



Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por SIMONE MARIA
SOUSA e aprovada pela Comissão
Julgada em 28/04/2000.
Jivaldo F. da Costa
Orientador

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
DSCE - Departamento de Sistemas e Controle de Energia
UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE

**A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS
TORQUE X VELOCIDADE DA CARGA DE MOTORES
DE INDUÇÃO NA ESTABILIDADE DE TENSÃO DE
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

SIMONE MARIA SOUSA

Orientador : Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa

Banca Examinadora : Prof. Dr. Edson Bim

Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Abril de 2000.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

000016384

UNIDADE	B.C
N.º CHAMADA:	T/Unicamp
	So 85i
V.	Ex.
TOMBO BC/	42944
PROC.	16-278100
C	☐
D	☒
PREC.º	R\$ 11,00
DATA	25/10/00
N.º CPD	

CM-00147156-0

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

So85i Sousa, Simone Maria

A influência das características torque x velocidade da carga de motores de indução na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica / Simone Maria Sousa.-- Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Vivaldo Fernando da Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. I. Costa, Vivaldo Fernando. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à DEUS por me guiar e proporcionar este momento de glória.

Ao meu noivo Wagno, por toda sua compreensão, incentivo, amizade, carinho, companheirismo e ajuda, que foram primordiais para que eu viesse alcançar mais esta vitória

Aos meus pais, José Sousa dos Santos e Maria Brizabela Sousa, por me ensinarem a viver com dignidade, por terem me apoiado e ficado ao meu lado nos momentos em que mais precisei, e por se doarem inteiros, com afeto e dedicação, renunciando muitas vezes os seus sonhos, para que eu pudesse realizar os meus; não bastaria um muitíssimo obrigado, palavras dificilmente traduziriam todo o meu agradecimento.

Às minhas queridas irmãs, Gisela e Anna Paula, por todo incentivo, ajuda e amizade, minha eterna gratidão. E a toda minha família, especialmente, as tias Olga, Hilda e Ivanilde, por sempre terem torcido e vibrado com as minhas vitórias.

Ao Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa, por ter me transmitido seus conhecimentos e experiências profissionais e de vida com dedicação e amizade, expresso todo meu agradecimento.

Ao amigo Luiz Carlos, pela ajuda constante, na qual foi de grande importância para a realização desse trabalho.

A todos os professores, bem como aos colegas, que de alguma forma me ajudaram. E ao CNPq pelo apoio financeiro.

“Não podemos esperar por um valoroso futuro, sem antes construirmos um honroso presente”

“Basta um dia para semear, e um dia para colher. Mas, quantas semanas são necessárias à silenciosa germinação do trigo na Terra ...”

Dedico mais essa conquista, à memória de minhas avós, madrinha - avó e tia,

*Maria de Sousa
Maria da Glória
Maria Pureza
Maria Dulce
Maria Inês*

RESUMO

Neste trabalho, a influência das características torque x velocidade da carga de motores de indução na estabilidade de tensão de um sistema constituído por um motor de indução alimentado por um barramento infinito através de uma linha de transmissão é estudada utilizando-se análise de autovalores e de bifurcações. Três tipos de dependência do torque de carga com a velocidade são consideradas através de modelos de primeira e terceira ordem do motor de indução: quadrática, linear e composta. Os resultados são comparados com os obtidos através de um modelo de torque mecânico constante (independente da velocidade), com o intuito de validar a abordagem estática baseada nas equações do fluxo de potência.

ABSTRACT

In this work, the influence of load torque-speed characteristics on voltage stability of a system composed by an induction motor fed by a infinite bus through a transmission line is studied by employing eigenvalues and bifurcation analysis. Three types of load torque dependence on the rotational speed are considered by using a first and third order models: quadratic torque model, linear torque model and composite torque model. The results are compared with the ones obtained by considering constant torque model (independent on speed), in order to validate the static approach based on load flow equations.

SIMBOLOGIAS

J	momento de inércia (seg)
f	frequência (Hz)
p	número de pólos do motor
ω_o	velocidade síncrona do estator (pu)
ω_r	velocidade do rotor (rad mec./seg)
s	escorregamento, $s = \frac{(\omega_o - \omega_r)}{\omega_o}$
T_m	torque mecânico
H	constante de inércia (seg)
X_o	reatância de magnetização (pu)
X'	reatância transitória (pu)
R₂	resistência equivalente do rotor
R_s	resistência do estator (pu)
X_s	reatância do estator (pu)
R_r	resistência do rotor (pu)
X_r	reatância de rotor (pu)
T'_o	constante de tempo p/ circuito aberto (seg)
T'	constante de tempo p/ circuito curto circuitado, $T' = T'_o \frac{X' + X_L}{X_o + X_L}$ (seg).
E'	tensão (e.m.f) transitória interna do motor, onde, $E' = E'_d + E'_q$
V	tensão nos terminais do motor, onde, $V = V_d + V_q$
X_L	reatância da linha de transmissão (pu)

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iii
SIMBOLOGIA.....	iv
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Colapso de Tensão.....	3
2.2.1 Mecanismos do Colapso de Tensão.....	4
2.3 Estabilidade de Tensão de Pequenas Perturbações ou Pequenos Sinais.....	5
2.4 Caracterização do Problema através da Teoria das Bifurcações.....	6
2.5 Metodologias de Análise da Estabilidade de Tensão.....	7
2.5.1 Métodos Estáticos.....	7
2.5.2 Métodos Dinâmicos.....	10
CAPÍTULO 3 Modelagem do Sistema.....	12
3.1 Introdução.....	12
3.2 Análise Modal da Estabilidade de Tensão.....	12
3.3 Modelagem da Carga.....	15
3.4 Modelos de Motor de Indução.....	17
3.4.1 Modelo de Bompard para o Motor de Indução.....	17

3.5	Modelagem de Bompard para a Análise da Estabilidade de Tensão de um Sistema Isolado.....	19
3.5.1	Modelagem Estática.....	20
3.5.2	Modelagem Dinâmica.....	21
3.6	Análise da Estabilidade de Tensão de um Sistema Isolado Incluindo Diferentes Características de Torque – Velocidade.....	24
3.6.1	Análise Estática: Curvas Torque x Velocidade.....	24
3.6.2	Análise Dinâmica.....	29
	Sumário.....	32
CAPÍTULO 4	Simulações e Resultados.....	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Simulações Usando a Modelagem de Bompard.....	33
4.3	Influência das Diferentes Características de Torque x Velocidade na Estabilidade Tensão.....	36
4.3.1	Torque Mecânico Independente da Velocidade.....	36
4.3.2	Torque Mecânico Dependente da Velocidade.....	39
4.4	Simulações Utilizando um Modelo de Primeira Ordem para o Motor de Indução.....	42
4.4.1	Torque Mecânico Independente da Velocidade.....	42
4.4.2	Torque Mecânico Dependente da Velocidade.....	43
4.5	Redução da Margem de Estabilidade de Tensão.....	46
CAPÍTULO 5	Conclusões.....	48

<i>Sugestões para Trabalhos futuros</i>	48
---	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
---	----

CAPÍTULO 1

Introdução

As restrições econômicas e ambientais que têm sido impostas ao desenvolvimento de novas linhas de transmissão e unidades geradoras têm levado as companhias elétricas a operarem seus sistemas de forma a maximizar a utilização de suas instalações, com o objetivo de atender a crescente demanda de carga. Em consequência disto, a **instabilidade de tensão**, caracterizada por um declínio progressivo e incontrolável das magnitudes das tensões das barras de carga (**instabilidade monotônica**), têm se constituído na principal restrição à operação estável de sistemas de energia elétrica de vários países, inclusive do Brasil. A instabilidade ou **colapso de tensão** é um processo dinâmico, regido essencialmente pelo comportamento dinâmico das cargas bem como pelos mecanismos de controle de tensão, e a principal causa de sua ocorrência reside na insuficiência de suporte reativo do sistema.

Na análise da estabilidade de tensão, abordagens dinâmica (sob condições de pequenas perturbações) e estática tem sido utilizadas para se determinar o ponto crítico de operação do sistema (**limite de estabilidade de tensão**). A abordagem dinâmica é baseada no cálculo dos autovalores do sistema linearizado em torno de um ponto de operação, enquanto que a abordagem estática é baseada nas equações dos fluxos de potência convencionais. O limite dinâmico de estabilidade é identificado pelo aparecimento de um autovalor nulo na matriz Jacobiana do sistema dinâmico, enquanto que o limite estático é identificado pela singularidade do Jacobiano do fluxo de potência.

A equivalência entre estes limites pode ser obtida se as equações do fluxo de potência forem modificadas de forma a representar o comportamento de regime permanente dos componentes dinâmicos do sistema, tais como os motores de indução [Bompard, 1994]. A vantagem decorrente é que a análise estática é muito mais conveniente do ponto de vista computacional.

No entanto, no caso de motores de indução as análises estáticas baseadas nas equações do fluxo de potência consideram o torque (mecânico) de carga constante, ou seja, independente do escorregamento. Neste trabalho, diferentes características de torque x velocidade da carga de motores de indução são consideradas

em ambas as análises (dinâmica e estática) de um sistema constituído por um motor de indução alimentado por um barramento infinito através de uma linha de transmissão, com o intuito de se constatar a manutenção ou não da equivalência entre os limites estático e dinâmico. A sua organização é apresentada a seguir.

O capítulo 2 aborda , inicialmente , conceitos básicos sobre o fenómeno da estabilidade de tensão , bem como as principais causas de seu aparecimento. Em seguida, as principais metodologias de análise (estática e dinâmica) são brevemente descritas.

O capítulo 3 apresenta , inicialmente, os fundamentos da análise modal (cálculo dos autovalores), bem como sobre a teoria das bifurcações. Em seguida é apresentada a modelagem desenvolvida neste trabalho para a análise da estabilidade de tensão.

O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações obtidas através da modelagem proposta.

O capítulo 5 apresenta as conclusões gerais deste trabalho, bem como as sugestões para possíveis continuações.

CAPÍTULO 2

Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência

2.1 - Introdução

As restrições econômicas e ambientais que têm sido impostas ao desenvolvimento de novas linhas de transmissão e unidades geradoras têm levado as concessionárias de energia elétrica a operarem seus sistemas em condições de extremo carregamento, de modo a atender ao crescente aumento na demanda da carga. Esta prática tem levado ao aparecimento de problemas associados à **instabilidade de tensão**, os quais tem se constituído no principal obstáculo à operação estável de sistemas elétricos de potência desde o início dos anos 80. A instabilidade de tensão é um fenômeno dinâmico, caracterizado, na maioria dos casos, por uma variação lenta do ponto de operação do sistema, de forma tal que as magnitudes das tensões de certas barras de carga decrescem gradualmente por um longo período de tempo (frequentemente minutos) até que uma queda abrupta ocorra. Esta instabilidade monotônica, referida na literatura como **colapso de tensão**, é devida essencialmente à incapacidade do sistema de atender a sua demanda de potência reativa.

Neste capítulo são apresentados os conceitos necessários à compreensão do fenômeno do colapso de tensão, bem como as principais metodologias utilizadas para a análise deste fenômeno.

2.2 - Colapso de Tensão

O colapso de tensão é originalmente um problema local, mas o impacto que ele causa no sistema pode se difundir levando uma parte significativa do mesmo à um perfil de baixa tensão com consequências dramáticas, tais como a ocorrência de blecautes parciais ou totais. Como exemplos podem ser citados os colapsos de tensão ocorridos nos seguintes sistemas [Kundur, 1993]:

- Sistema Sul do Brasil, em 1994;
- Sistema da Suécia, 1983;
- Sistema do Japão, em 1987;
- Sistema da Flórida, em 1982;
- Sistema da Inglaterra, em 1986.

2.2.1 - Mecanismos do Colapso de Tensão

O colapso de tensão é regido essencialmente pelo comportamento dinâmico que as cargas exibem ao drenarem do sistema a corrente necessária para satisfazer a demanda ao nível pré-perturbação. Esta característica é inerente aos motores de indução, bem como para a composição de uma barra de carga do sistema ilustrada na Figura 2.1. A resposta típica do comportamento agregado das cargas individuais para uma variação em degrau da tensão é mostrada na Figura 2.2. Este comportamento dinâmico monotônico de cargas agregadas tendendo a restaurar a demanda é a causa direta do modo monotônico do colapso de tensão. Se durante este processo de restauração da carga a potência reativa requerida não puder ser atendida devido à insuficiências na produção e transmissão de reativos, a ocorrência do colapso é inevitável. Limitações na produção de potência reativa incluem os limites de potência reativa dos geradores e compensadores estáticos, bem como a reduzida potência reativa produzida por capacitores shunt em baixas tensões.

