de 57 barras 80 ramos

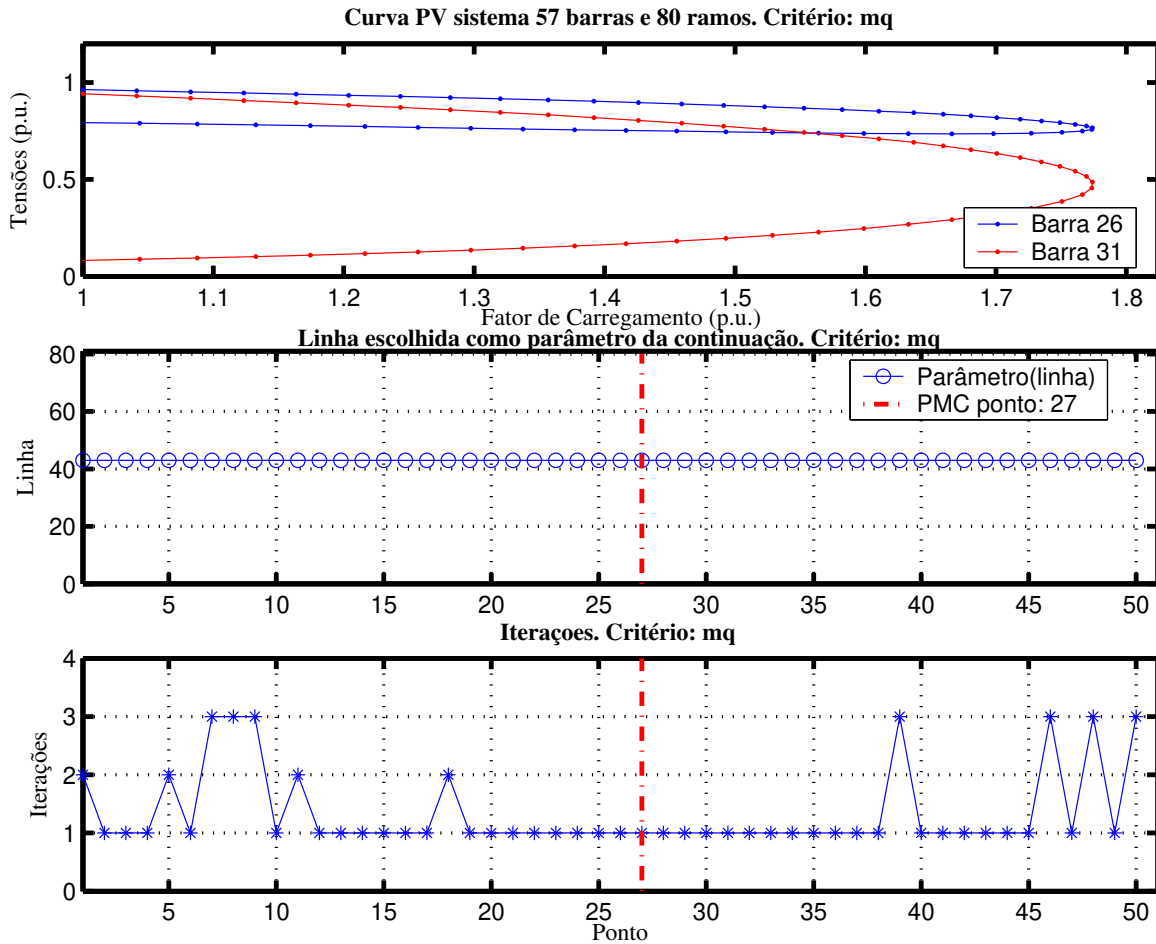


Figura 6.5: Resultados sistema de 57 barras utilizando o critério mq .

Neste caso foi testado o critério que escolhe o ramo que tenha o menor índice lpq para o sistema de 57 barras e 80 ramos (figura 6.5). É importante apontar que não existe variação do ramo escolhido, o que representa um menor esforço computacional e com um número de iterações relativamente pequeno.

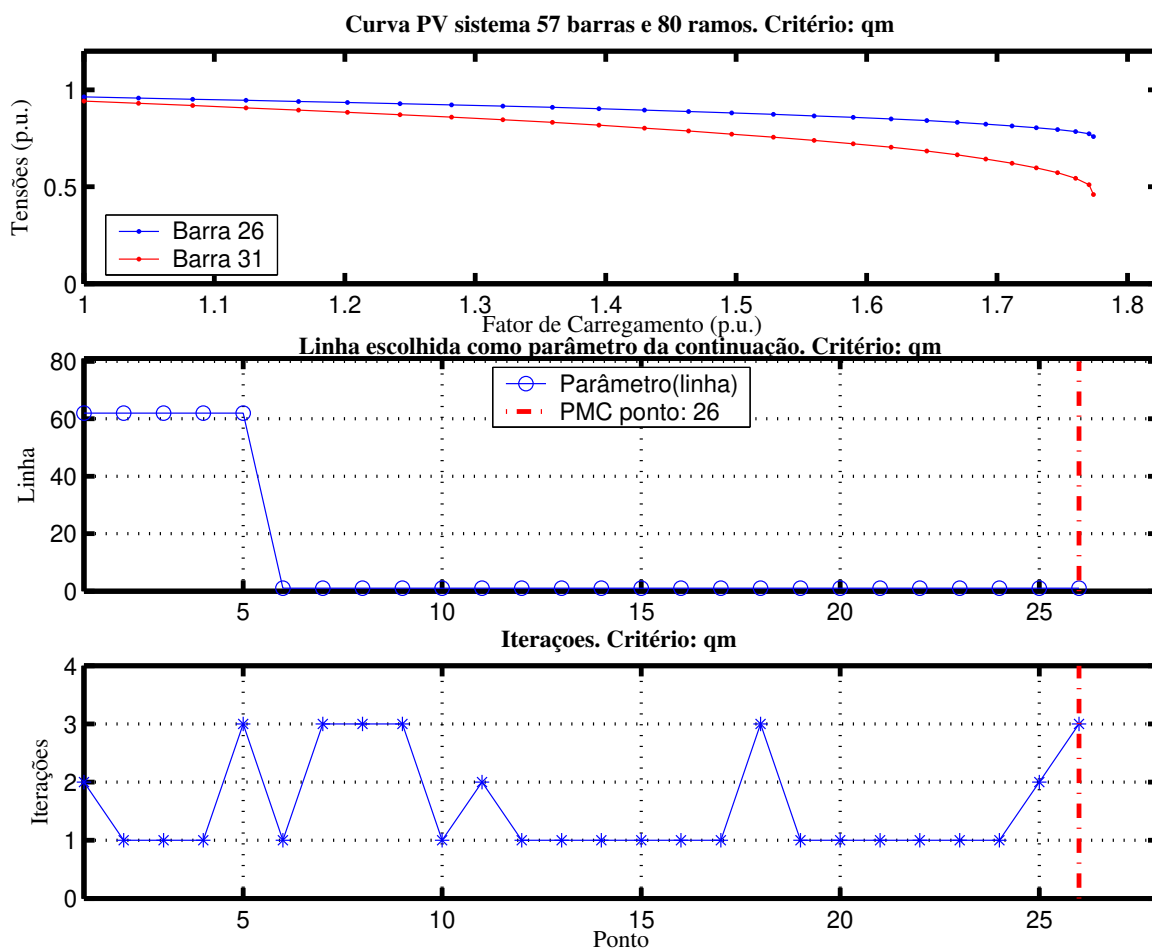


Figura 6.6: Resultados sistema de 57 barras utilizando o critério qm .

A utilização do maior índice lpq como critério para a escolha automática do parâmetro da continuação não teve sucesso para o sistema de 57 barras e 80 ramos apresentado na figura 6.6, mesmo que apresente poucas iterações em cada ponto convergido.

6.5 Sistema de 118 barras 186 ramos

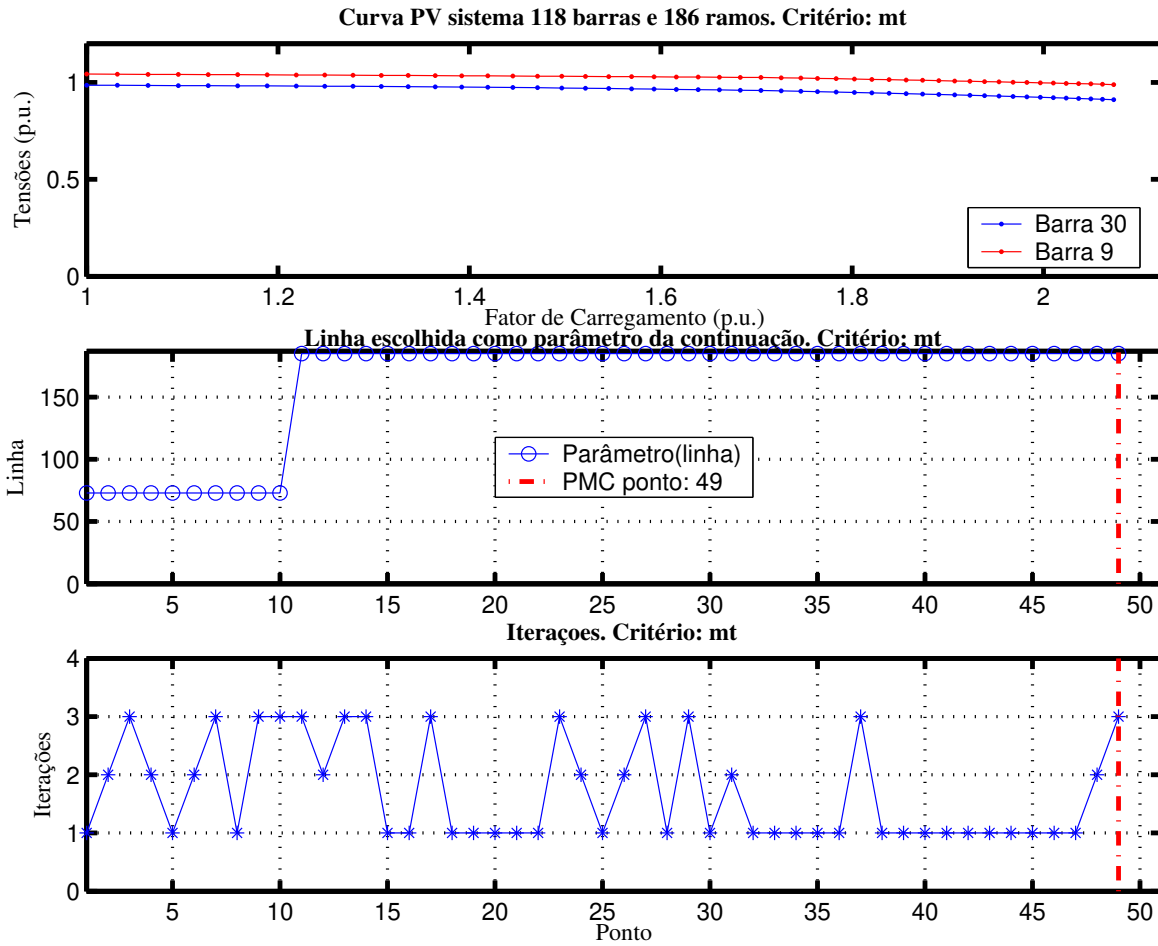


Figura 6.7: Resultados sistema de 118 barras utilizando o critério *mt*.