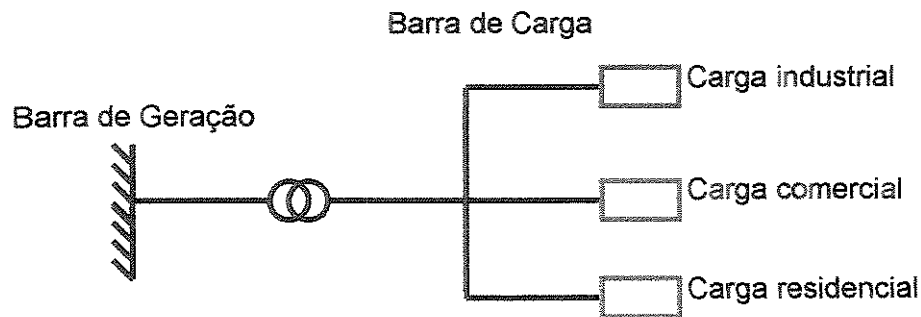


Figura 2.1 - Composição da Carga

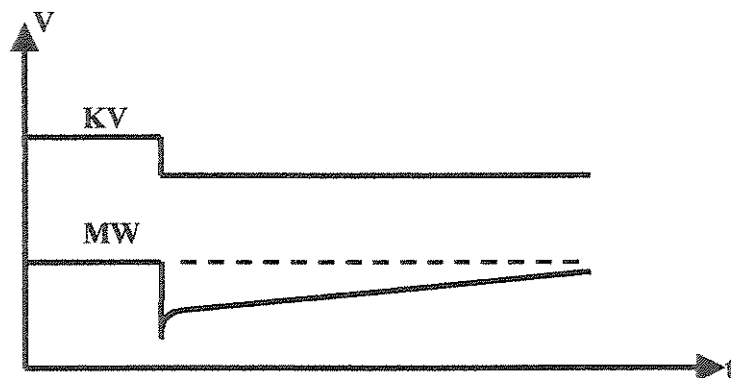


Figura 2.2 - Comportamento dinâmico típico de uma carga agregada

2.3 - Estabilidade de Tensão de Pequenas Perturbações ou Pequenos Sinais

Após a ocorrência de uma grande perturbação, tal como a perda de uma grande unidade geradora ou de uma importante linha de transmissão, a maioria das cargas do sistema apresentam um comportamento estático, isto é, de impedância ou corrente constante, as quais não causam a instabilidade de tensão. No instante em que a dinâmica das cargas passam a ter um impacto na resposta do sistema, a perturbação passa a ter um "status" de pequenos sinais. Isto é particularmente verdade para o caso de cargas compostas, tal como a ilustrada na Figura 2.1. Desta maneira, conforme demonstrado por Pal [Pal, 1992], é necessário avaliar somente a estabilidade de tensão de pequenos sinais do sistema pós - perturbação

Este aspecto do problema pode ser visualizado considerando-se o sistema radial mostrado na Figura 2.3, constituído por uma barra de carga alimentada por um barramento infinito através de uma linha de transmissão.

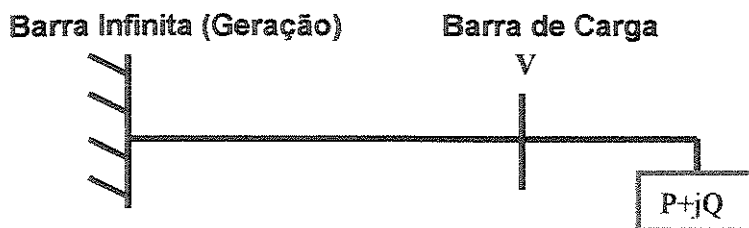


Figura 2.3 - Carga alimentada por barra infinita

Se a carga for aumentada gradativamente, mantendo-se o seu fator de potência constante, a partir do valor inicial $P_0 + jQ_0$, a curva P-V mostrada na Figura 2.4 pode ser obtida.

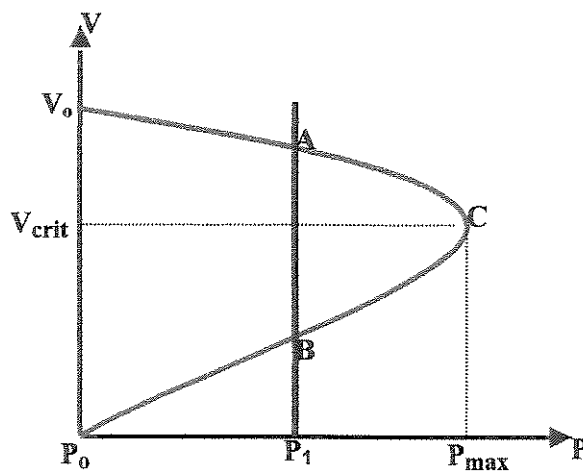


Figura 2.4 - Curva P-V para o sistema mostrado na Figura 2.3

A Figura 2.4 mostra que para uma carga de potência constante P_1 , a característica desta carga (linha vertical) intercepta a curva P-V em dois pontos, **A** e **B**, os quais correspondem a dois possíveis pontos de equilíbrio. O ponto **A**, situado na parte superior da curva P-V (solução de alta tensão), é um ponto de equilíbrio estável, enquanto que o ponto **B**, situado na parte inferior (solução de baixa tensão), é um ponto de equilíbrio instável [Kundur, 1993]. Conforme demonstrado por Pal [Pal, 1992], se o estado final do sistema após a ocorrência de uma pequena perturbação situar-se na região V_oACB da curva P-V (Figura 2.4), o sistema será estável, visto que o ponto de operação irá mover-se para o ponto de equilíbrio **A**. A região V_oACB , ou seja, a região da curva P-V à direita do ponto de equilíbrio instável **B**, é a **região de atração** do ponto de equilíbrio estável **A**.

2.4 - Caracterização do Problema através da Teoria das Bifurcações

A teoria das bifurcações propicia um entendimento do comportamento dinâmico do sistema em termos da dependência que este possui de seus parâmetros, os quais podem variar com o tempo, bem como com as condições de operação. Conforme estes parâmetros variam, mudanças qualitativas radicais no comportamento dinâmico do sistema podem ocorrer. Os valores dos parâmetros para os quais estas mudanças denominadas **bifurcações** ocorrem são denominados de **valores de bifurcação**. O ponto de equilíbrio para o qual um dos parâmetros do sistema atinge este valor crítico é denominado **ponto de bifurcação sela-nó** [Seydel, 1988]. Baseado nesta teoria, Kwatny e outros [Kawtny, 1986] demonstraram que do ponto de vista estático, o colapso de tensão de sistemas elétricos de potência pode ser caracterizado matematicamente por uma bifurcação sela-nó das equações do fluxo de potência, traduzida pela singularidade (autovalor nulo) da matriz Jacobiana. No contexto da curva P-V (Figura 2.4), a bifurcação sela-nó ocorre quando um ponto de equilíbrio instável **B** (sela) aproxima-se de um ponto de equilíbrio estável **A** (nó), conforme a demanda (parâmetro) é aumentada gradativamente. Este **ponto de bifurcação sela-nó** ou **bifurcação estática**, correspondente à fusão de dois pontos de equilíbrio, é atingido no limite máximo de transferência de potência (P_{max}), comumente referido na literatura como o "nariz" da curva P-V, bem como **ponto de colapso de tensão** ou **limite de estabilidade estática de tensão**.

2.5 - Metodologias de Análise da Estabilidade de Tensão

Embora o fenômeno do colapso de tensão seja de natureza essencialmente dinâmica, abordagens estáticas baseadas nas equações do fluxo de potência tem sido amplamente consideradas como sendo a única maneira prática de avaliar o risco de sua ocorrência. Alguns dos principais métodos estáticos relatados na literatura são abordados em seguida.

2.5.1 - Métodos Estáticos

- **Curvas P-V e Q-V**

Estes métodos são baseados nas soluções sucessivas dos fluxos de potência que são obtidas conforme um parâmetro "chave" do sistema, como por exemplo a carga total da área em estudo, é gradualmente aumentada. A estabilidade é avaliada através da geração de curvas P-V e Q-V para barras de cargas selecionadas do sistema (baseados na experiência do operador). O objetivo primário destes métodos é identificar o ponto de colapso de tensão do sistema (pontos "nariz" das curvas P-V e Q-V), associado, de maneira geral, à não convergência dos fluxos de potência convencionais. A principal desvantagem exibida por estes métodos é o alto custo computacional envolvido, bem como o de não fornecer informações sobre os mecanismos de instabilidade. Outra desvantagem reside no fato de estressarem cada barra de forma independente, o que pode deturpar as condições de estabilidade do sistema, e em consequência levar à obtenção de resultados enganosos. No entanto, estes métodos propiciam a maneira mais prática e significativa para a determinação da margem de estabilidade de tensão de um dado ponto de operação do sistema, indicada pela distância do mesmo ao ponto "nariz" das curvas P-V e Q-V [Gao, 1996].

Cabe salientar, que a não convergência do fluxo de potência pode estar associada à problemas de natureza numérica, o que pode levar a uma estimativa conservativa da margem de estabilidade. Este problema tem sido resolvido através da utilização de fluxos de potência continuados, os quais são métodos que reformulam as equações do fluxo de potência, de modo a melhorar o mal condicionamento da matriz Jacobiana nas proximidades do ponto de colapso de tensão [Dilson, 1999].

• Análise Modal Estática

Este método é essencialmente relacionado a análise da matriz Jacobiana do modelo linearizado que resulta da solução de um fluxo de potência do sistema, expresso por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

na qual

ΔP - variação incremental de potência ativa

ΔQ - variação incremental de potência reativa

$\Delta \theta$ - variação incremental do ângulo da tensão nodal

ΔV - variação incremental da magnitude da tensão nodal

Os elementos da matriz Jacobiana representam as sensibilidades entre as variações das injeções de potência e as variações das tensões nas barras do sistema, e podem ser alterados para incluir as características (estáticas) dos geradores, cargas e dispositivos de compensação reativa [Kundur, 1993].

Assumindo-se que a potência ativa das barras de carga e de geração não variam ($\Delta P=0$), a seguinte relação incremental pode ser obtida a partir da equação (2.1):

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (2.2)$$

ou

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.3)$$

na qual

$$J_R = \begin{bmatrix} J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

é a matriz jacobiana reduzida do sistema.

A análise modal envolve essencialmente a determinação dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana reduzida $\mathbf{J}_R$. Os autovalores desta matriz identificam os diferentes modos pelos quais o sistema pode se tornar instável. O significado destes modos pode ser visualizado considerando-se a relação incremental entre a tensão e a potência reativa (equação 2.2) da barra de carga do sistema isolado mostrado na Figura 2.3, dada por:

$$\lambda \Delta V = \Delta Q \quad (2.5)$$

na qual λ representa o Jacobiano reduzido $\mathbf{J}_R$, sendo para este caso um mero coeficiente. Desta maneira, λ também pode ser considerado como sendo o autovalor (modo de estabilidade de tensão) do Jacobiano. Conforme se pode notar pela equação (2.5), quanto menor for o autovalor λ , maior será a variação de tensão para uma determinada variação de potência reativa. Se o valor de $\lambda \rightarrow 0$, uma pequena variação na carga reativa irá acarretar em uma variação "infinita" da tensão (sensibilidade infinita), o que indica que o sistema atingiu seu limite de estabilidade de tensão. O sistema é estável para $\lambda > 0$ e instável para $\lambda < 0$. Ou seja, como é de se esperar, o sistema é estável quando uma injeção positiva de potência reativa na barra eleva a sua tensão.

Para um sistema multibarras, a partir do cálculo dos autovalores e autovetores da matriz Jacobiana reduzida $\mathbf{J}_R$ uma relação análoga à expressão (2.5) pode ser obtida para cada modo de estabilidade de tensão. Para o i -ésimo modo tem-se [Gao, 1992]:

$$\Delta v_i = \frac{1}{\lambda_i} \Delta q_i \quad (2.6)$$

onde Δv e Δq são denominados, respectivamente, **tensão modal** e **potência reativa modal**, e λ é o autovalor. Cada tensão modal é uma combinação linear das variações das tensões das barras do sistema, e cada potência reativa modal é uma combinação linear das variações de potência reativa. Deve ser notado que, de acordo com a expressão (2.6), o colapso de tensão se traduz pelo colapso da tensão modal e não por uma tensão "física", e este ocorre quando $\lambda_i = 0$, visto que nesta condição uma pequena variação de Δq_i acarreta em uma variação infinita de Δv_i . Se $\lambda_i > 0$ as variações de Δv_i e Δq_i ocorrem no mesmo sentido, indicando que o sistema é estável. Se $\lambda_i < 0$ as variações de Δv_i e Δq_i ocorrem em sentidos contrários, indicando que o sistema é instável.

A partir do cálculo dos autovalores e autovetores esquerdos e direitos também é possível determinar fatores de participação das barras, geradores e linhas de transmissão nos modos críticos de instabilidade de tensão, os quais fornecem informações valiosas sobre os mecanismos de instabilidade, bem como sobre as áreas mais vulneráveis ao problema de instabilidade de tensão [Gao, 1992], [Morison, 1993].

A análise modal estática é considerada atualmente como uma ferramenta padrão para a avaliação da estabilidade de tensão de sistemas reais. No entanto, cabe salientar, os resultados obtidos através desta análise são rigorosamente válidos somente para variações incrementais.

- **Índices**

Um aspecto importante da análise da estabilidade de tensão é a determinação de índices de estabilidade. Estes índices buscam quantificar o quão próximo um dado ponto de operação está do ponto de instabilidade de tensão. Desta maneira, estes indicadores podem ser utilizados, tanto no planejamento como na operação, para sinalizar a necessidade de ações corretivas para aumentar a distância entre estes pontos.

A maioria dos métodos de cálculo de índices desenvolvidos até o momento são estáticos, e portanto, estão diretamente relacionados ao fluxo de potência. A obtenção destes índices é feita através da análise da matriz Jacobiana, e portanto, baseiam-se em alguma medida do grau de singularidade desta matriz, identificada como o limite estático de estabilidade ou ponto de colapso de tensão [Vournas, 1993, 1994], [Nema, 1996], [Prada, 1993] e [Navarro, Perez, 1991].

2.5.2 - Métodos Dinâmicos

A abordagem dinâmica da estabilidade de tensão pode ser realizada através da análise modal [Rajagopalan, 1992], [Lerm, 1995], [Da Silva, 1997] ou através da simulação (não linear) no domínio do tempo [Kundur, 1993], [Deuse, 1992].

- **Análise Modal**

Como esta é a metodologia utilizada neste trabalho para a análise da estabilidade de tensão, a mesma será abordada no capítulo seguinte.

- **Simulação no Domínio do Tempo**

A simulação dinâmica do comportamento não linear do sistema propicia a reprodução mais precisa possível do fenômeno da instabilidade de tensão. Entretanto, esta abordagem envolve um alto custo computacional, bem como não propicia informações sobre o grau de estabilidade do sistema (margens). A sua aplicação é restrita aos estudos da coordenação dos dispositivos de controle e da proteção, em situações específicas de colapso de tensão [Kundur, 1993].

CAPÍTULO 3

Modelagem do Sistema

3.1 – Introdução

Neste capítulo é apresentada a modelagem utilizada para a análise da estabilidade de tensão, sob condições de pequenas perturbações, de um sistema de energia elétrica constituído por um motor de indução alimentado por um barramento infinito através de uma linha de transmissão. Inicialmente é abordado o método da análise modal utilizado para a abordagem dinâmica da estabilidade de tensão, bem como alguns conceitos fundamentais da teoria das bifurcações.

3.2 – Análise Modal da Estabilidade de Tensão

O comportamento dinâmico de um sistema de potência pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais e um conjunto de equações algébricas da forma :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (3.1)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (3.2)$$

onde $\mathbf{x}$ é o vetor de variáveis de estado e $\mathbf{y}$ é o vetor de variáveis algébricas. O conjunto de equações diferenciais ($\mathbf{f}$) descreve a dinâmica dos geradores, reguladores e cargas dinâmicas, tais como os motores de indução, enquanto que o conjunto de equações algébricas ($\mathbf{g}$) representa a rede de transmissão.

Linearizando-se as equações (3.1) e (3.2), obtêm-se :

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \Delta \mathbf{y} \quad (3.3)$$

$$0 = \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \Delta \mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \Delta \mathbf{y} \quad (3.4)$$

onde x_0 e y_0 representam, respectivamente, os valores iniciais das variáveis de estado e algébricas para um determinado ponto de operação, os quais são obtidos a partir da solução do fluxo de potência do caso base, e assumindo como sendo nulas as derivadas nas equações diferenciais.

Definindo-se:

$$J_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x_0, y_0)} \quad J_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{(x_0, y_0)} \quad (3.5)$$

$$J_3 = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{(x_0, y_0)} \quad J_4 = \left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_{(x_0, y_0)} \quad (3.6)$$

as equações (3.3) e (3.4) podem ser escritas na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde J é a matriz Jacobiana do sistema dinâmico formada pelas submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 .

Quando a submatriz Jacobiana J_4 é não-singular, as equações algébricas podem ser eliminadas para se eliminar as variáveis algébricas Δy das equações diferenciais, ou seja

$$\Delta y = -J_4^{-1} J_3 \Delta x \quad (3.8)$$

obtendo-se desta maneira a equação de estado do sistema

$$\Delta \dot{x} = [J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3] \Delta x = A \Delta x \quad (3.9)$$

onde

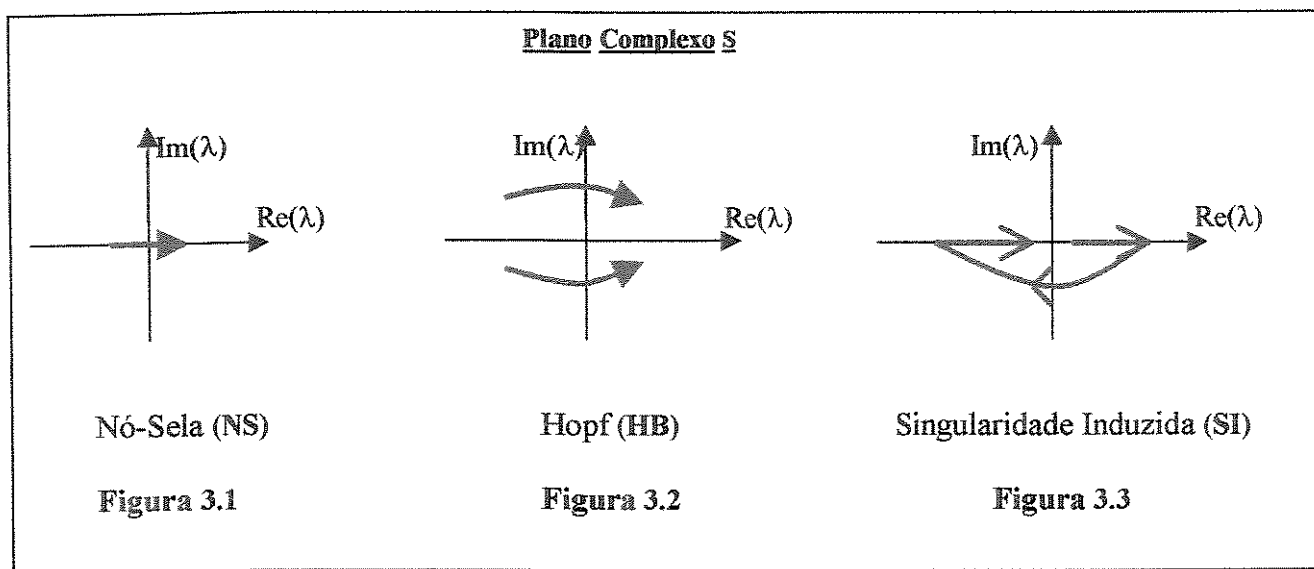
$$A = [J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3] \quad (3.10)$$

é a matriz Jacobiana reduzida ou a matriz de estados do sistema. A estabilidade local (estabilidade de pequenas perturbações) do ponto de operação em questão pode ser avaliada através da análise modal da matriz A , isto é, através do estudo de seus autovalores.

Teoria das Bifurcações

A análise dinâmica da estabilidade de tensão é feita monitorando-se os autovalores críticos (os mais próximos do eixo imaginário do plano s) conforme a carga do sistema é gradualmente aumentada. A partir de um ponto de operação estável, uma variação contínua da carga pode levar o sistema a perder a estabilidade de três maneiras, correspondendo a três diferentes trajetórias dos autovalores no plano complexo s [Kwatny, 1995]:

- 1- um autovalor real move-se para o semi-plano direito cruzando o eixo imaginário. Para um valor crítico da carga tem-se um autovalor nulo, indicando transição para a instabilidade monotônica (Figura 3.1);
- 2- um par conjugado de autovalores move-se para o semi-plano direito cruzando o eixo imaginário. Para um valor crítico da carga tem-se dois autovalores puramente imaginários, indicando transição para a instabilidade oscilatória (Figura 3.2);
- 3- um autovalor move-se para o semi-plano direito, cruzando o eixo imaginário através de pontos infinitos. Para um valor crítico da carga tem-se um autovalor tendendo para o infinito, indicando transição para a instabilidade aperiódica (Figura 3.3).



Na teoria de sistemas dinâmicos, os pontos de equilíbrio correspondentes a transição do autovalor de um semi-plano a outro são denominados **pontos de bifurcação**. As transições descritas nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, correspondem aos seguintes pontos de bifurcação:

- 1- **Bifurcação Sela-Nó (Saddle Node)**, traduzida por um autovalor nulo na matriz jacobiana do sistema dinâmico J (ou da matriz de estados A). Desta maneira, $\det(J) = \det(A) = 0$ que é a condição de singularidade do ponto de equilíbrio.
- 2- **Bifurcação de Hopf (BH)**, traduzida por um autovalor $\lambda = \pm j\beta$.
- 3- **Bifurcação de Singularidade Induzida (SI)**, traduzida por um autovalor $\lambda \rightarrow \infty$ e $\det(J_4) = 0$ que é a condição de singularidade do sistema de equações algébricas.

Indicadores da proximidade de um dado ponto de operação do sistema ao ponto de colapso de tensão, identificado como aquele em que a bifurcação de singularidade induzida ocorre, foram propostos por alguns autores [Vournas,1994]. No entanto, a ocorrência desta bifurcação nunca foi constatada em um sistema real [Cañizares,1994]. Esta bifurcação, traduzida pela singularidade do Jacobiano algébrico J_4 , indica uma perda de conexão entre os sistemas algébrico e diferencial, isto é, não é possível expressar as variáveis algébricas y em função das variáveis de estado x . A sua ocorrência indica que a modelagem utilizada para a análise do problema da instabilidade de tensão é inadequada [Van Cutsem, 1996].

Embora a bifurcação de Hopf (oscilações de tensão de amplitudes crescentes) também possa ocorrer, a instabilidade de tensão tem sido caracterizada matematicamente na literatura por uma bifurcação sela-nó (SN), correspondente a um autovalor nulo do sistema dinâmico linearizado, visto que na vasta maioria dos casos práticos relatados esta instabilidade apresentou um comportamento monotônico.

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE

3.3 – Modelagem da Carga

A instabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica é um fenômeno essencialmente dinâmico, causado pelo comportamento das cargas e de seus dispositivos de controle. Desta maneira, a modelagem dinâmica das cargas é um dos aspectos mais relevantes na análise deste fenômeno. Tendo em vista que os processos dinâmicos individuais dos diferentes tipos de carga conectadas a uma barra são impostos ao sistema de forma coletiva, este só pode “enxergar” os efeitos agregados, isto é, como devidos ao comportamento agregado das

cargas individuais. Este comportamento equivalente é denominado na literatura como comportamento agregado da carga.

Comportamento dinâmico de carga agregada

O desenvolvimento de modelos de carga agregada é baseado em medições de campo, as quais mostram que a resposta típica de uma carga agregada à uma variação em degrau da tensão é da forma mostrada na Figura (3.4) [Xu, 1993], [Hill, 1993]. É mostrado somente a resposta para a demanda de potência ativa P_d , visto que a demanda de potência reativa Q_d é qualitativamente similar. Nota-se que a variação da tensão V causa uma variação instantânea da demanda de potência P_d . Após um tempo T_p , esta demanda se recupera para um valor próximo ao de regime permanente. Este comportamento dinâmico monotônico da carga agregada, que tende a restaurar a demanda pré-perturbação, é a causa direta do modo monotônico do colapso de tensão. Desta maneira, a modelagem dinâmica de carga agregada é de fundamental importância para o entendimento do processo de colapso de tensão, e três modelos de primeira ordem baseados nesta recuperação de forma mais ou menos exponencial da carga foram propostos na literatura [Xu, 1993], [Pal, 1992], [Hill, 1993]. Embora estes modelos possam também representar de forma aproximada as dinâmicas básicas de motores de indução, Pal salienta [Pal, 1993] que estes exigem uma consideração especial na análise da estabilidade de tensão.

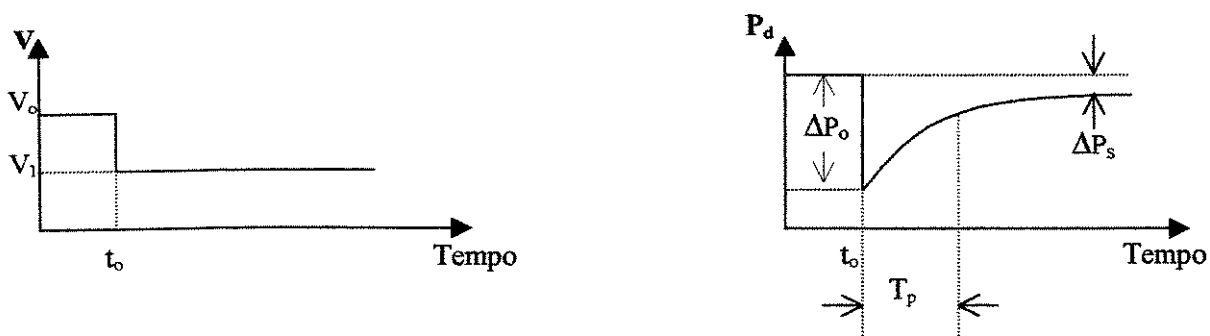


Figura 3.4 – Comportamento dinâmico de carga agregada

3.4 – Modelos de Motor de Indução

Estudos da resposta de motores de indução à uma súbita variação na magnitude de suas tensões terminais demonstram que motores de indução de grande potência se caracterizam por apresentar um transitório mais oscilatório (menos amortecido) do que pequenos motores. Entretanto, em ambos os casos, experimentos mostram que este transitório desaparece rapidamente (em torno de 1 segundo), estabelecendo-se em seguida uma recuperação das condições de regime permanente na forma quase exponencial, como ilustrada na Figura (3.4). Esta recuperação é mais lenta para o caso de grandes motores de indução, e é determinada, principalmente, pela inércia do motor e pela dinâmica do fluxo de rotor.

Embora existam vários tipos de motores de indução, em estudos de estabilidade de sistemas de potência, modelos agregados são comumente utilizados. Entretanto, se os motores conectados ao mesmo barramento não são similares, pode ser necessário utilizar mais do que um modelo agregado para se obter uma representação mais precisa da carga “vista” pelo barramento. Um modelo de terceira ordem é, em geral, considerado como sendo adequado para representar o comportamento dinâmico agregado de motores de indução [Taylor, 1993], [Kundur, 1993], e neste trabalho é utilizado o modelo proposto em [Bompard, 1995], referido aqui como modelo de Bompard.