O sistema de 118 barras apresenta características muito importantes, por exemplo, dos critérios testados, a maioria não teve sucesso. Na figura 6.7 é escolhido o ramo com maior variação de perdas ativas associado à barra de menor tensão.

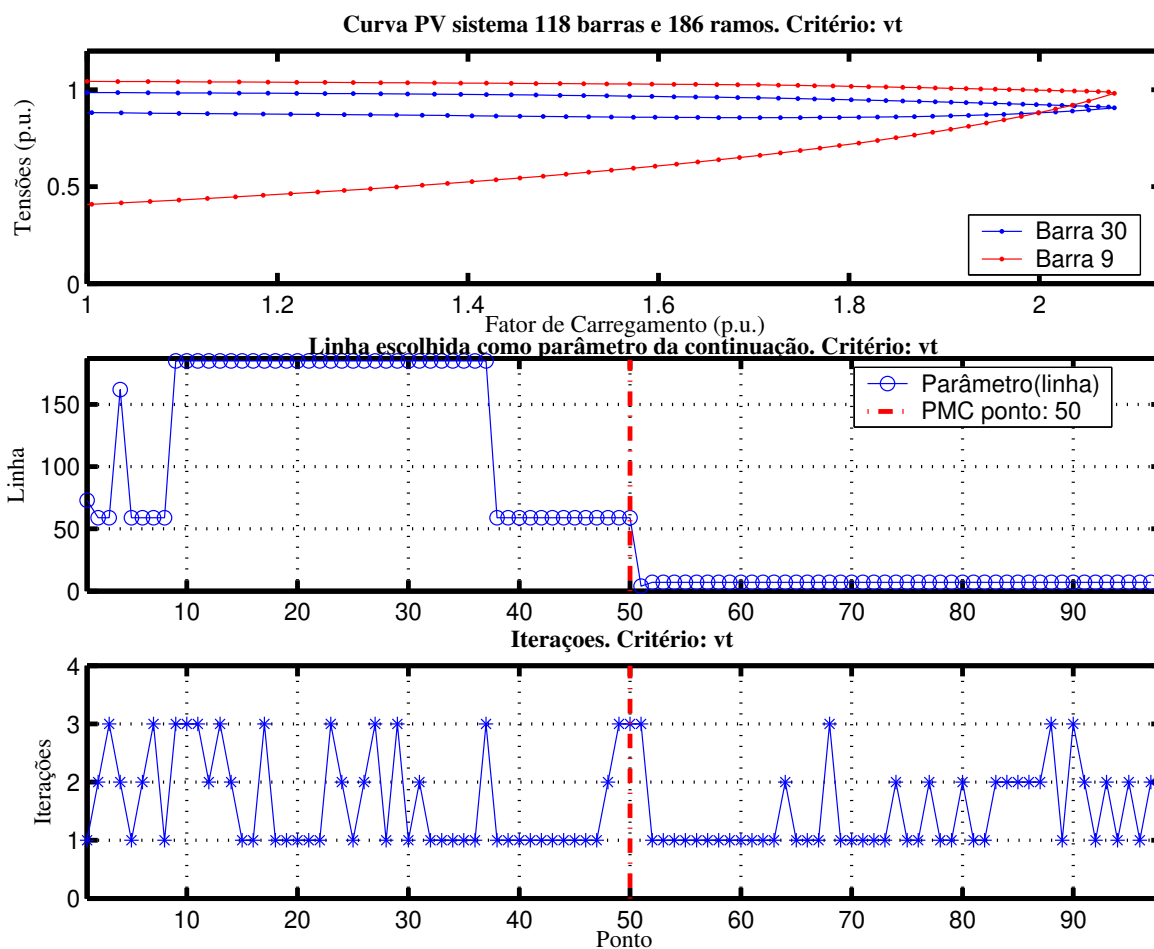


Figura 6.8: Resultados sistema de 118 barras utilizando o critério vt .

Escolhendo a barra com maior variação de tensão associando-a ao ramo com maior índice lp , conseguiu-se traçar a totalidade da curva PV. A figura 6.8 mostra estes resultados, observando que o sistema de 118 barras mesmo tendo uma margem de carregamento razoável apresenta dificuldades para escolher a melhor barra e o ramo como parâmetro da continuação. Finalmente o ramo escolhido foi o 7, cuja barra de menor tensão (9) só é escolhida logo após do PMC como se indica na figura. No apêndice A.4 aparece o diagrama unifilar da parte principal do sistema de 118 barras.

6.6 Sistema de 300 barras 411 ramos

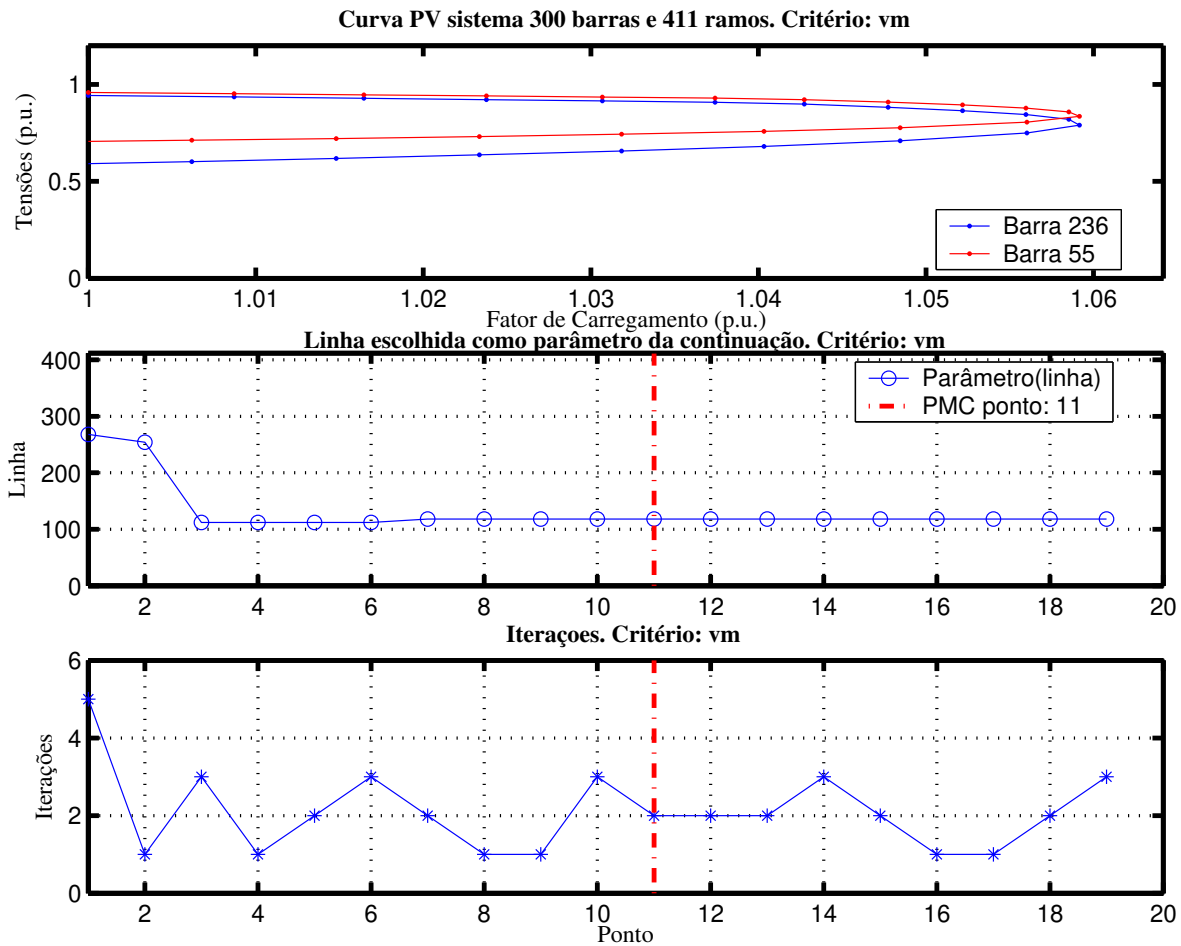


Figura 6.9: Resultados sistema de 300 barras utilizando o critério *vm*.

No sistema de 300 barras escolheu-se o ramo com a maior variação do índice L_{SR} não só com sucesso, mas também com boa performance na mudança do parâmetro e no número de iterações. O método mostra-se robusto mesmo quando utilizado em sistemas com margem de carregamento pequena, como neste caso, de aproximadamente 6%.

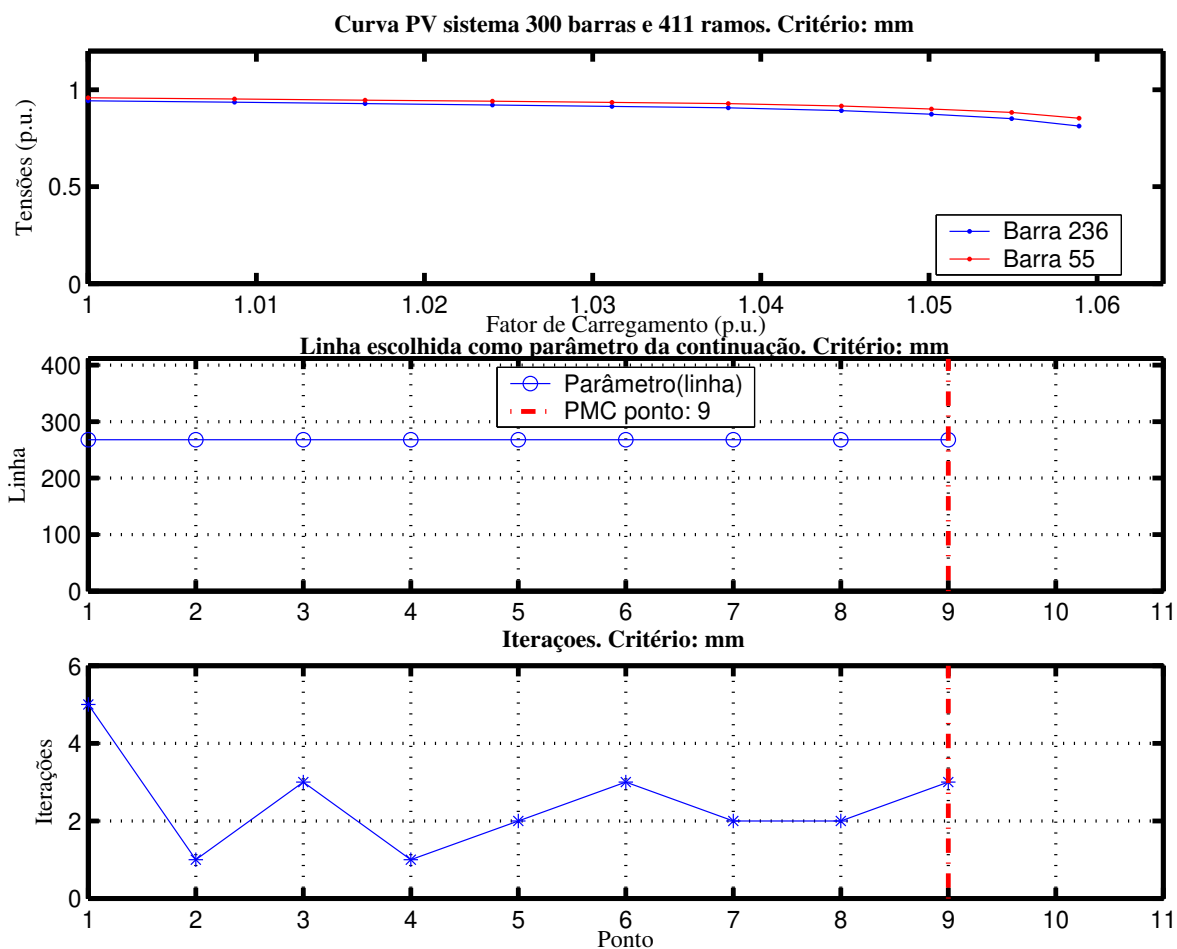


Figura 6.10: Resultados sistema de 300 barras utilizando o critério mm .