3.4.1 – Modelo de Bompard para o Motor de Indução

Modelo Dinâmico

Considerando as seguintes hipóteses:

- perdas por efeito Joule e no núcleo de ferro são desprezíveis;
- linearidade magnética;
- parâmetros do rotor independentes da velocidade do rotor;
- transitórios do estator desprezíveis;

a dinâmica do motor de indução é representada pelo modelo de terceira ordem descrito pelo circuito equivalente do estator mostrado na Figura (3.5), e pelas seguintes equações diferenciais [Bompard, 1995]:

- equação eletromagnética

$$\frac{d\bar{E}'}{dt} = -\frac{1}{T_o'} [\bar{E}' - j(X_o - X')\bar{I}] - js\omega_o \bar{E}' \quad (3.11)$$

- equação eletromecânica

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} [T_m(s) - T_e(s, v)] = \frac{1}{2H} [T_m \omega_o - R_e (\bar{E}' \bar{I}^*)] \quad (3.12)$$

onde E' representa a tensão interna do motor de indução, s representa o escorregamento do rotor em relação à velocidade síncrona e X' é a reatância transitória.

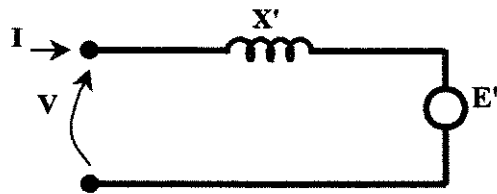


Figura 3.5 – Circuito equivalente dinâmico do motor de indução

Modelo de Regime Permanente

Igualando-se a zero as derivadas das variáveis de estado nas equações (3.11) e (3.12), obtém-se o modelo de regime permanente para o motor de indução [Bompard, 1995], mostrado na Figura (3.6), onde o valor de R_2 é dado por:

$$R_2 = \frac{(X_o - X')}{\omega_o T_o'} \quad (3.13)$$

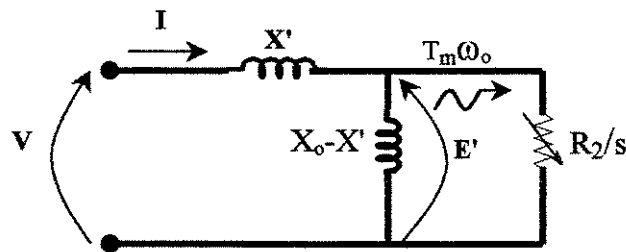


Figura 3.6 – Circuito equivalente de regime permanente do motor de indução

3.5 – Modelagem de Bompard para a Análise da Estabilidade de Tensão de um Sistema Isolado

O modelo do motor de indução (MI) proposto por Bompard et al [Bompard, 1995] foi utilizado para a análise da estabilidade de tensão do sistema isolado mostrado na Figura (3.7), constituído por um motor de indução alimentado por um gerador síncrono através de uma linha de transmissão puramente reativa. Nesta análise, o controle de tensão do gerador é suposto ideal, isto é, a tensão de sua barra terminal é perfeitamente controlada (barramento infinito). Na Figura (3.8) é mostrado o modelo estático resultante para este sistema. Conforme demonstrado em [Da Costa, 1998] e [Da Silva, 1998], a inclusão de uma modelagem detalhada para o gerador é necessária somente se este estiver equipado com um sistema de excitação eletromecânico, caracterizado por uma velocidade de resposta lenta. Neste caso, a hipótese de barramento infinito pode acarretar em erros, visto que não é possível detectar a possibilidade da ocorrência da bifurcação de Hopf, associada com o controle de tensão do gerador.

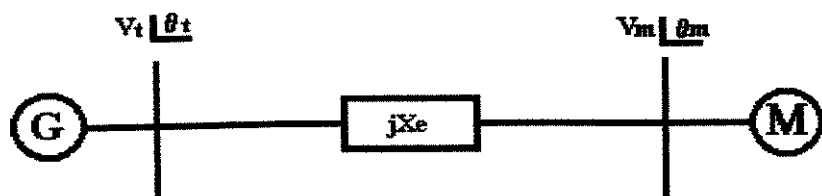


Figura 3.7 – Sistema Gerador – Linha – Motor de Indução

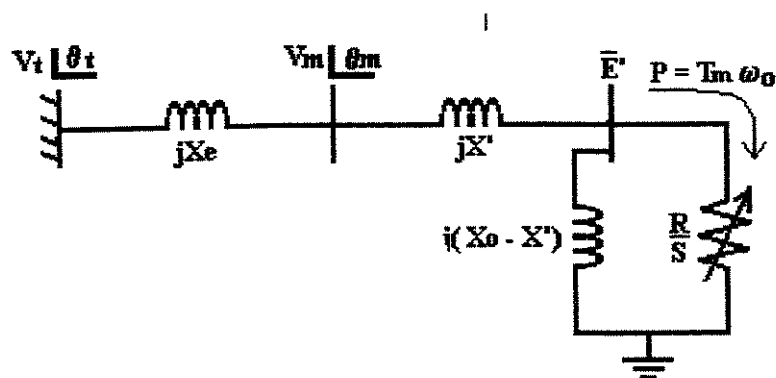


Figura 3.8 – Modelo de regime permanente para o sistema da Figura 3.7

3.5.1 – Modelagem Estática

Como pode-se notar na Figura 3.8, a representação do motor de indução (tensão interna e demandas de potências ativa e reativa) exige a criação de uma barra auxiliar. Se o torque mecânico T_m é considerado constante (independente da velocidade), esta estrutura de duas barras, uma representando os terminais do motor de indução e a outra representando a f.e.m. transitória E' e potência de entreferro $P=T_m\omega_o$, pode ser reformulada conforme mostrado na Figura (3.9).

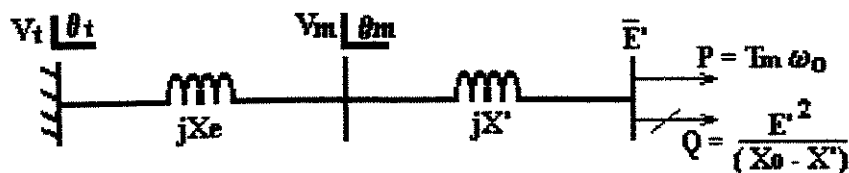


Figura 3.9 – Fluxo de carga modificado para representar o modelo do MI em regime permanente

Como pode-se notar na Figura(3.9), a potência ativa demandada pelo motor é constante (independente da tensão interna), sendo representada por um modelo de potência constante igual a potência de entreferro, enquanto que a demanda de potência reativa tem uma característica de impedância constante, e portanto, é uma função não linear da tensão interna do motor. Desta maneira, o sistema mostrado na Figura 3.9 pode ser interpretado como um problema de fluxo de potência, tornando possível, por conseguinte, a realização de uma análise estática da estabilidade de tensão deste sistema isolado. Neste caso, o limite estático de estabilidade de tensão é identificado pela singularidade do Jacobiano do fluxo de potência (bifurcação estática), traduzido pelo Jacobiano convencional modificado pela inclusão da barra interna do motor de indução. Em outras palavras, o limite estático de estabilidade é identificado pela singularidade do Jacobiano convencional modificado pela inclusão das características de regime permanente do motor de indução.

3.5.2 – Modelagem Dinâmica

A modelagem dinâmica do motor de indução conectado ao barramento infinito é obtida desmembrando as equações (3.11) e (3.12) nas partes real e imaginária, resultando em:

$$\frac{dE'_d}{dt} = s\omega_o E'_q - \frac{1}{T'} \left(E'_d - V_t \frac{X_o - X'}{X_o + X_e} \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = -s\omega_o E'_d - \frac{1}{T'} E'_q \quad (3.15)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} \left(T_m \omega_o + \frac{V_t}{X' + X_e} E'_q \right) \quad (3.16)$$

na qual

$$T' = T_o' \frac{X' + X_L}{X_o + X_L} \quad (3.17)$$

Utilizando-se um fluxo de potência para obter as condições iniciais das variáveis de estado e linearizando-se as equações (3.14), (3.15) e (3.16) em torno de um ponto de operação, obtém-se a matriz de estado do sistema dinâmico:

$$J = \begin{bmatrix} -1/T' & s\omega_o & \omega_o E'_q \\ -s\omega_o & -1/T' & -\omega_o E'_d \\ 0 & \frac{V_t}{2H(X' + X_e)} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

A análise modal é realizada calculando-se os autovalores da matriz de estado J para cada nível de carga, obtendo-se assim a trajetória dos autovalores críticos do sistema dinâmico. Isto possibilita identificar o limite dinâmico de estabilidade de tensão, caracterizado por uma bifurcação sela-nó (autovalor real cruzando o eixo imaginário).

• Pontos de Equilíbrio

Os pontos de equilíbrio em regime permanente podem ser obtidos a partir das equações (3.14), (3.15), e (3.16), igualando-se a zero as derivadas das variáveis de estado. No entanto, se o torque mecânico T_m é independente da velocidade, esses pontos de equilíbrio podem também ser obtidos através das soluções do fluxo de potência para o sistema mostrado na Figura (3.9), onde a barra slack representa a barra infinita V_i e a barra PQ representa o motor de indução com tensão E' e potência ativa $T_m\omega_o$. Ou seja, neste caso é possível obter-se uma curva PV (ilustrada na Figura 3.10), a qual mostra como a tensão interna do motor E' varia em relação a potência de entreferro $P = T_m\omega_o$.

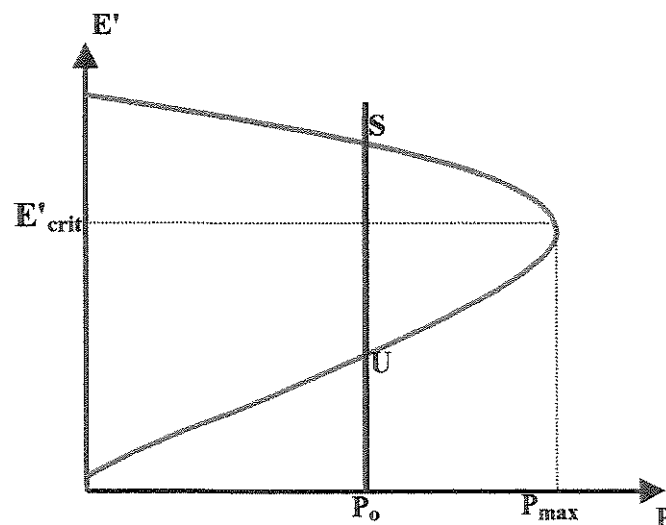


Figura 3.10 – Curva PV

Assim, para cada valor da potência requerida pelo motor existem dois pontos de equilíbrio (pontos S e U na Figura 3.10): um na parte superior (estável) e outro na parte inferior (instável). Estes pontos S e U são correspondentes às soluções para escorregamento baixo e alto, respectivamente. Ou seja, a parte superior da curva PV representa as soluções para escorregamento baixo, enquanto que a parte inferior representa as soluções para escorregamento alto. O “nariz” da curva PV ($P_{\max}$) identifica o limite estático de estabilidade de tensão e corresponde à condição de máximo torque desenvolvido pelo motor.

• Equivalência entre as Análises Estática e Dinâmica

Para validar a abordagem estática da estabilidade de tensão é necessário justificar que as conclusões obtidas via métodos estáticos são equivalentes às obtidas através da análise dinâmica convencional (análise modal). Visto que na modelagem apresentada anteriormente todas as características dinâmicas e estáticas dos componentes são representadas, é possível realizar comparações entre as análises dinâmica (análise modal) e estática (fluxo de potência) do problema. Ou seja, é possível comparar os limites dinâmico e estático de estabilidade de tensão do sistema, identificados, respectivamente, pela bifurcação sela-nó (autovalor nulo) do sistema dinâmico linearizado (bifurcação dinâmica) e pela singularidade do Jacobiano do fluxo de potência (bifurcação estática). Conforme é mostrado em [Bompard,1995], bem como no capítulo 4 deste trabalho, estas bifurcações coincidem, ou seja, ocorrem para o mesmo carregamento, e portanto, as abordagens estática e dinâmica apresentadas anteriormente são equivalentes. Isto justifica a utilização de métodos estáticos baseados nas equações do fluxo de potência para a avaliação da estabilidade de tensão, os quais possuem evidentes vantagens computacionais em relação a abordagem dinâmica. No entanto, a abordagem via estes métodos só é possível para o caso de torque mecânico constante, visto que a dependência do torque mecânico com a velocidade só pode ser representada de forma aproximada nas equações do fluxo de potência. Tendo por objetivo analisar a influência de outras características de torque-velocidade na estabilidade de tensão, uma metodologia alternativa é adotada neste trabalho, a qual é apresentada em seguida.

3.6 – Análise da Estabilidade de Tensão de um Sistema Isolado Incluindo Diferentes

Características Torque – Velocidade da Carga

Utilizando os modelos de cargas dependentes da tensão disponíveis nos programas de fluxo de potência é possível representar, aproximadamente, a dependência do torque mecânico com a velocidade. No entanto, uma abordagem mais simples e precisa do problema pode ser realizada através da utilização das curvas de torque x velocidade do motor de indução. Neste trabalho, esta metodologia é adotada para a avaliação estática da estabilidade de tensão do sistema isolado mostrado na Figura (3.11), para o qual é utilizado o modelo de Bompard, descrito anteriormente, para representar o motor de indução. O desenvolvimento desta metodologia estática, bem como da dinâmica (análise modal), para a análise da estabilidade de tensão deste sistema isolado é apresentado em seguida.