O critério de maior índice L_{SR} para os sistema de 300 barras e 411 ramos não foi bem sucedido para traçar a curva PV como é apresentado na figura 6.10.

6.7 Sistema Norte-Nordeste Brasileiro

Para avaliar o comportamento do fluxo de carga da continuação utilizando a parame-trização por perdas ativas nas linhas, utilizou-se também o sistema Norte-Nordeste do Brasil de 389 barras e 552 ramos. Além disso, tomou-se os dados deste sistema para a situação de carga pesada. Isto é, a potência gerada pelo sistema no horário de ponta, que tipicamente no Brasil seria entre as 17 e as 20 horas em um dia útil.

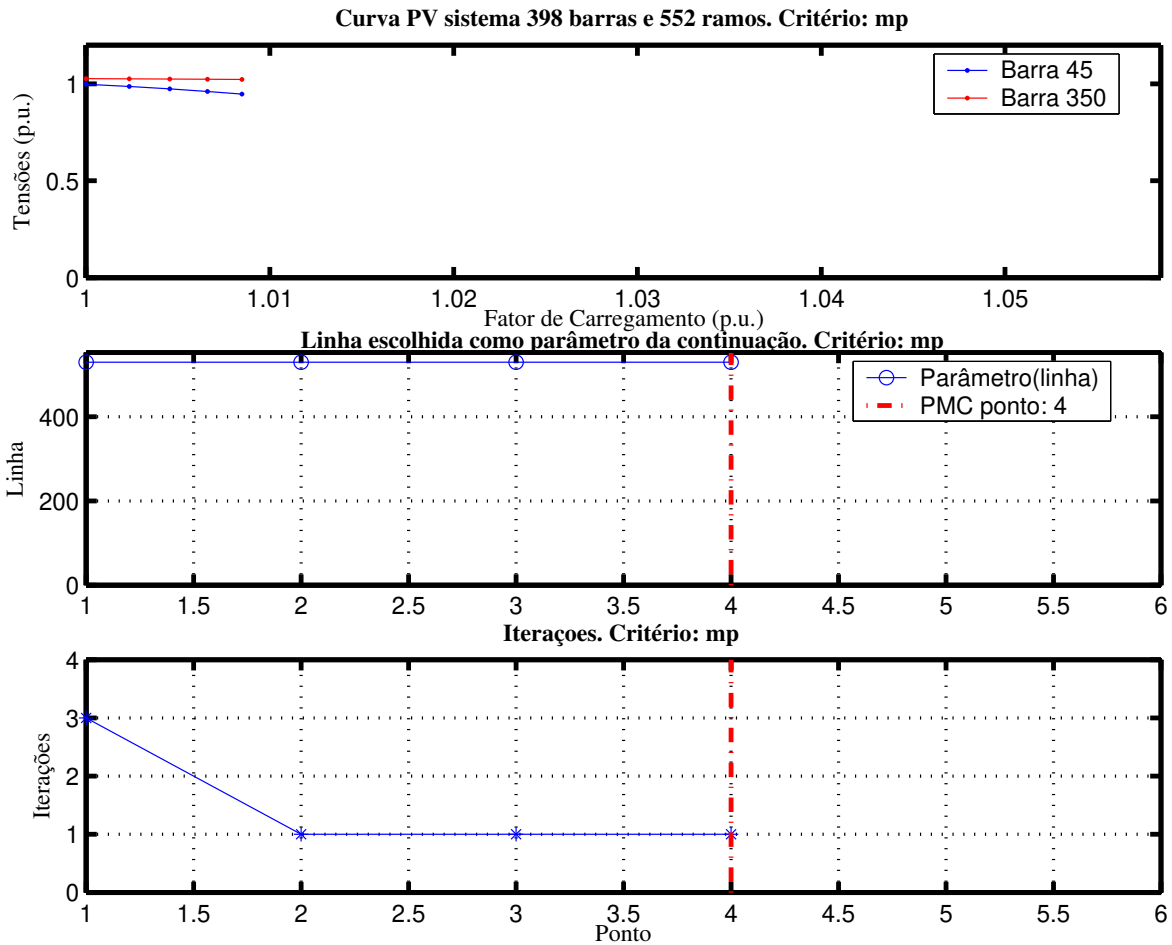


Figura 6.11: Resultados sistema Norte-Nordeste Brasileiro utilizando o critério *mp*.

O critério utilizado na figura 6.11 o qual escolhe a linha que tenha as maiores perdas de potência ativa, foi inadequado para traçar a totalidade da curva PV.

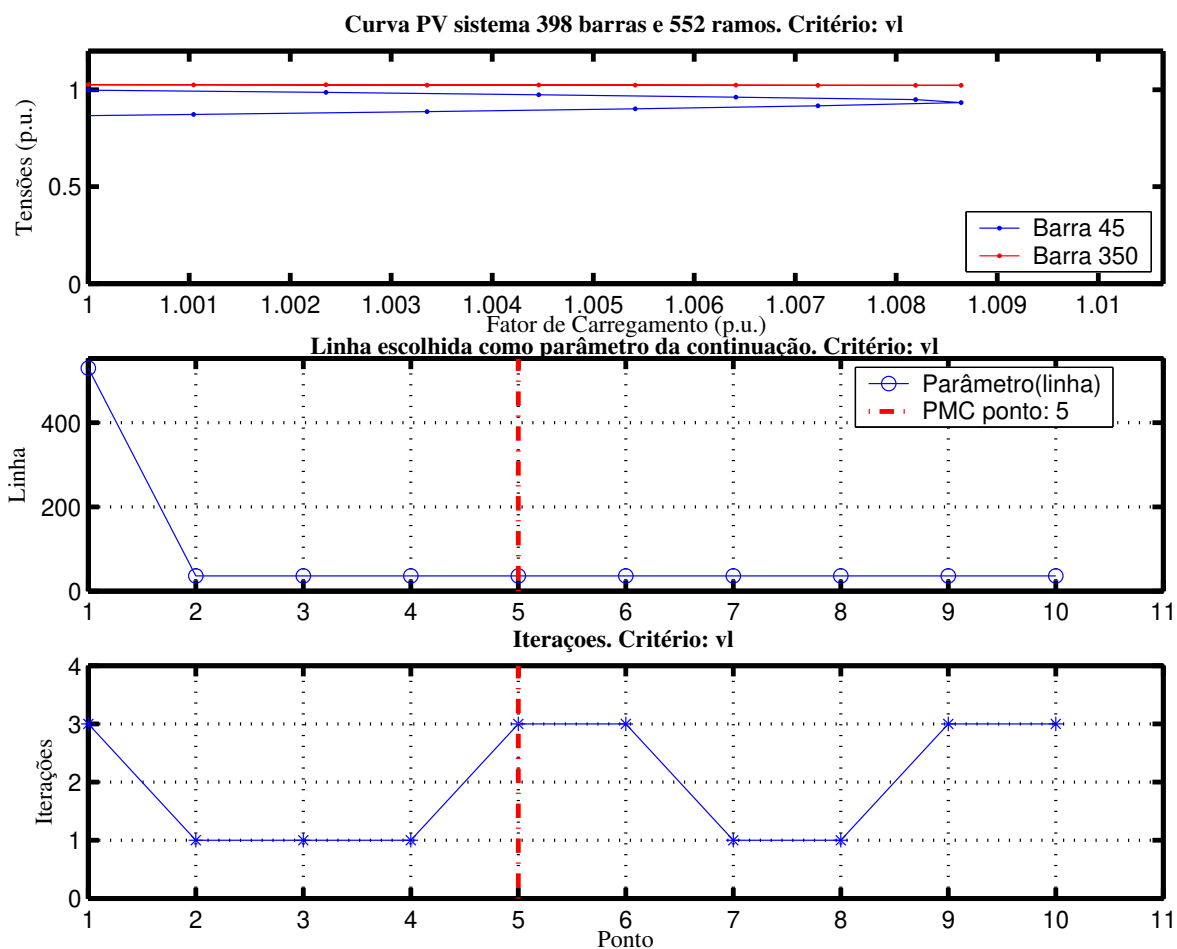


Figura 6.12: Resultados sistema de Norte-Nordeste Brasileiro utilizando o critério *vl*.

Devido a que o sistema Norte-Nordeste está operando sob condição de alta carga, sua margem de carregamento é ainda menor do que no sistema de 300 barras (0,86%). Mesmo assim, o critério que escolhe o ramo que tenha a maior variação do índice $L_{l_{SR}}$ conseguiu traçar a totalidade da curva PV neste caso para as barras 45 e 350 (figura 6.12).

6.8 Sistema de 904 barras e 1283 ramos

O último sistema testado foi o de 904 barras e 1283 ramos. A seguir são apresentados os resultados de dois critérios que forneceram bons resultados para este sistema.

O primeiro deles (*mtlpq*) escolhe o ramo cuja barra tiver a menor tensão. Se a barra escolhida estiver conectada a mais de um ramo, o critério de desempate é o menor índice *lpq*.

Na figura (figura 6.13) verifica-se o baixo número de iterações que foram necessárias, uma a cada ponto convergido. Só nos pontos próximos ao PMC este número cresceu para 2 iterações.

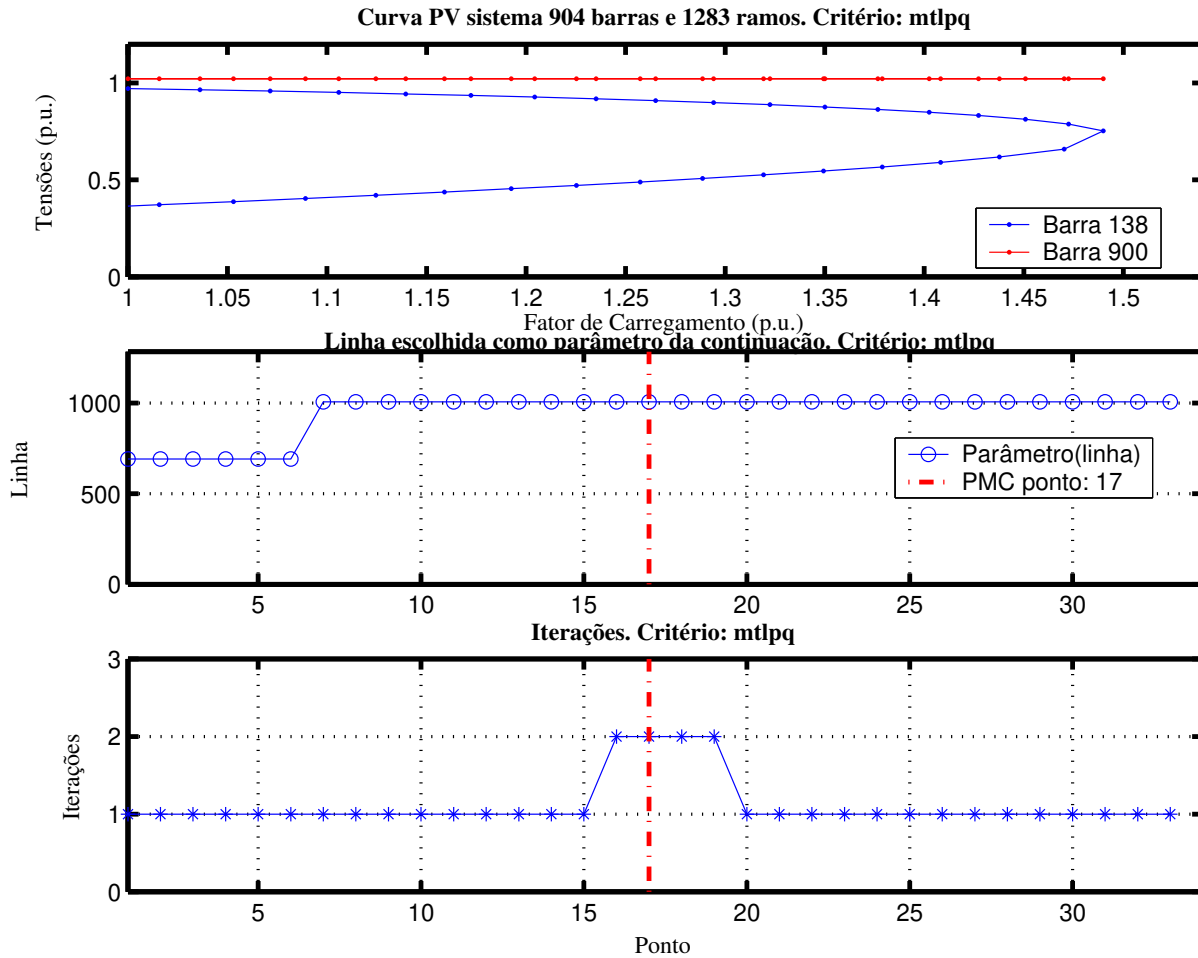


Figura 6.13: Resultados sistema de 904 barras utilizando o critério *mtlpq*.

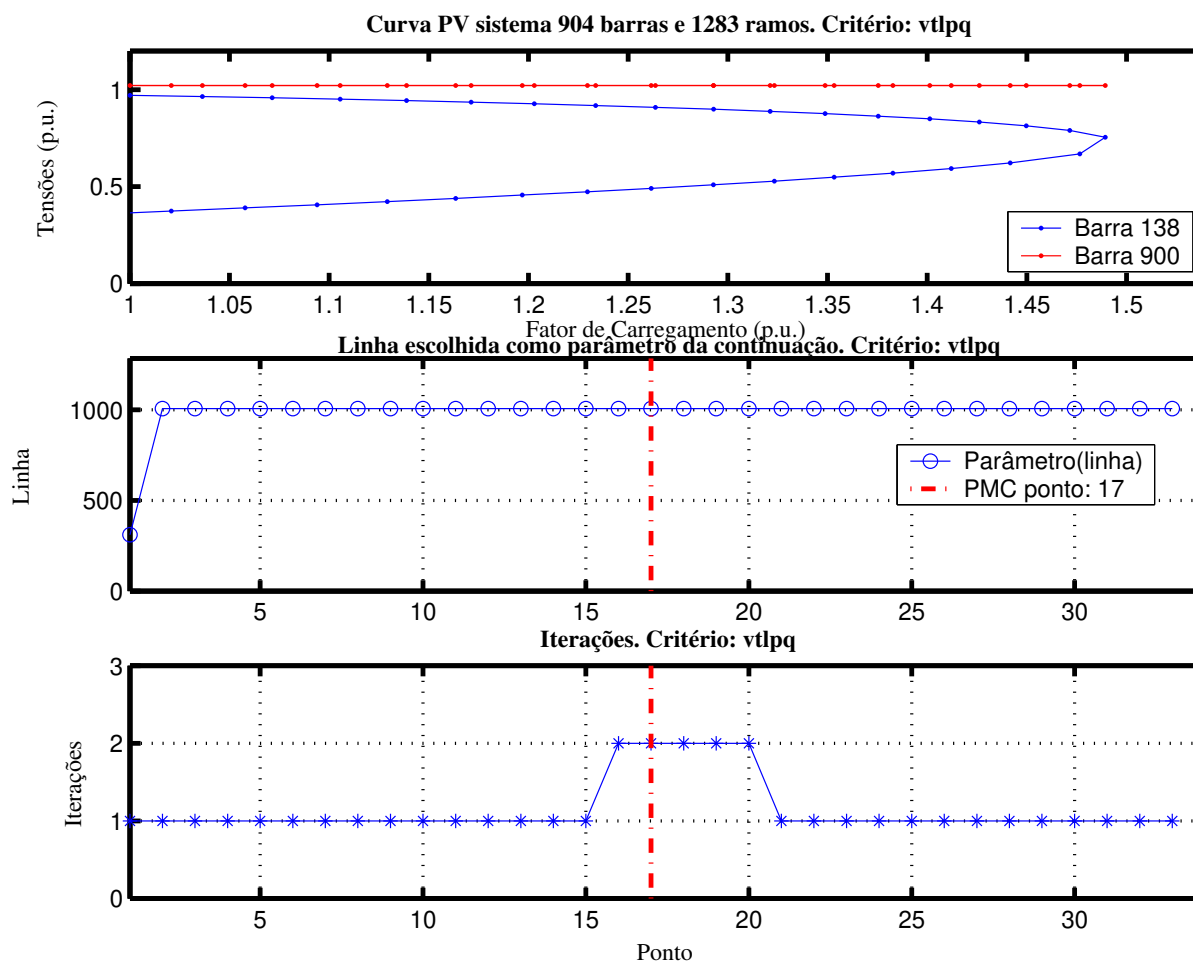


Figura 6.14: Resultados sistema de 904 barras utilizando o critério *vtlpq*.

Na figura 6.14 pode-se observar o traçado da curva PV para o sistema de 904 barras utilizando o critério *vtlpq*, o qual seleciona o ramo que estiver conectado à barra de maior variação de tensão e que tiver o menor índice *lpq*.

Além disso, mesmo que os dois critérios apresentem pequenas variações no ramo escolhido como parâmetro, o segundo deles (*vtlpq*) encontra muito rápido o melhor ramo como parâmetro da continuação, o que representa uma vantagem em termos de cálculo e esforço computacional.

É preciso mencionar que este sistema apresenta uma característica muito importante ao executar o fluxo de carga da continuação parametrizado por perdas de potência ativa. Muito poucos ramos utilizados como parâmetro da continuação, permitem traçar a curva. Aliás, a

barra de menor tensão e de maior variação de tensão é a número 138, a qual, está conectada unicamente a um transformador (ramo 1070). Isto, na teoria impossibilita a utilização dos parâmetros em função das perdas ativas, já que no modelo de um transformador o valor da resistência seria em geral nulo. Dessa maneira não seria possível estabelecer uma variação nas perdas de potência ativa no ramo. Porém, intencionalmente foi estabelecido um valor de resistência muito pequeno para este ramo (100 vezes menor do que o menor valor de resistência do sistema), provocando um valor reduzido, porém, necessário para gerar uma variação de perdas de potência ativa no ramo. A seguir são apresentadas algumas justificativas para realizar esta pequena modificação:

- O valor de resistência estabelecido pode ser considerado como desprezível comparado com o sistema (100 vezes menor do que o menor valor de resistência do sistema).
- Na prática os transformadores possuem um valor de resistência que geralmente não é levado em conta no modelo do sistema, embora ele exista.
- As perdas de potência ativa no ramo são igualmente desprezíveis comparadas com as perdas totais do sistema, mesmo na parte inferior da curva PV. Para comprovar este fato, no critério utilizado na figura 6.13 as perdas de potência ativa no último ponto da curva são de $1,5725 \times 10^{-7}$ p.u., entretanto, as perdas totais de potência ativa do sistema são de 6,9418 p.u.; na figura 6.14 obtêm-se perdas $1,5698 \times 10^{-7}$ p.u. para o ramo 1070 e as perdas ativas do sistema todo são 7,0165 p.u.
- Utilizando este ramo como parâmetro, é possível aumentar de maneira considerável o tamanho do passo, pois as variações de perdas de potência ativa no ramo são muito pequenas fazendo o passo preditor ainda mais conservador. Para este caso o passo passou de 0,1 para 1,0.

Para esclarecer o desempenho dos critérios utilizados nos diferentes sistemas é apresentada a tabela 6.1.

Tabela 6.1: Critérios de escolha do parâmetro da continuação

(X- Falha do método; \checkmark - Sucesso do método)

Sistema	14	30	57	118	300	Norte-	904
-----	barras	barras	barras	barras	barras	Nordeste	barras
Critério							
<i>mi</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>ma</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>mp</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>mt</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	X	\checkmark	X
<i>va</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	\checkmark
<i>vi</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	X
<i>vp</i>	X	X	X	X	\checkmark	\checkmark	X
<i>vt</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	X
<i>mm</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>ml</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>mq</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	X	\checkmark	X
<i>qm</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>im</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>vm</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	\checkmark
<i>vl</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	\checkmark
<i>vq</i>	X	X	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	X
<i>mtlpq</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark	\checkmark
<i>vtlpq</i>	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark

Da tabela 6.1 pode-se observar que alguns critérios não tiveram bons resultados tais como *ma*, *mb*, *mp*, *mm*, *ml*, *qm* e *im*. Estes critérios estão baseados na escolha dos ramos utilizando só os índices *lp*, L_{SR} , $L_{l_{SR}}$ ou *lpq1*, os quais são função de relações (p.e. $4ac/b^2$ ou P_l/P_{max}). Estes índices apresentam melhores resultados quando utilizados como a variação, por exemplo, *vi*, *vl* e *vm*.

Por outro lado, quando utilizada a combinação de dois critérios, por exemplo, *mt*, *vt*, *mtlpq* ou *vtlpq*, os resultados melhoram consideravelmente, aliás o último deles mostra resultados satisfatórios para todos os sistemas.

6.9 Comparação de resultados

Dos resultados agrupados na tabela 6.1 pode-se concluir que para escolher o ramo que serve como parâmetro da continuação por perdas de potência ativa o melhor critério é *vtlpq*

o qual utiliza o menor índice lpq para selecionar o ramo que está conectado à barra de maior variação de tensão.