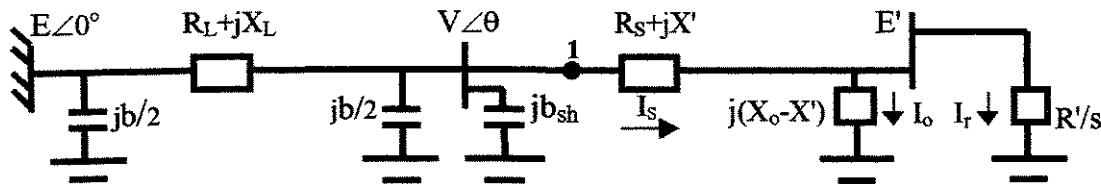


Figura 3.11

3.6.1 – Análise Estática: Curvas Torque x Velocidade

Para se realizar a avaliação da estabilidade de tensão através das curvas torque x velocidade, o sistema mostrado na Figura (3.11) é simplificado pela substituição do circuito à esquerda do ponto 1 pelo seu equivalente Thevenin, conforme ilustrado na Figura (3.12). A tensão e a impedância de Thevenin correspondentes são dadas por:

$$V_{th1} = \frac{E \left[\frac{1}{j \left(\frac{b}{2} + b_{sh} \right)} \right]}{R_L + jX_L + \left[\frac{1}{j \left(\frac{b}{2} + b_{sh} \right)} \right]} ; \quad Z_{th1} = \frac{(R_L + jX_L) \cdot \left[\frac{1}{j \left(\frac{b}{2} + b_{sh} \right)} \right]}{(R_L + jX_L) + \left[\frac{1}{j \left(\frac{b}{2} + b_{sh} \right)} \right]} \quad (3.19)$$

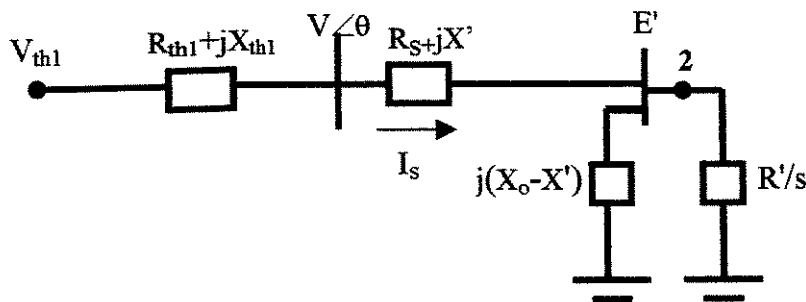


Figura 3.12

Uma simplificação adicional é obtida pela substituição do circuito à esquerda do ponto 2 na Figura(3.12) pelo seu equivalente Thevenin. A tensão e a impedância de Thevenin correspondentes são dadas por:

$$\bar{V}_{th2} = \frac{V_{th1} \cdot j(X_o - X')}{Z_{th1} + R_s + jX' + j(X_o - X')} ; \quad Z_{th2} = \frac{(Z_{th1} + R_s + jX') \cdot j(X_o - X')}{Z_{th1} + R_s + jX' + j(X_o - X')} \quad (3.20)$$

O sistema equivalente resultante é mostrado na Figura 3.13 :

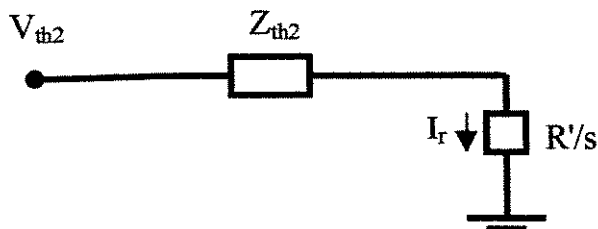


Figura 3.13

Como se pode notar nesta Figura, a corrente do rotor é dada por:

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{V}_{th2}}{\left(R_{th2} + \frac{R'}{s}\right) + jX_{th2}} \quad (3.21)$$

na qual

$$Z_{th2} = R_{th2} + jX_{th2} \quad (3.22)$$

Sendo

$$\bar{I}_r \cdot \bar{I}_r^* = |\bar{I}_r|^2 = \frac{|V_{th2}|^2}{\left(R_{th2} + \frac{R'}{s}\right)^2 + X_{th2}^2} \quad (3.23)$$

a potência de entreferro é expressa por:

$$P_g = \frac{R'}{s} |\bar{I}_r|^2 = \frac{\left(\frac{R'}{s}\right) |V_{th2}|^2}{\left(R_{th2} + \frac{R'}{s}\right)^2 + X_{th2}^2} \quad (3.24)$$

Sendo a potência mecânica interna desenvolvida dada por:

$$P_e = (1 - s) P_g \quad (3.25)$$

na qual

$$P_e = T_e \cdot \omega_r \quad (3.26)$$

e

$$\omega_r = \frac{\omega_s}{\frac{p}{2}} (1 - s) \quad (3.27)$$

o torque eletromagnético por fase desenvolvido pelo motor a ser convertido em torque mecânico é dado por:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \left(\frac{p}{2\omega_s}\right) \cdot \frac{\left(\frac{R'}{s}\right) \cdot |V_{th2}|^2}{\left(R_{th2} + \frac{R'}{s}\right)^2 + (X_{th2})^2} \quad (3.28)$$

A curva típica torque x escorregamento (ou torque x velocidade) correspondente é mostrada na Figura 3.14.

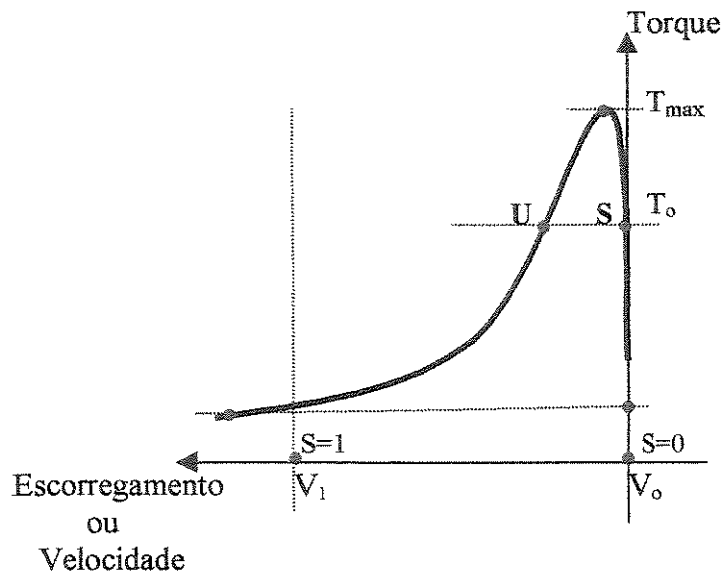


Figura 3.14 - Curva: Torque x Velocidade

As curvas torque x velocidade são dadas, em geral, para tensão constante no terminal do motor. Isto é adequado para se estudar o caso de um único motor alimentado por um sistema forte, quando então a tensão terminal é independente das condições de operação do motor. No caso do sistema isolado mostrado na Figura (3.13), o modelo do motor de indução utilizado representa um conjunto agregado de motores de indução. Este motor equivalente “enxerga” uma tensão constante somente na barra infinita. A sua tensão terminal não é uma variável independente, visto que depende das condições de operação (escorregamento), e, portanto, neste caso a determinação das condições críticas não é baseada na tensão terminal e sim na tensão do barramento infinito.

• Pontos de Equilíbrio

Conforme ilustrado na Figura 3.14, para o caso em que o torque mecânico independe da velocidade, existem dois pontos de operação possíveis do motor (pontos S e U), quando $T_o < T_{max}$. No ponto S um pequeno aumento do escorregamento produz um excesso de torque eletromagnético, o qual, de acordo com a equação (3.12), tende a reduzir o escorregamento, trazendo, portanto, o ponto de operação de volta ao ponto S. De maneira similar, um pequeno decréscimo do escorregamento cria um torque que traz de volta no ponto de operação S. Assim, pode-se concluir que o ponto S é um ponto de operação estável. O contrário ocorre para o ponto U: um pequeno aumento do escorregamento resulta em um déficit do torque elétrico, de tal forma que o rotor irá desacelerar, aumentando ainda mais o escorregamento, até atingir o ponto de parada ($s = 1$). Por outro lado, para um pequeno decréscimo

do escorregamento a partir do ponto U irá resultar em um excesso de torque elétrico, e, portanto, o motor irá acelerar até atingir o ponto de equilíbrio S. Assim, pode-se concluir que o ponto U é um ponto de operação instável.

Quando $T_o > T_{\max}$, não existe nenhum ponto de interseção entre as duas características de torque. Neste caso, visto que não existe nenhum ponto de equilíbrio, o motor irá desacelerar até parar ($s = 1$). Quando $T = T_{\max}$, o motor de indução possui um único ponto de operação correspondente a condição de máximo torque, o qual é identificado como sendo uma **bifurcação sela-nó**. Cabe salientar que neste caso (torque mecânico constante), os pontos de equilíbrio S e U da curva torque x velocidade (Figura 3.14) são correspondentes aos pontos S e U da curva PV mostrada na Figura 3.10, e, portanto, as análises da estabilidade de tensão através destas duas metodologias são equivalentes.

- **Torque mecânico da carga :**

A influência das características do torque mecânico x velocidade no comportamento do sistema mostrado na Figura 3.11 pode ser avaliada através da análise de bifurcações. Expressando o torque mecânico da carga como:

$$T_m = \left(\frac{k}{\omega_o} \right) \omega_r^n \quad (3.29)$$

o parâmetro k pode ser utilizado como um parâmetro de bifurcação para se estudar as variações dos pontos de equilíbrio que resultam das variações do torque de carga, isto é, da demanda de potência da carga. Três características particulares de torque x velocidade são consideradas: torque constante ($n = 0$), torque proporcional a velocidade ($n = 1$) e torque proporcional ao quadrado da velocidade ($n = 2$).

Estas três características podem ser combinadas para representar uma composição de cargas mecânicas na forma:

$$T_m = T_p + k \cdot \left(a + b\omega_r + c\omega_r^2 \right); \quad (3.30)$$

onde T_p corresponde ao torque que a carga exige na partida, e a , b , e c são parâmetros que determinam a composição da carga.

3.6.2 – Análise Dinâmica

A avaliação dinâmica da estabilidade de tensão do sistema mostrado na Figura 3.12 é realizada através da análise modal da matriz de estados do sistema. A obtenção desta matriz de estados é mostrada em seguida.

O comportamento dinâmico do sistema é representado pelas seguintes equações diferenciais [Kundur, 1993]:

$$\bullet \quad \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_o} [E'_d + (X_o - X')I_q] + s\omega_s E'_q \quad (3.31)$$

$$\bullet \quad \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_o} [E'_q - (X_o - X')I_d] - s\omega_s E'_d \quad (3.32)$$

$$\bullet \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} \{T_m - T_e\} \quad (3.33)$$

onde

$$T_e = \frac{E'_d I_d + E'_q I_q}{\omega_s} \quad (3.34)$$

e

$$\bar{I} = I_d + jI_q \quad ; \quad \bar{E}' = E'_d + jE'_q \quad (3.35)$$

Considerando que

$$\bar{V}_{th1} = V_{ad} + jV_{aq} \quad ; \quad R_a = R_{th1} + R_s \quad e \quad X_a = X_{th1} + X' \quad (3.36)$$

a corrente I é dada por:

$$\bar{I} = \frac{V_{th1} - E'}{\underbrace{(R_{th1} + R_s)}_{R_a} + j\underbrace{(X_{th1} + X')}_{X_a}} \quad (3.37)$$

ou ainda,

$$\bar{I} = \frac{R_a(V_{ad} - E'_d) + X_a(V_{aq} - E'_q) + jR_a(V_{aq} - E'_q) - jX_a(V_{ad} - E'_d)}{R_a^2 + X_a^2} \quad (3.38)$$

Portanto, as componentes de eixo direto e eixo em quadratura da corrente I são dadas por:

$$\bar{I}_d = \frac{R_a(V_{ad} - E'_d) + X_a(V_{aq} - E'_q)}{R_a^2 + X_a^2} \quad (3.39)$$

$$\bar{I}_q = \frac{R_a(V_{aq} - E'_q) - X_a(V_{ad} - E'_d)}{R_a^2 + X_a^2} \quad (3.40)$$

Substituindo-se estas expressões de I_d e I_q nas equações (3.31), (3.32) e (3.33), obtém-se:

$$\bullet \quad \dot{E}'_d = \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_o} \left\{ E'_d + \frac{(X_o - X')}{R_a^2 + X_a^2} [R_a(V_{aq} - E'_q) - X_a(V_{ad} - E'_d)] \right\} + s\omega_s E'_q \quad (3.41)$$

$$\bullet \quad \dot{E}'_q = \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_o} \left\{ E'_q - \frac{(X_o - X')}{R_a^2 + X_a^2} [R_a(V_{ad} - E'_d) + X_a(V_{aq} - E'_q)] \right\} - s\omega_s E'_d \quad (3.42)$$

$$\bullet \quad \dot{s} = \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} \{T_m - T_e\} \quad (3.43)$$

sendo que,

$$T_e = \frac{1}{\omega_s (R_a^2 + X_a^2)} \left\{ E'_d [R_a(V_{ad} - E'_d) + X_a(V_{aq} - E'_q)] + E'_q [R_a(V_{aq} - E'_q) - X_a(V_{ad} - E'_d)] \right\} \quad (3.44)$$

e

$$T_m = T_p + K \left[a + b \left(\frac{\omega_s}{p/2} \right) (1-s) + c \left(\frac{\omega_s}{p/2} \right)^2 (1-s)^2 \right] \quad (3.45)$$

- Linearizando-se as equações (3.41), (3.42) e (3.43), obtém-se:

$$\frac{d\Delta S}{dt} = \frac{1}{2H} \left\{ \overbrace{T_o \left[-b \left(\frac{\omega_s}{p/2} \right) - 2c \left(\frac{\omega_s}{p/2} \right)^2 (1-s) \right]}^{A_1} \right\} \Delta S \quad (3.46)$$

$$- \frac{1}{2H\omega_s (R_a^2 + X_a^2)} \left\{ \overbrace{R_a (V_{ad} - E'_d) + X_a (V_{aq} - E'_q)}^{A_2} \right\} \Delta E'_d$$

$$- \frac{1}{2H\omega_s (R_a^2 + X_a^2)} \left\{ \overbrace{R_a (V_{aq} - E'_q) + X_a (V_{ad} - E'_d)}^{A_3} \right\} \Delta E'_q$$

$$\frac{d\Delta E'_d}{dt} = \overbrace{\omega_s E'_q \Delta S}^{A_4} - \frac{1}{T_o'} \left\{ \overbrace{1 + \frac{X_a (X_o - X')}{R_a^2 + X_a^2}}^{A_5} \right\} \Delta E'_d + \left\{ \overbrace{\frac{1}{T_o'} \cdot \frac{R_a (X_o - X')}{(R_a^2 + X_a^2)} + s\omega_s}^{A_6} \right\} \Delta E'_q \quad (3.47)$$

$$\frac{d\Delta E'_q}{dt} = \overbrace{-\omega_s E'_d \Delta S}^{A_7} - \left\{ \overbrace{\frac{1}{T_o'} \cdot \frac{R_a (X_o - X')}{R_a^2 + X_a^2} + s\omega_s}^{A_8} \right\} \Delta E'_d - \frac{1}{T_o'} \left\{ \overbrace{1 + \frac{X_a (X_o - X')}{R_a^2 + X_a^2}}^{A_9} \right\} \Delta E'_q \quad (3.48)$$

Desta maneira, as equações (3.46), (3.47) e (3.48) podem ser colocadas na forma:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x$$

onde x é o vetor de variáveis de estado,

$$x = \left[E'_d, E'_q, S \right]^T \quad (3.49)$$

e A é a matriz de estados, dada por:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

A análise da estabilidade dinâmica do sistema é realizada através do estudo dos autovalores de A , onde

$$A_1 = \frac{\partial \dot{s}}{\partial s} ; A_2 = \frac{\partial \dot{s}}{\partial E_d} ; A_3 = \frac{\partial \dot{s}}{\partial E_q} ; \quad (3.51)$$

$$A_4 = \frac{\partial \dot{E}_d}{\partial s} ; A_5 = \frac{\partial \dot{E}_d}{\partial E_d} ; A_6 = \frac{\partial \dot{E}_d}{\partial E_q} ; \quad (3.52)$$

$$A_7 = \frac{\partial \dot{E}_q}{\partial s} ; A_8 = \frac{\partial \dot{E}_q}{\partial E_d} \text{ e } A_9 = \frac{\partial \dot{E}_q}{\partial E_q} \quad (3.53)$$

Sumário

Foram apresentadas neste capítulo noções básicas a respeito do processo de modelagem da carga e da rede em questão, sendo ressaltado, os modelos estático e o dinâmico do motor de indução como primordiais na representação do problema de estabilidade de tensão, para pequenas perturbações, visto que a instabilidade de tensão é regida pela dinâmica da carga.

A influência da modelagem do motor de indução na estabilidade de tensão será abordada no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

Simulações e Resultados

4.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentadas e discutidas várias simulações obtidas através da modelagem desenvolvida no capítulo 3 para a análise da estabilidade de tensão do sistema descrito na Figura 3.11. Em todas as simulações são considerados incrementos de carga a partir de uma carga inicial, sendo que a análise modal é aplicada para cada nível de carga. Inicialmente são apresentadas simulações obtidas através da modelagem de Bompard (item 3.5 do capítulo 3), a qual considera o torque mecânico independente da velocidade, de modo a ilustrar a equivalência entre as análises estática (fluxo de potência) e dinâmica (análise modal). Em seguida são apresentados os resultados das simulações relativas às diferentes características de torque mecânico da carga com o intuito de validar ou não a abordagem via fluxos de potência convencionais.

4.2 - Simulações Usando a Modelagem de Bompard

Neste item são apresentados resultados de simulações realizadas para o sistema descrito nas Figuras 3.7 e 3.8 do capítulo 3. Os parâmetros do motor de indução e da linha de transmissão são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Motor de Indução e da Linha de Transmissão

X'	T_o	H	X_0	X_L	V_t
0.2	1.0	1.0	3.3	0.2	1

Na Figura 4.1 são mostradas as curvas PV relacionadas às barras interna e terminal do motor, as quais são obtidas através da resolução do problema estático mostrado na Figura 3.9. Pode-se notar que para cada valor de potência ativa requerida pelo motor existem dois pontos de equilíbrio em cada uma dessas curvas, um na parte superior e outro na parte inferior. Desta forma, o limite de estabilidade de tensão ocorre no ponto de máxima transferência de potência (P_{max}), comumente referido na literatura como “nariz” da curva PV. Observa-se

também que as tensões interna do motor e da barra de carga do sistema atingem este ponto no mesmo nível de carga.

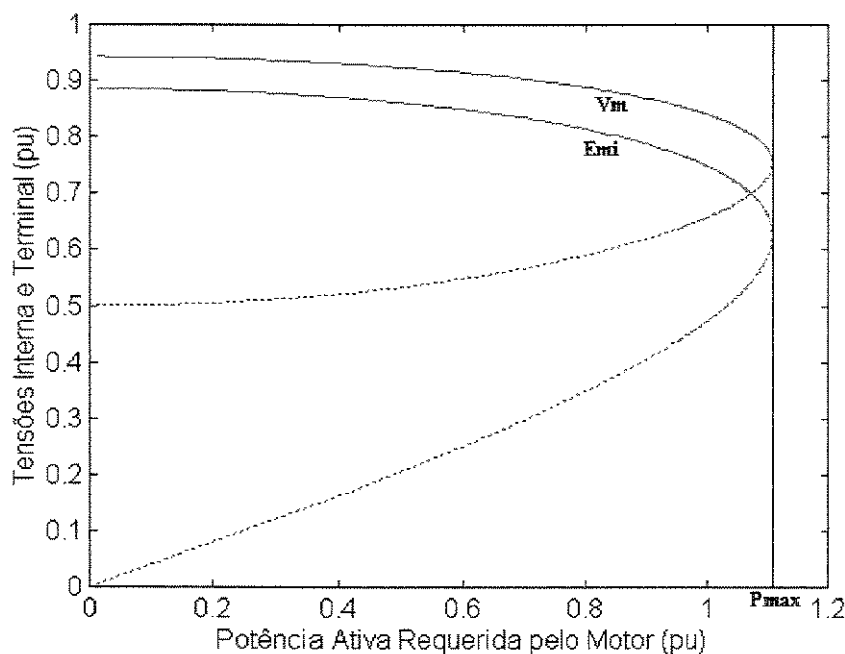


Figura 4.1 – Solução do modelo estático

A equivalência entre as análises estática (fluxo de potência) e dinâmica (análise modal) neste caso pode ser constatada nas Figuras 4.2 e 4.3. Na Figura 4.2 são mostrados os valores do determinante do Jacobiano do fluxo de potência modificado pela inclusão da barra interna do motor de indução (J_{mod}) ao longo de toda a curva PV. Conforme pode-se notar, a singularidade deste Jacobiano ocorre exatamente no ponto de máxima transferência de potência (P_{max} na Figura 4.1), o qual corresponde ao máximo torque que o motor pode desenvolver. A Figura 4.3 mostra a parte real do autovalor crítico da matriz de estado do sistema dinâmico J (equação 3.18) em função da demanda de carga. Conforme pode-se notar, existe a ocorrência de uma bifurcação do tipo sela-nó (autovalor nulo) exatamente no ponto de potência máxima.

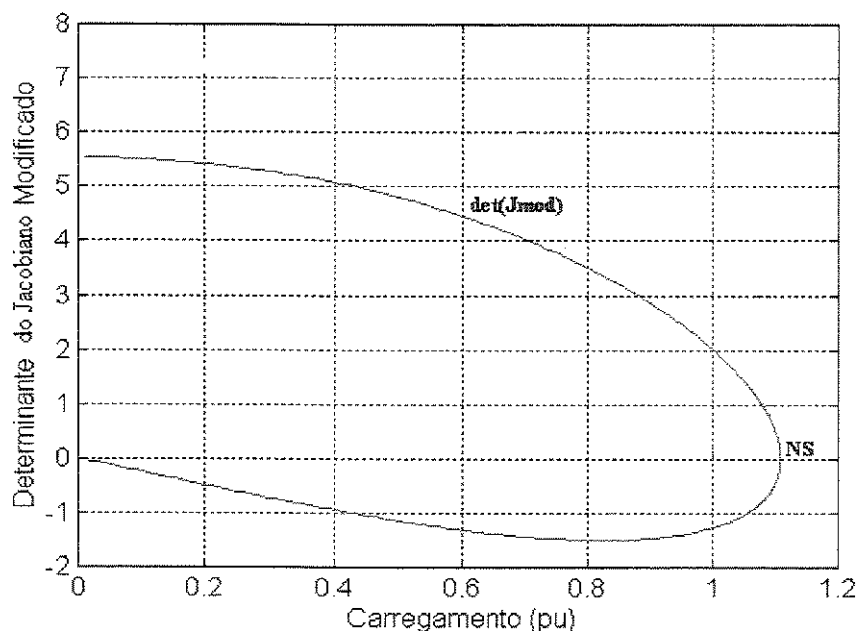


Figura 4.2 – Análise estática

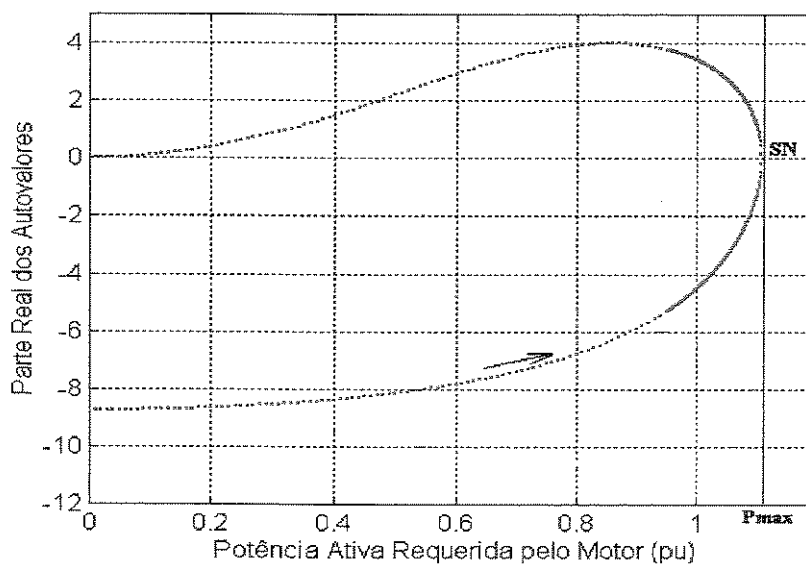


Figura 4.3 – Análise modal da matriz J

Desta forma, quando a barra de geração é suposta como tendo um controle de tensão ideal, as análises estática e dinâmica fornecem os mesmos resultados, e portanto, a avaliação da estabilidade de tensão pode ser feita através de simples alterações no modelo do fluxo de potência convencional. No entanto, tendo em vista que esta abordagem baseada nas equações do fluxo de potência considera o torque mecânico independente da

velocidade, a validação ou não desta abordagem é avaliada em seguida através da modelagem proposta neste trabalho para diferentes características do torque mecânico x velocidade.

4.3 - Influência das Diferentes Características de Torque x Velocidade na Estabilidade Tensão

Os resultados das simulações que são apresentadas em seguida foram realizadas para o sistema mostrado na Figura 3.11 através da modelagem apresentada nos itens 3.6.1 (Análise Estática) e 3.6.2 (Análise Dinâmica) do Capítulo 3, para diferentes características de Torque x Velocidade.

Todas as simulações foram realizadas considerando os dados da linha de transmissão mostrados na Tabela 4.2 e um motor de indução de 500 HP, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 4.3.

- **Dados da linha(pu)**

Tabela 4.2

E	b	R	X	b _{sh}
1.0	0	0.02	0.2	0

- **Dados do motor de indução**

Tabela 4.3

Potência	R _s	X _s	X _o	R _r	X _r	W _o	f	p	J
500 HP	0.018486	0.085093	3.81152	0.013194	0.085093	1	60	4	0.5264

4.3.1 – Torque Mecânico Independente da Velocidade

Na Tabela 4.4 são mostrados os valores dos parâmetros a, b e c (equação 3.30) para esta característica de torque mecânico.

Tabela 4.4

T _p	a	b	c
0	1	0	0

Na Figura 4.5 são mostrados os resultados obtidos através da análise modal (dinâmica), isto é, as trajetórias das partes reais dos autovalores críticos no plano $\text{Re}(\text{Autovalor}) \times \text{Torque Eletromecânico}$. O autovalor com somente parte real negativa é associado às tensões internas E'_d e E'_q . Visto que este autovalor é complexo, conforme se pode notar na Figura 4.6, constata-se, portanto, a impossibilidade de ocorrência de instabilidade oscilatória. A instabilidade de tensão é ditada pela trajetória do outro autovalor (associado ao escorregamento), o qual, conforme também se pode notar na Figura 4.6, é sempre real. Na Figura 4.5 se pode constatar que esta instabilidade (monotônica), traduzida por uma bifurcação sela-nó (autovalor real cruzando o eixo imaginário), ocorre no ponto de potência máxima ($T_{\max}$). Ou seja, as bifurcações dinâmica e estática (“nariz” da curva mostrada na Figura 4.4) coincidem. Isto demonstra, portanto, a equivalência, também mostrada no item 4.2, entre as análises dinâmica e estática para esta característica de torque mecânico.