Comparando este método de parametrização por perdas de potência ativa com os métodos conhecidos na literatura, as quais utilizam a parametrização por tensão, foi obtida a tabela 6.2.

Tabela 6.2: Parametrização por tensão vs. parametrização por perdas de potência ativa

Sistema ----- Parametrização	14 barras	30 barras	57 barras	118 barras	300 barras	Norte- Nordeste	904 barras
Tensão	✓	✓	✓	X	X	✓	X
Perdas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Observação: Embora seja possível traçar a totalidade da curva PV escolhendo convenientemente a barra ou o ramo como parâmetro (escolha manual), os resultados mostrados referem-se à escolha automática do parâmetro da continuação, seja por tensão ou por perdas de potência ativa.

O método da parametrização automática por tensão escolhe a barra de maior variação de tensão para o traçado da curva. Porém para alguns sistemas não foi possível traçá-la. Diferentemente a parametrização por perdas de potência ativa, utilizando o critério v_tlpq , permite traçar a curva PV para todos os sistemas testados.

As figuras 6.15 a 6.18 mostram os resultados obtidos com a parametrização por tensão para os sistemas em que foi possível traçar a totalidade da curva PV conforme a tabela 6.2. Adicionalmente as tabelas 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam alguns dados comparativos destes sistemas entre a parametrização por tensão e por perdas de potência ativa nos ramos. Em termos de número de iterações, mesmo que os dois métodos utilizem um número relativamente reduzido de iterações, a parametrização por perdas de potência ativa nos ramos apresenta ganho, pois em média utiliza menos iterações para um número similar de pontos convergidos na curva PV, representando uma maior eficiência computacional, da ordem de 25% a 50%. De maneira similar mostra-se um ganho no tamanho do passo (σ^0); para a parametrização por tensão está na ordem de 0,02, entretanto que para a parametrização por perdas ativas é de 0,1.

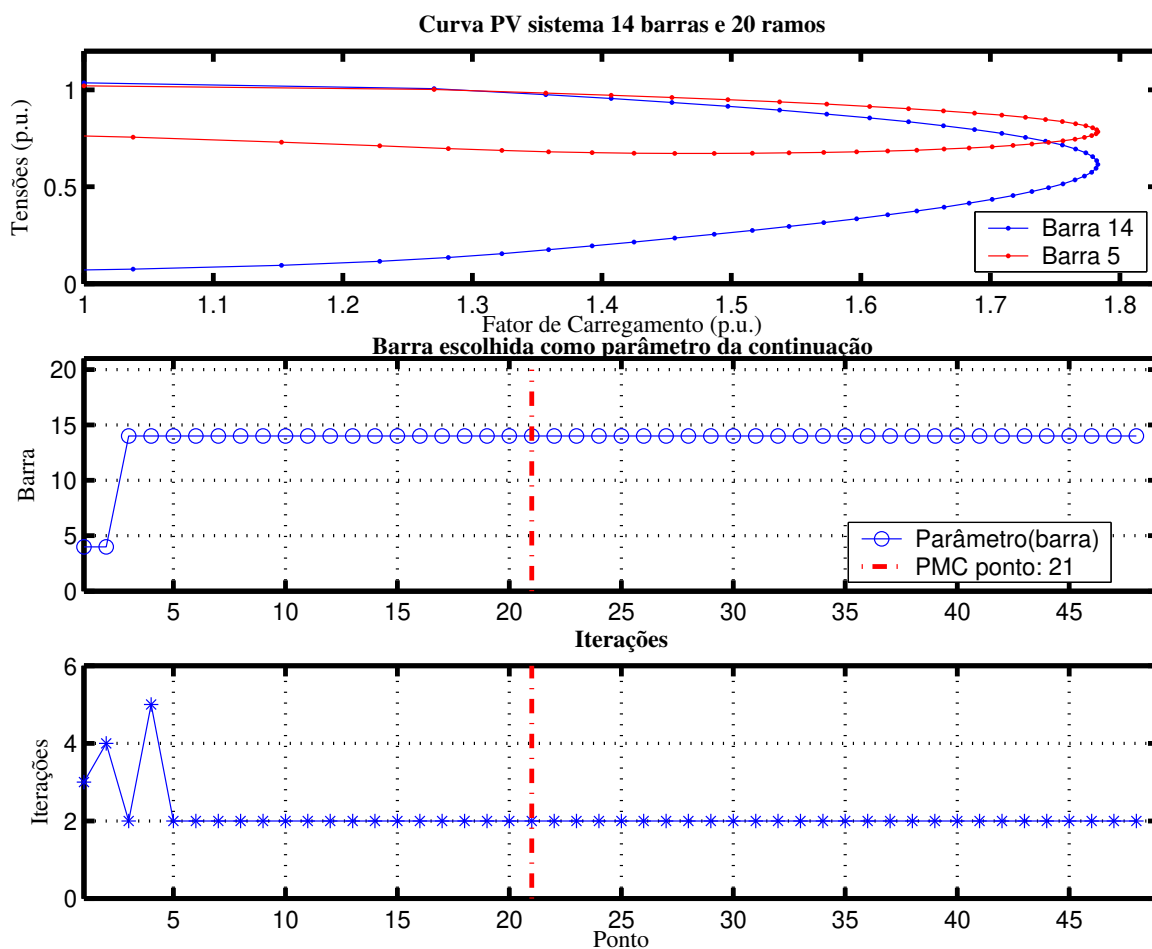


Figura 6.15: Parametrização por tensão para o sistema de 14 barras.

Tabela 6.3: Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 14 barras

Parametrização	Tensão	Perdas de potência ativa
Número de pontos	48	48
Tamanho do passo (σ^0)	0,02	0,1
Iterações máximo	5	3
Iterações mínimo	2	1
Iterações média	2,12	1,08
Ganho eficiência computacional	49,06%	

6.9 Comparação de resultados

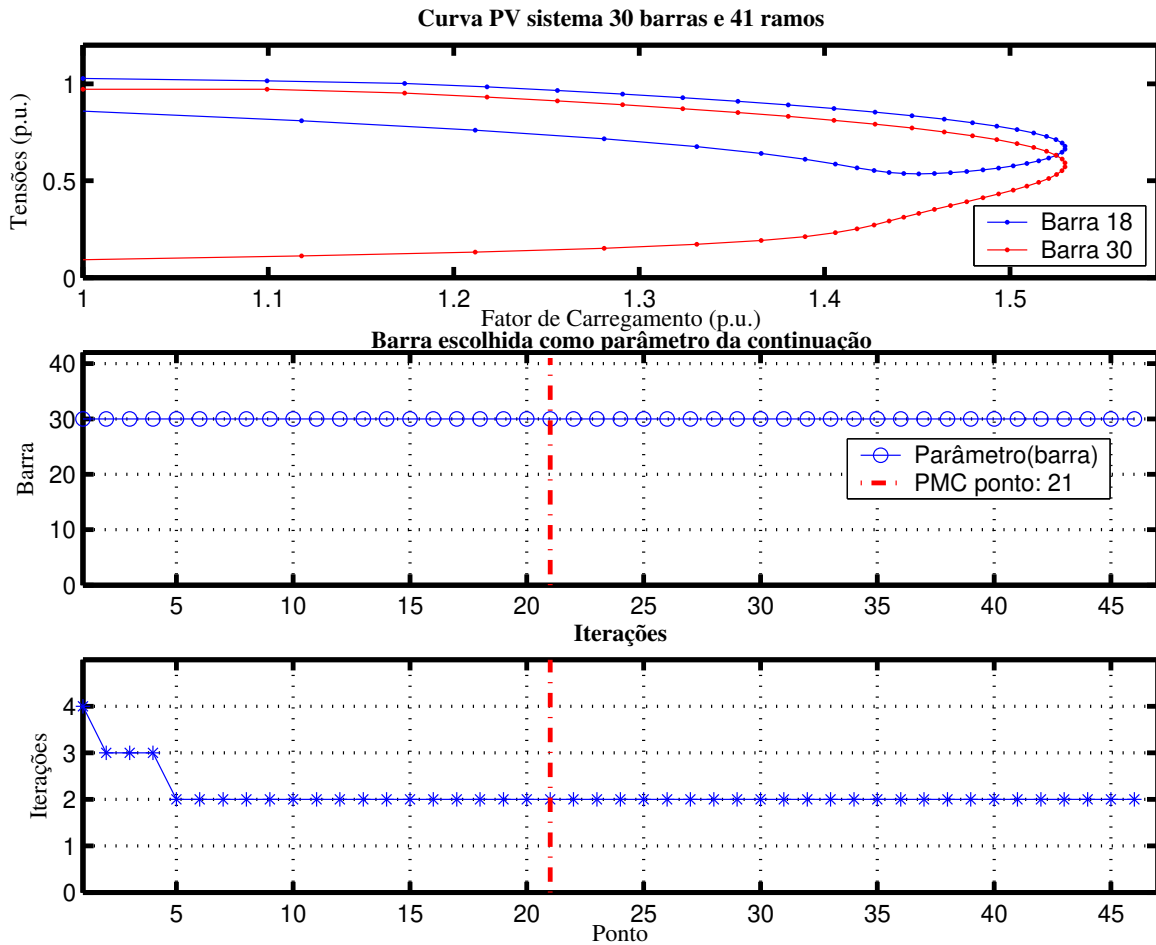


Figura 6.16: Parametrização por tensão para o sistema de 30 barras.

Tabela 6.4: Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 30 barras

Parametrização	Tensão	Perdas de potência ativa
Número de pontos	46	61
Tamanho do passo (σ^0)	0,02	0,1
Iterações máximo	4	3
Iterações mínimo	2	1
Iterações média	2,11	1,01
Ganho eficiência computacional	36,52%	