A existência ou não desta equivalência para outras características de torque mecânico é avaliada pelos resultados de simulações que são apresentadas em seguida. Ou seja, estas simulações tem por objetivo avaliar se as diferenças entre os pontos de carregamento para os quais ocorrem as bifurcações sela-nó estática e dinâmica são significativas, com o intuito de validar ou não a abordagem via os fluxos de potência convencionais.

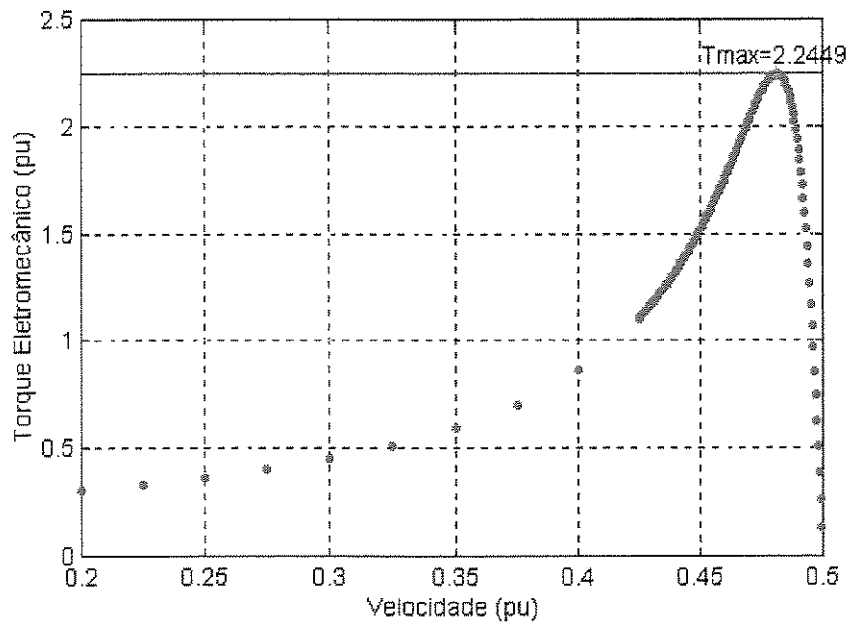


Figura 4.4 – Análise Estática

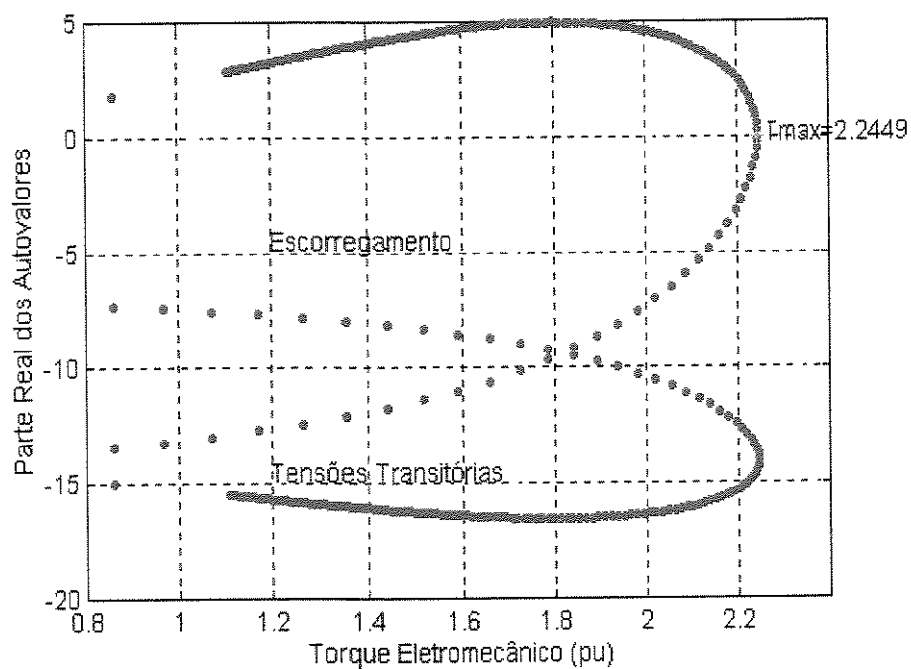


Figura 4.5 –Análise Dinâmica

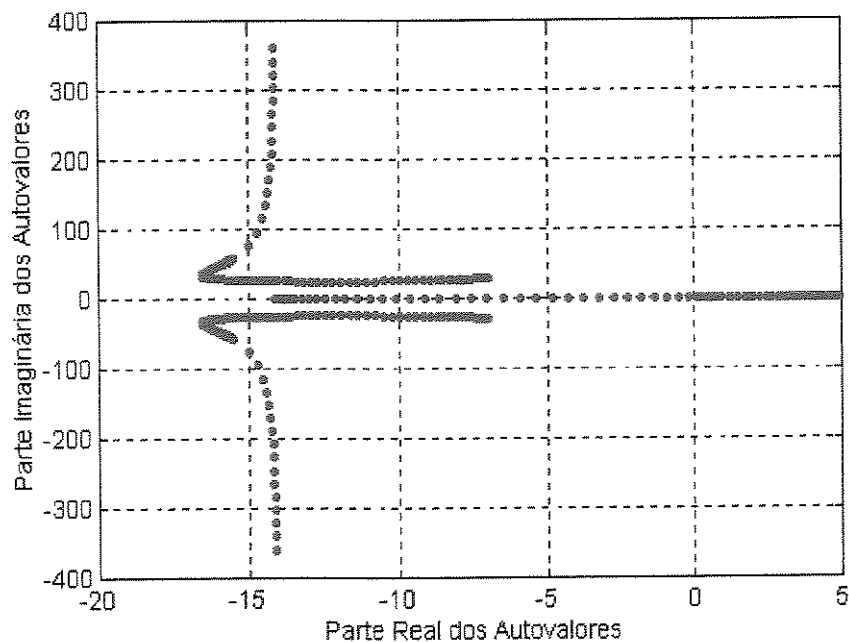


Figura 4.6 – Trajetória dos Autovalores no Plano Complexo

4.3.2 – Torque Mecânico Dependente da Velocidade

- Dependência Linear ($a=0$, $b=1$, $c=0$ e $T_p=0$)

Os resultados das simulações relativos a esta característica de torque mecânico são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8.

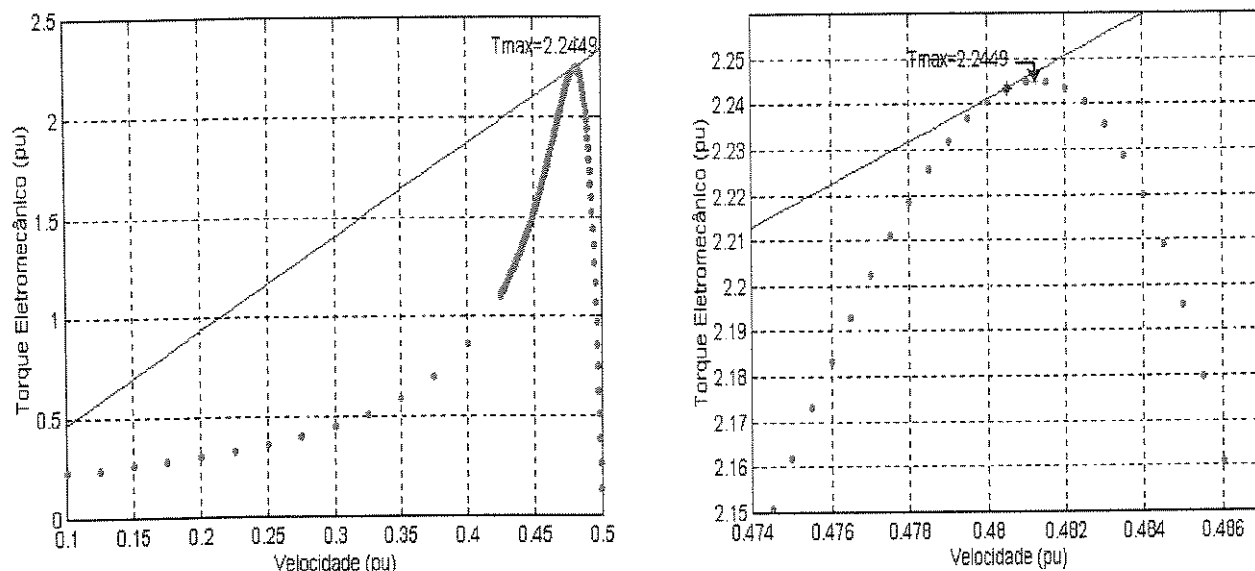


Figura 4.7 – Análise Estática

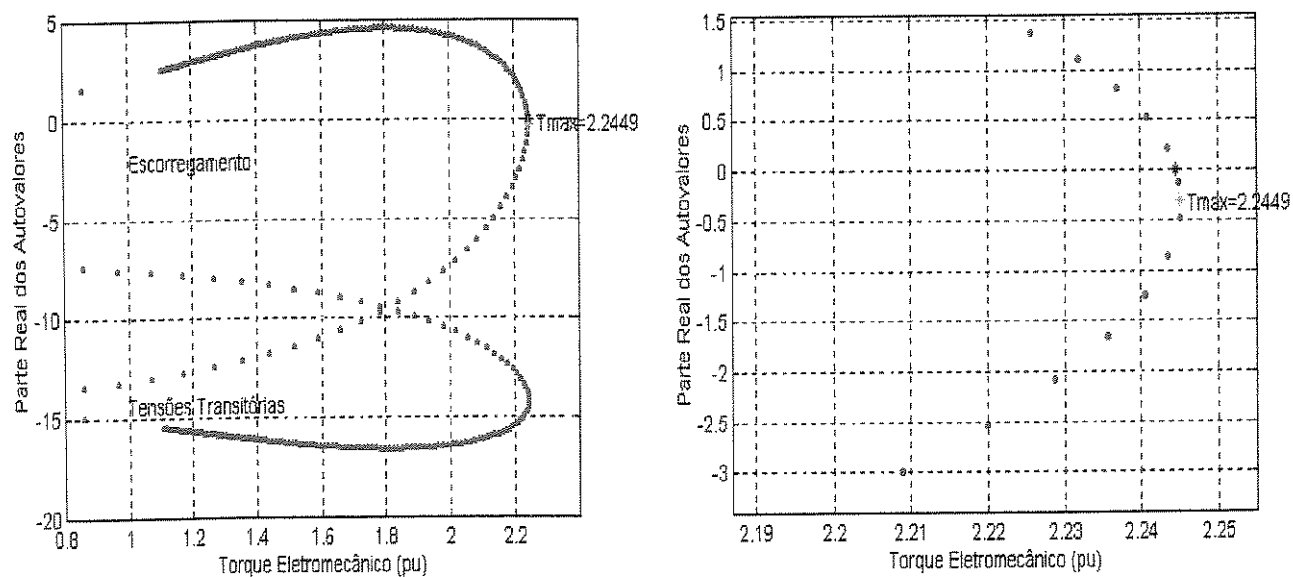


Figura 4.8 – Análise Dinâmica

• Dependência Quadrática ($a=0$, $b=0$, $c=1$ e $T_p=0$)

Os resultados das simulações relativos a esta característica de torque mecânico são apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10.