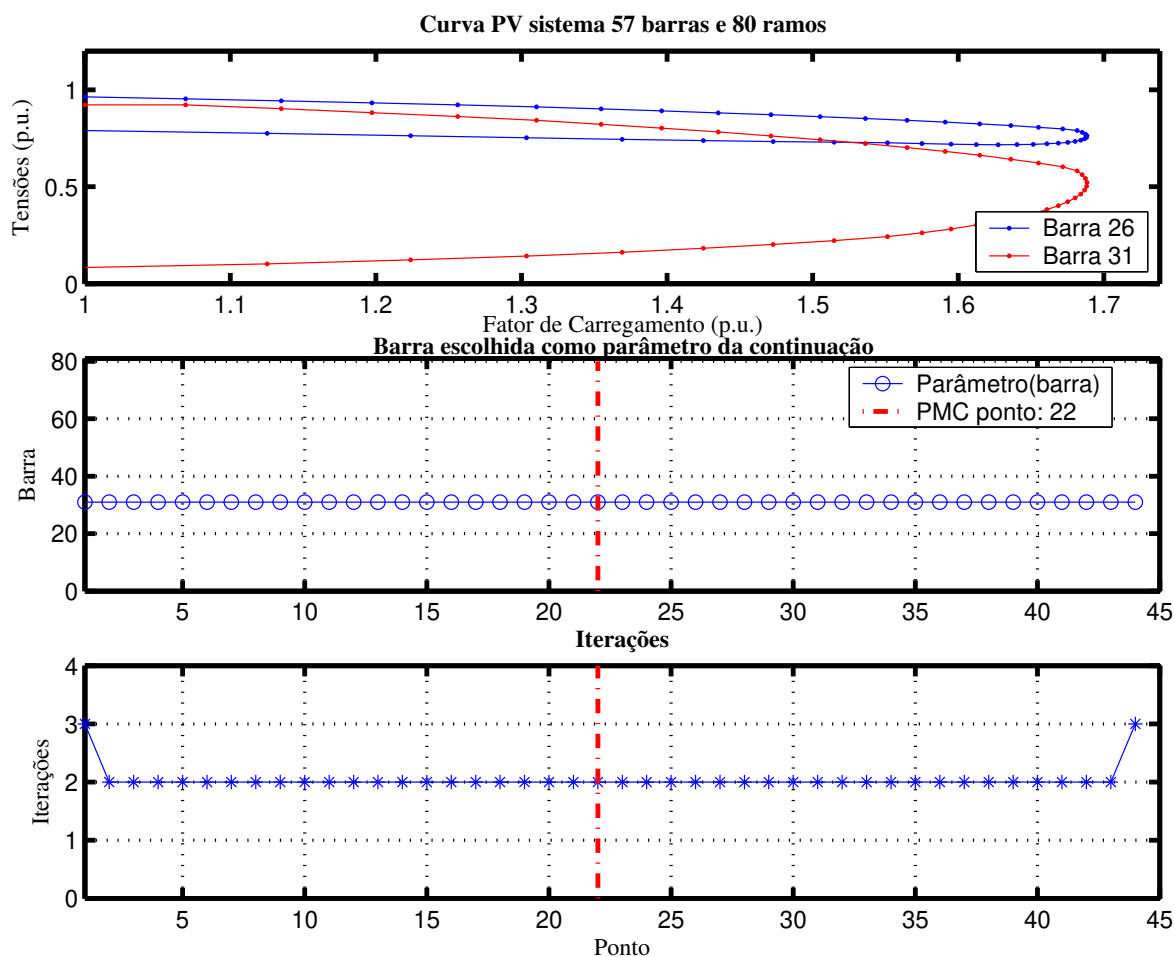


Figura 6.17: Parametrização por tensão para o sistema de 57 barras.

Tabela 6.5: Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema de 57 barras

Parametrização	Tensão	Perdas de potência ativa
Número de pontos	44	50
Tamanho do passo (σ^0)	0,02	0,1
Iterações máximo	3	2
Iterações mínimo	2	1
Iterações média	2,04	1,22
Ganho eficiência computacional	32,04%	

6.9 Comparação de resultados

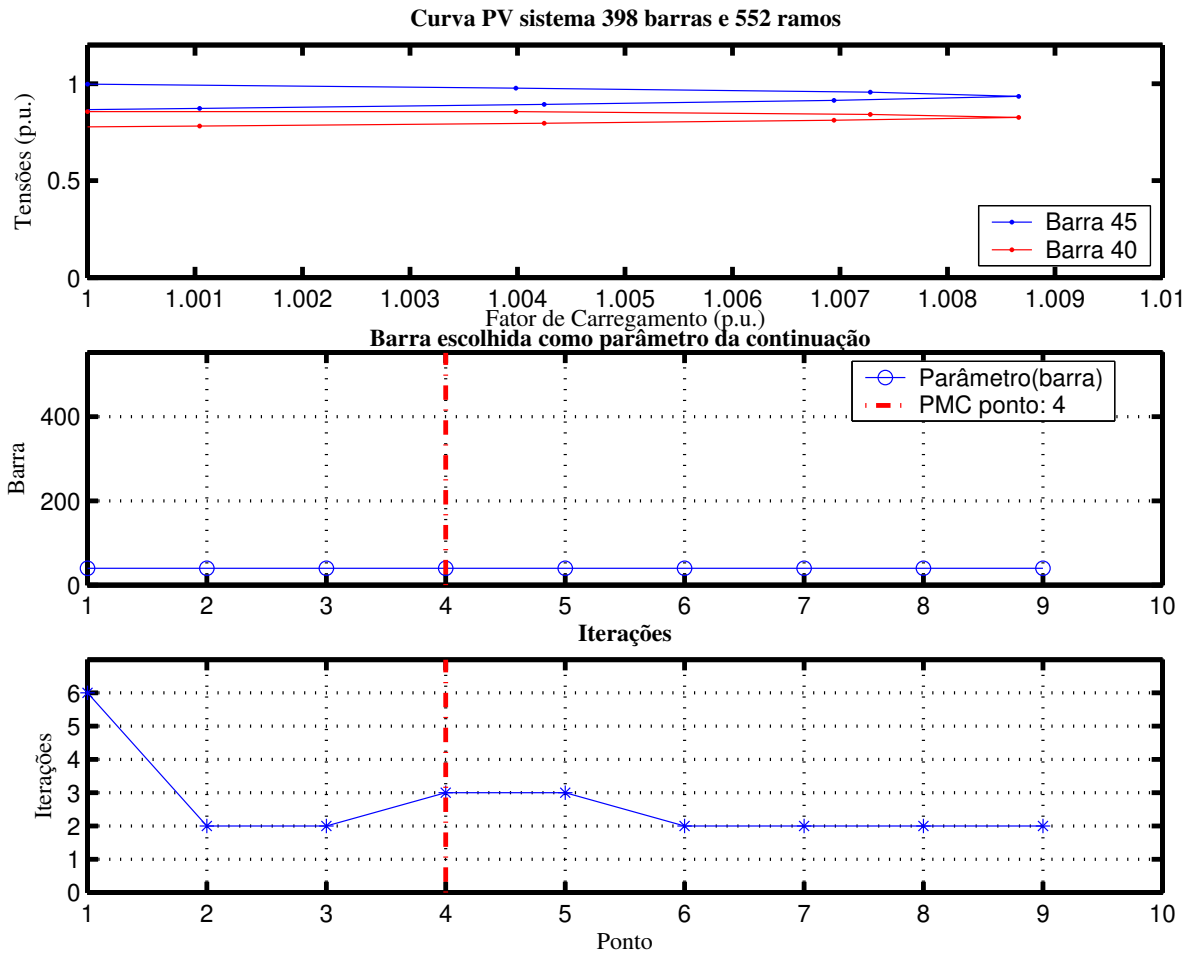


Figura 6.18: Parametrização por tensão para o sistema Norte-Nordeste brasileiro.

Tabela 6.6: Parametrização por tensão vs. perdas de potência ativa para o sistema Norte-Nordeste

Parametrização	Tensão	Perdas de potência ativa
Número de pontos	9	10
Tamanho do passo (σ^0)	0,015	0,1
Iterações máximo	6	3
Iterações mínimo	2	1
Iterações média	2,66	1,70
Ganho eficiência computacional	28,99%	

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Fluxo de carga da continuação

- Embora os problemas de instabilidade em SEP sejam fenômenos dinâmicos, é possível utilizar estratégias de modelamento estático na análise de estabilidade de tensão. Entre elas está o fluxo de carga da continuação.
- Métodos como o fluxo de carga da continuação podem oferecer uma informação importante não só para determinar pontos onde o colapso de tensão ocorre, mas também para indicar margens de estabilidade de tensão e revelar os comportamentos de tensão nas barras do sistema tanto na parte superior, quanto na parte inferior da curva PV. Estes comportamentos podem ser atraentes em análises detalhadas de perfis de tensão em barras específicas, cujas curvas são muito diferentes ao resto do sistema.
- O fluxo de carga da continuação é robusto e flexível. É muito útil para resolução de problemas de fluxo de carga com dificuldades de convergência. Porém, pode consumir um tempo computacional considerável, se for comparado com outros métodos.
- Para melhor aproveitar o método computacionalmente, é recomendável utilizar o fluxo de carga convencional para obter os primeiros pontos da curva, isto é, iniciando desde o caso base aumentando os níveis de carregamento e até próximo do PMC. Daí em diante o fluxo de carga da continuação mostra vantagens, e também permite o traçado da parte inferior da curva PV.
- O passo preditor utilizando o vetor tangente apresenta bons resultados, pois além de estimar o próximo ponto da curva, oferece outras informações como proximidade ao PMC, indica se o ponto convergido está na parte superior (tangente positiva) ou na parte inferior da curva (tangente negativa) e fornece informação sobre a variação do sistema.

- Apesar que no método proposto foi utilizado o fluxo de carga de Newton Raphson levemente modificado como corretor, nada impede utilizar outros métodos como o fluxo de carga desacoplado rápido descrito em [30] ou suas variações.
- Da mesma maneira existem várias formas de parametrização; para os engenheiros, as grandezas com claro significado físico podem oferecer vantagens. Sugere-se utilizar parâmetros que tenham um comportamento monotônico, seja crescente ou decrescente como é o caso da tensão ou as perdas de potência ativa.
- O controle do tamanho do passo é uma ferramenta vital que pode determinar o sucesso ou não do fluxo de carga da continuação. Técnicas de sensibilidade ou heurísticas [31] podem oferecer novos caminhos para a otimização do tamanho do passo.

7.2 Índices de proximidade ao colapso de tensão

- É importante salientar que a maioria dos índices que estudam a proximidade ao colapso de tensão encontrados na literatura são deduzidos baseados na região de operação estável do sistema, isto é, desde o *caso base* até o PMC. A partir daí, seus comportamentos têm sido pouco explorados e o seu cálculo apresenta sérias dificuldades numéricas, sem levar em conta que partem do suposto de uma rede de duas barras e um ramo, e não de sistemas maiores e interligados.
- Dos índices aqui estudados, o índice lpq pode oferecer uma informação com maior precisão pois leva em conta não só os fluxos de potência ativa como também os de potência reativa em uma única expressão.

7.3 Determinação do parâmetro da continuação

- Em geral a combinação de critérios resultou em melhores resultados do que utilizar um só. Assim, foi necessário selecionar primeiro uma barra que tivesse a maior variação de tensão e logo, associá-la a um ramo que tenha o menor índice lpq . Esta combinação teve sucesso em todos os sistemas estudados neste trabalho. Porém, levando em conta que os demais critérios tiveram sucesso em alguns sistemas testados, podem ser analisadas técnicas baseadas em sistemas multi-agentes ou inteligência artificial para garantir o bom desempenho do método proposto.
- Para redes complexas como as de 118 e 904 barras, deve-se ter especial cuidado com a seleção do ramo que será o parâmetro da continuação, pois nas condições de baixo carregamento não é possível encontrar a barra de menor tensão ou de maior variação de tensão.

7.4 Outras considerações

- Com o objetivo de otimizar o processo e obter ganhos em tempo computacional, é importante primeiro localizar a barra de maior variação de tensão e depois realizar os cálculos dos índices e levar em conta as mudanças no valor da resistência se o ramo for o único conectado à barra selecionada no critério de escolha do parâmetro.
- A eficiência computacional depende da combinação de vários fatores, entre eles estão o tamanho do passo, a tolerância, etc. Quanto maior for o tamanho do passo, menos pontos serão necessários para traçar a curva, porém, é possível que o número de iterações aumente para encontrar o estado convergido.

Referências Bibliográficas

- [1] Força Tarefa "Colapso de Tensão". Critérios e Metodologias Estabelecidos no âmbito da Força Tarefa "Colapso de Tensão" do GTAD/SCEL/GCOI para Estudos de Estabilidade de Tensão nos Sistemas Interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiro, *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu. PR, 1999.
- [2] Reactive Power Reserve Work Group. Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, Reactive Power Reserve Monitoring Methodology, Final Report, 1999.
- [3] Seydel, R. Practical Bifurcation and Stability Analysis - From Equilibrium to Chaos, Springer-Verlag, 1994.
- [4] Mansour, Y. Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis, IEEE Power Engineering Society, 93TH0620-5PWR, 1993.
- [5] Ajjarapu, V. and Christy, C. The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, n.1, 1992.
- [6] Cañizares, C.A.; Alvarado, F.L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, n.1, 1993.
- [7] Chiang, H.D.; Flueck, A.J.; Balu, N. CPFLOW: A practical tool for tracing power systems steady-state stationary behavior due to load and generation variations, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.10, n.2, 1995.
- [8] Alves, D.A.; Da Silva, L.C.P.; Castro, C.A.; Da Costa, V.F. New parametrization schemes for continuation load flow method, *2000 International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring, and Power Technologies - DRPT2000*, City University London, UK, 2000.
- [9] Alves, D.A.; Da Silva, L.C.P.; Castro, C.A.; Da Costa, V.F. Novas formas de parametrização para o método da continuação, *IX Encontro Regional Latino-Americano da Cigré*, Foz do Iguaçu, PR, 2001.
- [10] De Souza, A.C.Z.; Cañizares, C.A.; Quintana, V.H. New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.12, n.3, 1997.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] Moghavvemi, M.; Jasmon, G.B. New method for indicating voltage stability condition in power system, *IEE International Power Engineering Conference*, 1997.
- [12] Kundur Prabha. Power System Stability and Control. *Ed. McGraw-Hill, Inc.*, New York, EUA, 1994.
- [13] Anderson Paul, Fouad A. Power System Control and Stability. *IEEE PRESS, Inc.*, New York, EUA, 1977.
- [14] Chow, J.C.; Fischl, R.; Yan, H. On the evaluation of voltage collapse criteria, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, n.2, 1990.
- [15] Dobson, I. and Chiang, H.D. Towards a theory of voltage collapse in electric power systems, *Systems and Control Letters*, vol.13, n.2, 1995, pp.253-262.
- [16] Guckenheimer, J.; Holmes, P. Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields. *Ed. Springer-Verlag*, 1993.
- [17] Kwuatny, H.G.; Pasrija, A.K.; Bahar. Stactic bifurcations in electric power networks: Loss of steady state stability and voltage collapse, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. CAS-33, 1986, pp.981-991.
- [18] Cañizares, C.A. Conditions for Saddle-Node bifurcations in AC/DC power systems, *Electric Power and Energy Systems*, vol.17, n.1, 1993, pp.61-68.
- [19] Granville, S.; Mello, J.C.O.; Melo, A.C.G; Vieira Filho, X.; Pinto, H.J.C.; Martins, N. Voltage collapse Evaluation by combining interior point methods and modal analysis, *Sepepe meeting*, Recife, PE, Brasil, SP-22, 1996, pp 445-453.
- [20] Glavic, M.; Kuslagic, M.; Tensjak, S. An integrated methodology for voltage stability analysis due to slow load variations, *29th North American Power Symposium*, Laramie, Wyoming, USA, 1997, pp 571-575.
- [21] Mohamed, A.; Jasmon, G.B. Determining the weak segment of a power system with voltage stability considerations, *Electric Machines and Power Systems*, vol.24, 1994, pp 555-568.
- [22] Moghavvemi, M.; Faruque, M.O. Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for preidction, *Electrical Power and Energy Systems*, vol.21 1997, pp 455-461.
- [23] Quintela, A.S. Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, SP, setembro de 2002.
- [24] "Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data". Working Group on a Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data *IEEE Transactions on PAS*, PAS-92, no.6,Nov/Dec'1973, pp.1916-25.

- [25] Alves, D.A. Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação. *Tese de Doutorado*, Universidade Estadual de Campinas, SP, junho de 2000.
- [26] Moghavvemi, M.; Faruque, M.O. Estimation of voltage collapse from local measurement of line power flow and bus voltages, *IEEE Power Tech '99*, 1999, pp 1-6.
- [27] Quintela, A.S.; Castro C.A. Improved branch-based voltage stability proximity indices Part I and II. *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, Halifax, Nova Scotia, Canada, 2002.
- [28] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [29] Moticelli, A. J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Ed. Edgard Blucher. 1983. 164 p.
- [30] Stott B, Alsac O. Fast decoupled load flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93(3). 1749, pp 589-869.
- [31] Silveira, C.S. Estudo de máximo carregamento em sistemas de energia elétrica. *Dissertação de Mestrado*, Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade des São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apêndice A

Sistemas elétricos de potência testados

A.1 Sistema New England

Tabela A.1: Dados dos ramos do sistema *New England*

Ramo	De	Para	Tipo do ramo	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap	φ
39	30	2	TRAFO	0.0000	0.0181	0.0000	1.025	0.0
40	31	6	TRAFO	0.0000	0.0500	0.0000	1.070	0.0
41	32	10	TRAFO	0.0000	0.0200	0.0000	1.070	0.0
42	33	19	TRAFO	0.0007	0.0142	0.0000	1.070	0.0
43	34	20	TRAFO	0.0009	0.0180	0.0000	1.025	0.0
44	35	22	TRAFO	0.0000	0.0143	0.0000	1.025	0.0
45	36	23	TRAFO	0.0005	0.0272	0.0000	1.000	0.0
46	37	25	TRAFO	0.0006	0.0232	0.0000	1.025	0.0
47	38	29	TRAFO	0.0008	0.0156	0.0000	1.025	0.0
2	39	1	LINHA	0.0010	0.0250	0.7500	0.000	0.0
1	1	2	LINHA	0.0035	0.0411	0.6987	0.000	0.0
4	2	3	LINHA	0.0013	0.0151	0.2572	0.000	0.0
5	2	25	LINHA	0.0070	0.0086	0.1460	0.000	0.0
6	3	4	LINHA	0.0013	0.0213	0.2214	0.000	0.0
7	3	18	LINHA	0.0011	0.0133	0.2138	0.000	0.0
8	4	5	LINHA	0.0008	0.0128	0.1342	0.000	0.0
9	4	14	LINHA	0.0008	0.0129	0.1382	0.000	0.0
10	5	6	LINHA	0.0002	0.0026	0.0434	0.000	0.0
11	5	8	LINHA	0.0008	0.0112	0.1476	0.000	0.0
12	6	7	LINHA	0.0006	0.0092	0.1130	0.000	0.0
13	6	11	LINHA	0.0007	0.0082	0.1389	0.000	0.0
14	7	8	LINHA	0.0004	0.0046	0.0780	0.000	0.0
15	8	9	LINHA	0.0023	0.0363	0.3804	0.000	0.0
16	9	39	LINHA	0.0010	0.0250	1.2000	0.000	0.0
17	10	11	LINHA	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.0
18	10	13	LINHA	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.0
19	13	14	LINHA	0.0009	0.0101	0.1723	0.000	0.0
20	14	15	LINHA	0.0018	0.0217	0.3660	0.000	0.0
21	15	16	LINHA	0.0009	0.0094	0.1710	0.000	0.0
22	16	17	LINHA	0.0007	0.0089	0.1342	0.000	0.0
23	16	19	LINHA	0.0016	0.0195	0.3040	0.000	0.0
24	16	21	LINHA	0.0008	0.0135	0.2548	0.000	0.0
25	16	24	LINHA	0.0003	0.0059	0.0680	0.000	0.0
26	17	18	LINHA	0.0007	0.0082	0.1319	0.000	0.0
27	17	27	LINHA	0.0013	0.0173	0.3216	0.000	0.0
28	21	22	LINHA	0.0008	0.0140	0.2565	0.000	0.0
29	22	23	LINHA	0.0006	0.0096	0.1846	0.000	0.0
30	23	24	LINHA	0.0022	0.0350	0.3610	0.000	0.0
31	25	26	LINHA	0.0032	0.0323	0.5130	0.000	0.0
32	26	27	LINHA	0.0014	0.0147	0.2396	0.000	0.0
33	26	28	LINHA	0.0043	0.0474	0.7802	0.000	0.0
34	26	29	LINHA	0.0057	0.0625	1.0290	0.000	0.0
35	28	29	LINHA	0.0014	0.0151	0.2490	0.000	0.0
36	12	11	LINHA	0.0016	0.0435	0.0000	0.000	0.0
37	12	13	LINHA	0.0016	0.0435	0.0000	0.000	0.0
38	19	20	TRAFO	0.0007	0.0138	0.0000	1.006	0.0

Tabela A.2: Dados dos barramentos do sistema *New England*

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	P_L	Q_L	P_G	Q_G	Shunt
1	PQ	1.0420	-26.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PQ	1.0337	-23.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	PQ	0.9959	-26.6	322.0	122.4	0.0	0.0	0.0
4	PQ	0.9689	-26.7	500.0	184.0	0.0	0.0	0.0
5	PQ	0.9691	-24.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	PQ	0.9709	-24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	PQ	0.9620	-26.4	233.8	84.0	0.0	0.0	0.0
8	PQ	0.9621	-27.0	522.0	176.0	0.0	0.0	0.0
9	PQ	1.0142	-27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	PQ	0.9900	-21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	PQ	0.9823	-22.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	PQ	0.9639	-22.8	8.5	88.0	0.0	0.0	0.0
13	PQ	0.9853	-22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	PQ	0.9789	-24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	PQ	0.9789	-26.0	320.0	153.0	0.0	0.0	0.0
16	PQ	0.9943	-24.9	329.4	132.3	0.0	0.0	0.0
17	PQ	0.9984	-25.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	PQ	0.9961	-26.6	158.0	30.0	0.0	0.0	0.0
19	PQ	1.0287	-20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	PQ	1.0163	-21.9	680.0	103.0	0.0	0.0	0.0
21	PQ	1.0051	-22.5	274.0	115.0	0.0	0.0	0.0
22	PQ	1.0349	-18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	PQ	1.0283	-18.3	247.5	84.6	0.0	0.0	0.0
24	PQ	0.9936	-24.8	308.6	92.2	0.0	0.0	0.0
25	PQ	1.0428	-22.8	224.0	47.2	0.0	0.0	0.0
26	PQ	1.0250	-24.1	139.0	47.0	0.0	0.0	0.0
27	PQ	1.0067	-26.1	281.0	75.5	0.0	0.0	0.0
28	PQ	1.0283	-20.7	206.0	27.6	0.0	0.0	0.0
29	PQ	1.0300	-17.9	283.5	126.9	0.0	0.0	0.0
30	PV	1.0475	-21.7	0.0	0.0	230.0	230.4	0.0
31	REF	0.9820	0.0	0.0	0.0	724.0	300.2	0.0
32	PV	0.9831	-14.0	0.0	0.0	630.0	328.3	0.0
33	PV	0.9972	-15.4	0.0	0.0	612.0	248.0	0.0
34	PV	1.0123	-17.0	0.0	0.0	488.0	113.4	0.0
35	PV	1.0493	-13.2	0.0	0.0	630.0	318.0	0.0
36	PV	1.0635	-10.6	0.0	0.0	540.0	163.9	0.0
37	PV	1.0278	-16.1	0.0	0.0	520.0	62.9	0.0
38	PV	1.0265	-11.0	0.0	0.0	810.0	149.6	0.0
39	PV	1.0300	-27.4	1104.0	250.0	1000.0	167.7	0.0

A.2 Sistema de 14 barras

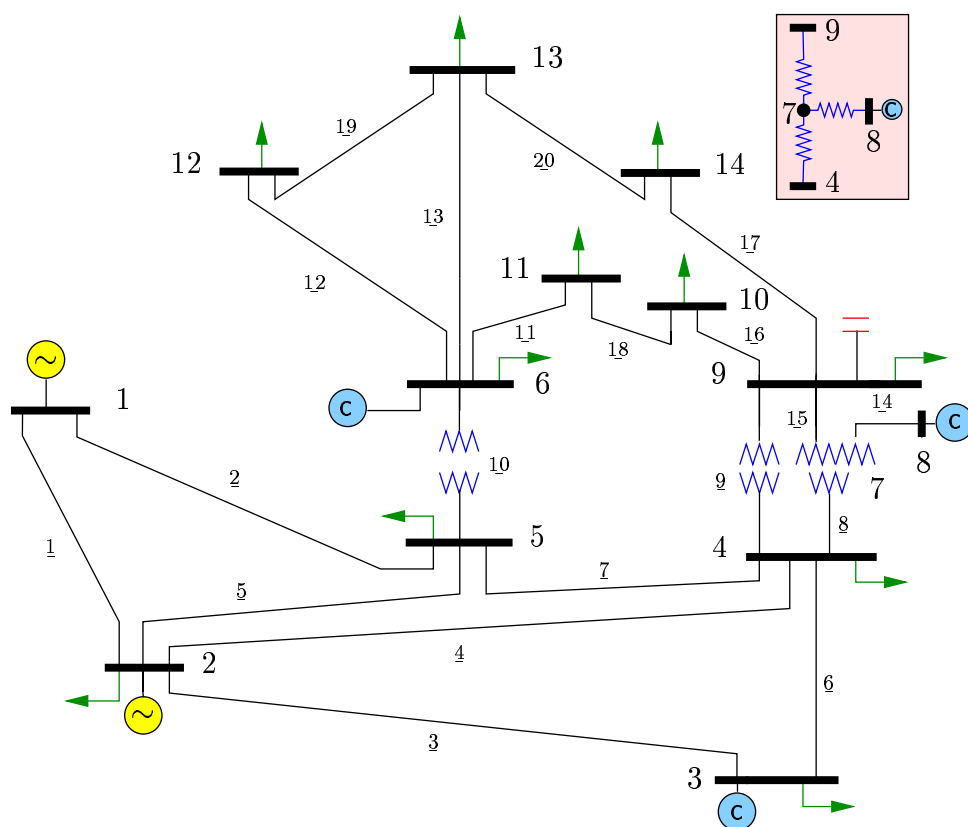


Figura A.1: Diagrama unifilar do sistema de 14 barras

A.3 Sistema de 30 barras

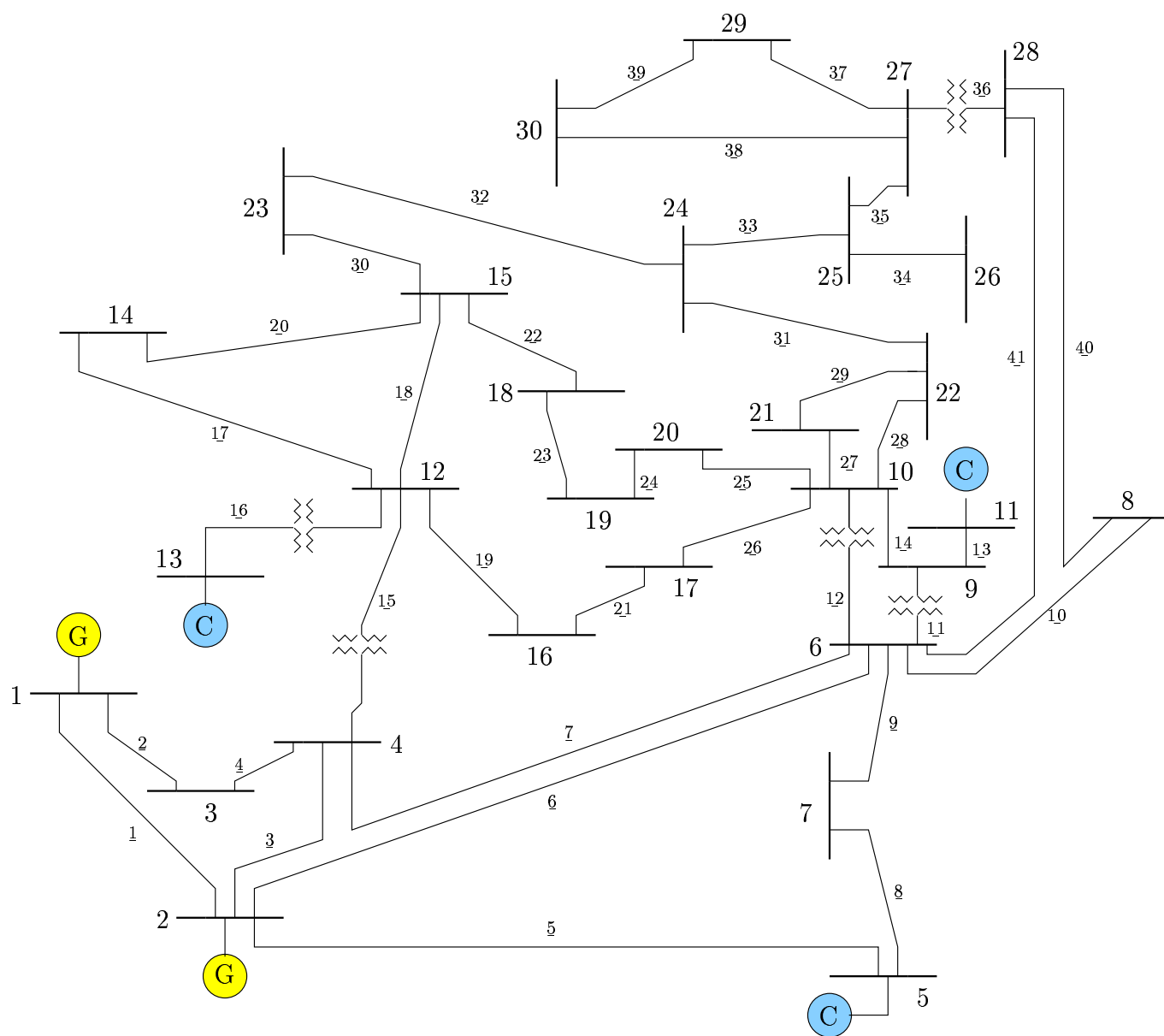


Figura A.2: Diagrama unifilar do sistema de 30 barras

A.4 Sistema de 118 barras

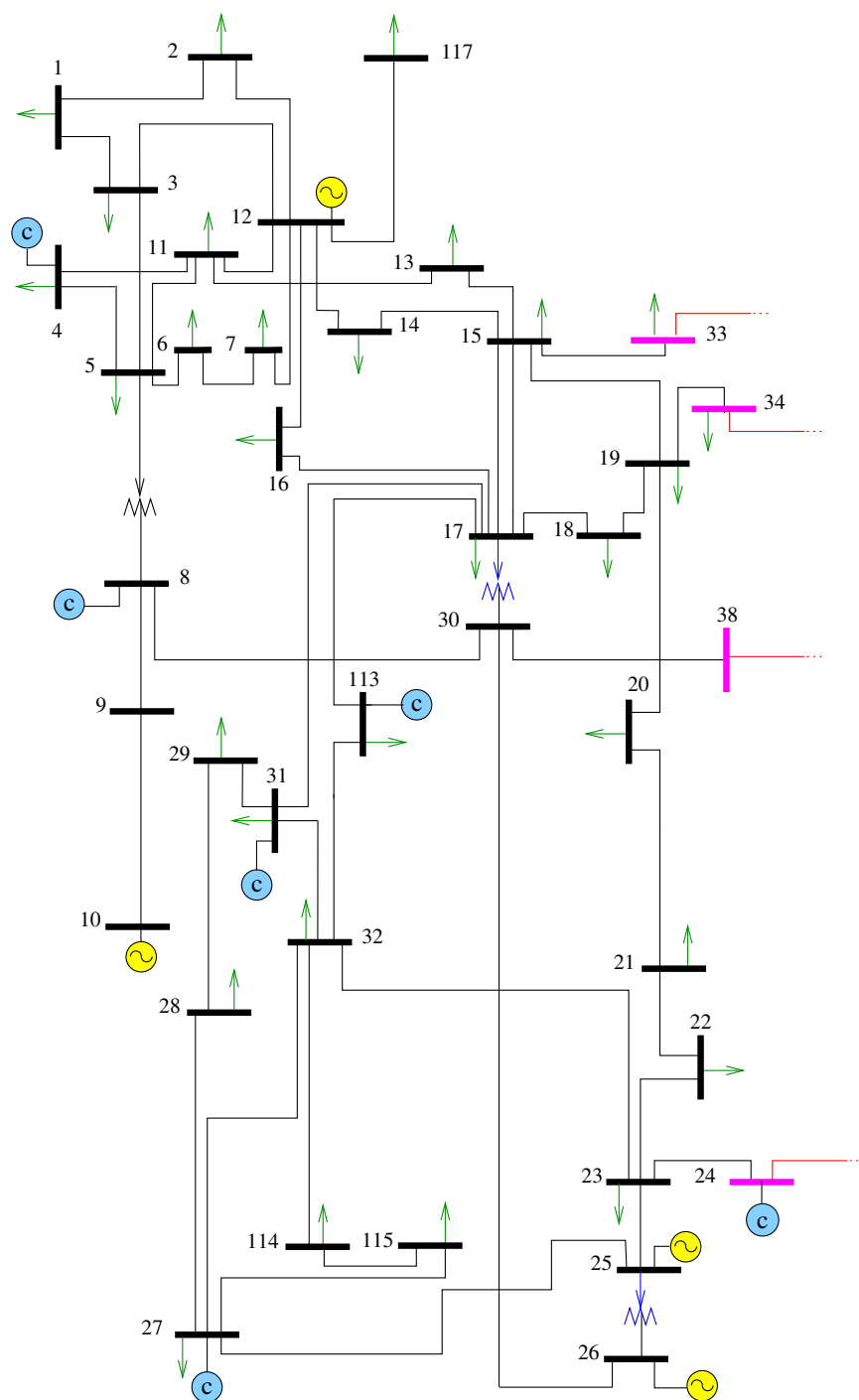


Figura A.3: Diagrama unifilar da parte principal do sistema de 118 barras

Apêndice B

Divulgação da pesquisa

Niño E.E.; Castro C.A.; Da Silva L.C.P. and Alves D.A. Continuation Power Flow: Automatic parameter determination, *Fifth Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission*, São Pedro, Brazil, 2003.