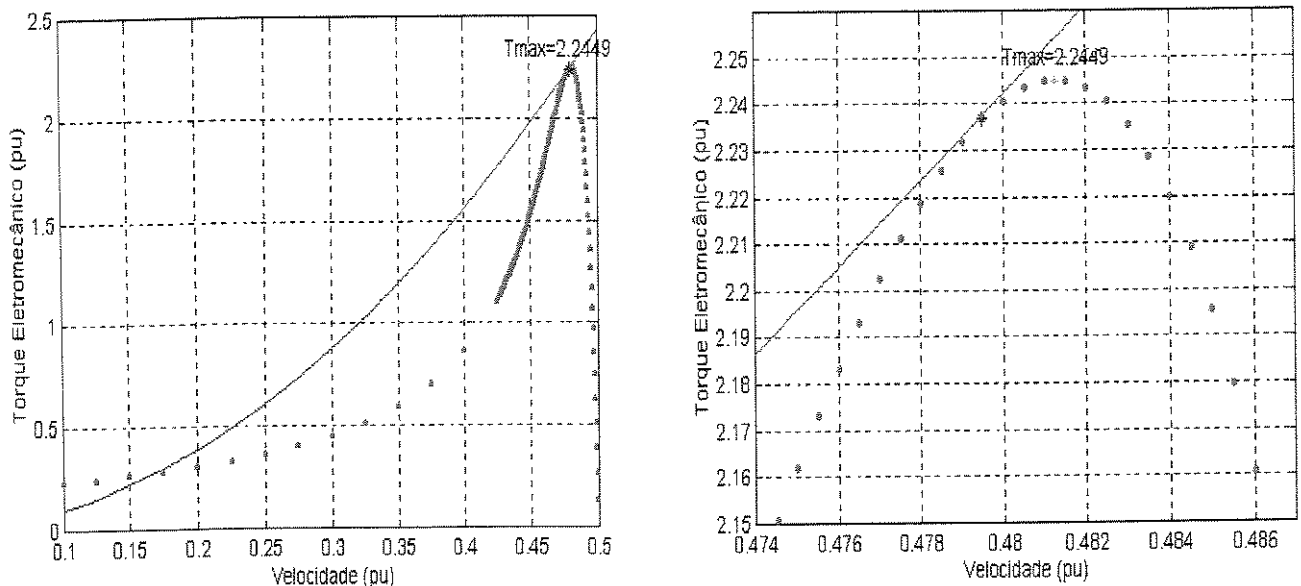


Figura 4.9 – Análise Estática

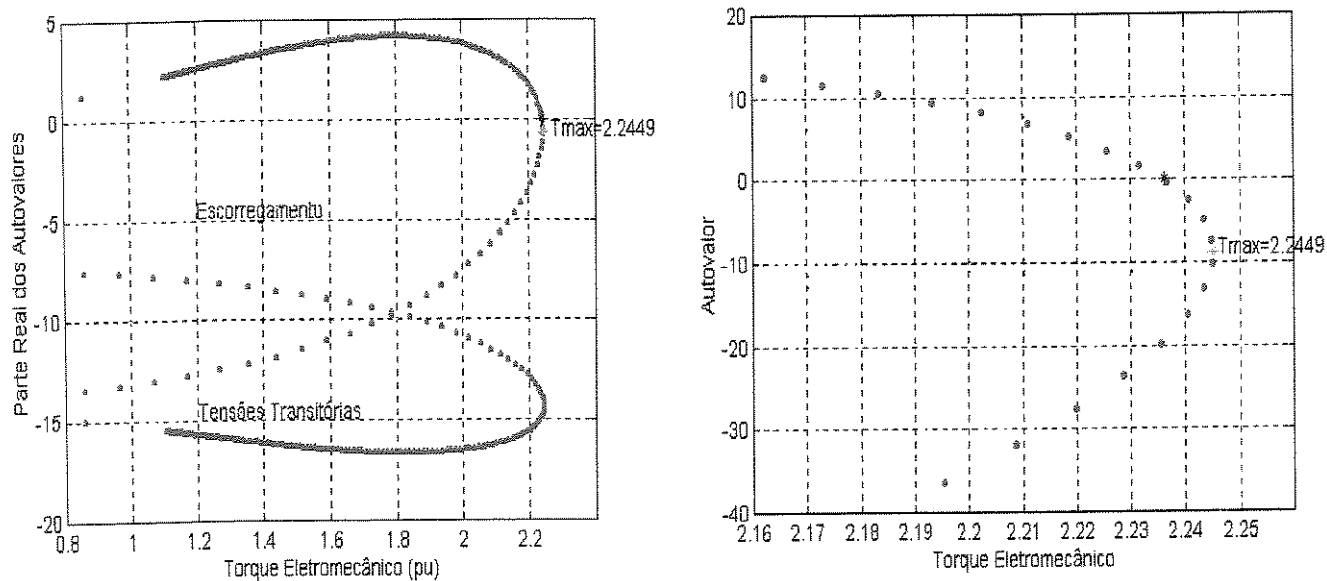


Figura 4.10 – Análise Dinâmica

Carga Composta ($a=0.3$, $b=0.4$, $c=0.3$ e $T_p=0.5$)

Os resultados das simulações relativos a esta característica de torque mecânico são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12.

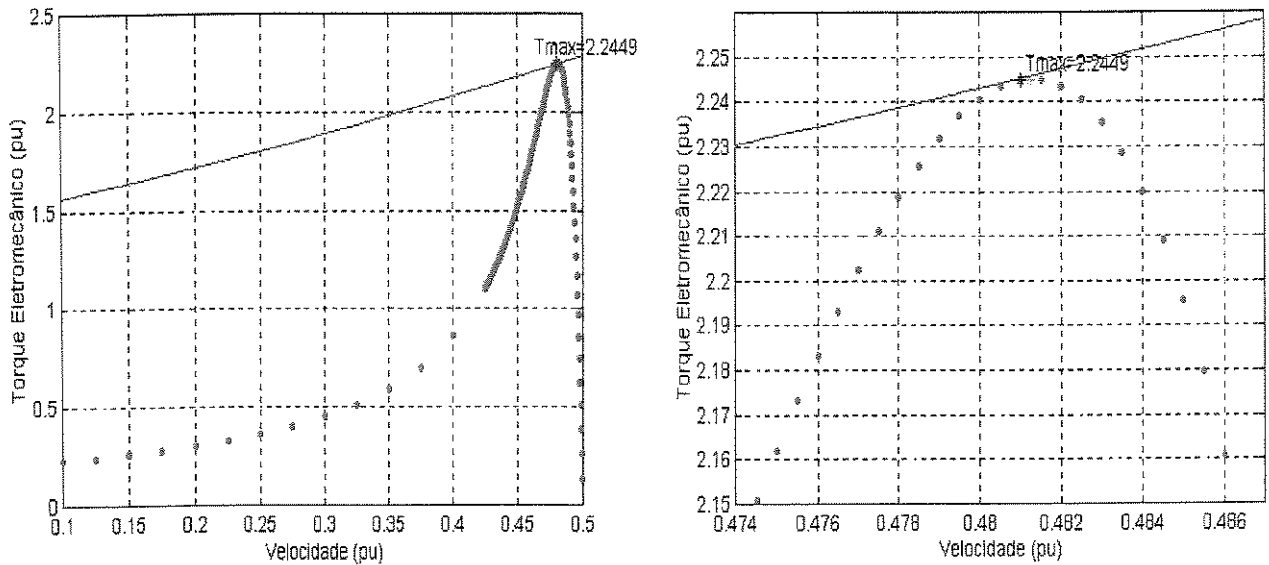


Figura 4.11 – Análise Estática

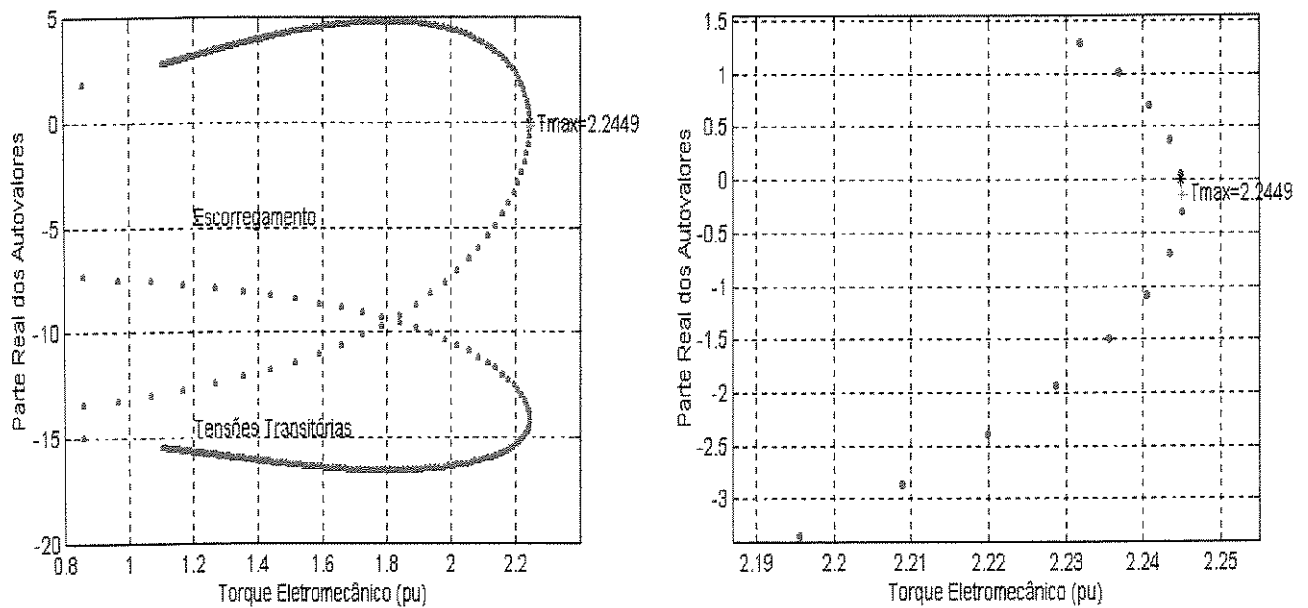


Figura 4.12 – Análise Dinâmica

Como se pode notar pelas Figuras 4.7 a 4.12, as bifurcações sela-nó estática e dinâmica são coincidentes, e ocorrem, para todas as características de torque mecânico, em um ponto muito próximo ao ponto de máximo torque (2.2449 pu), e portanto, esta diferença pode ser considerada insignificante. Desta maneira, justifica-se a utilização de fluxos de carga convencionais (torque mecânico constante), conforme abordado no item 4.2.

4.4 – Simulações Utilizando um Modelo de Primeira Ordem para o Motor de Indução

Neste item são apresentadas as simulações realizadas utilizando um modelo de primeira ordem para o motor de indução, com o intuito de comparar com os resultados obtidos no item anterior com o modelo de terceira ordem.

4.4.1 - Torque Mecânico Independente da Velocidade

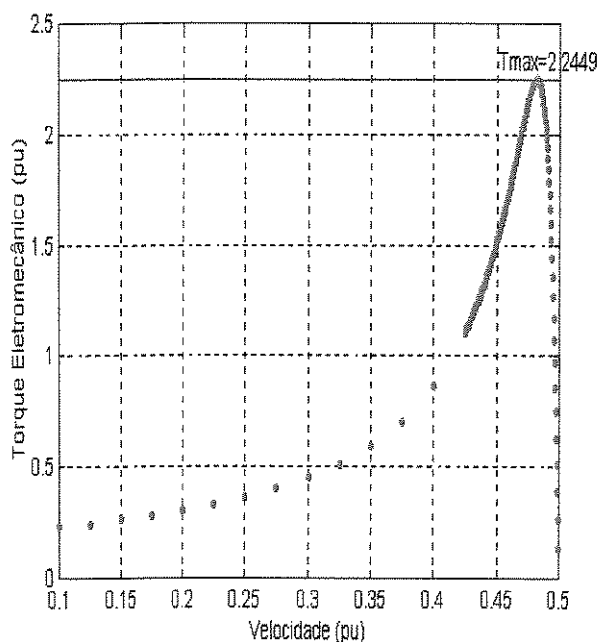


Figura 4.13 – Análise Estática

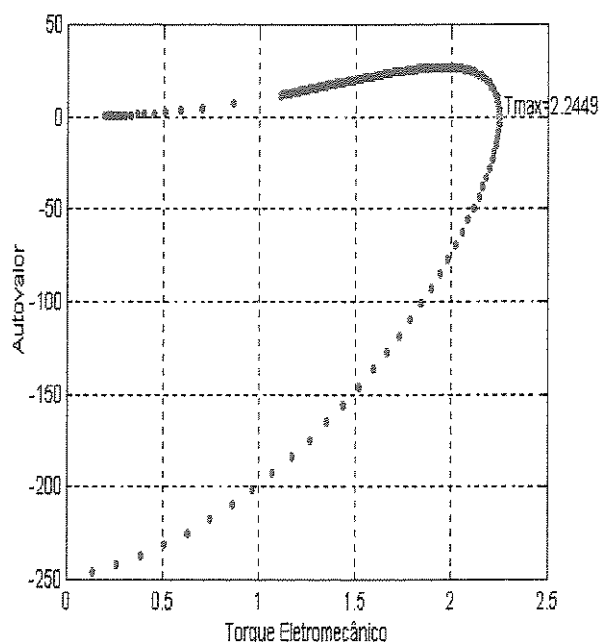


Figura 4.14 – Análise Dinâmica

4.4.2 - Torque Mecânico Dependente da Velocidade

- Dependência Linear

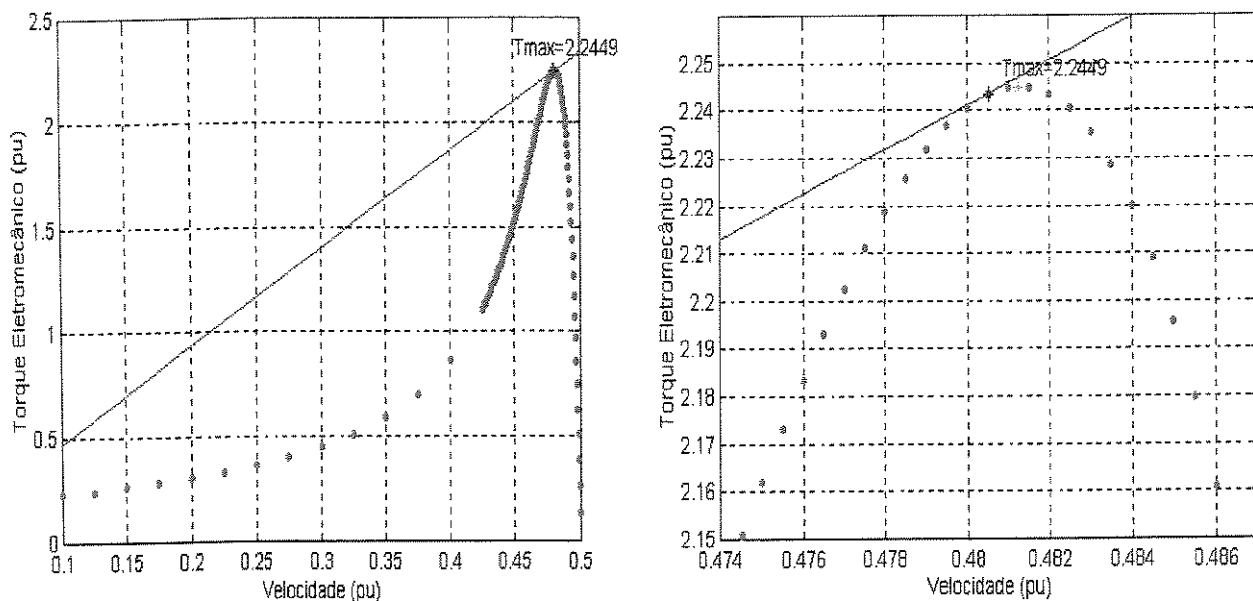


Figura 4.15 – Análise Estática

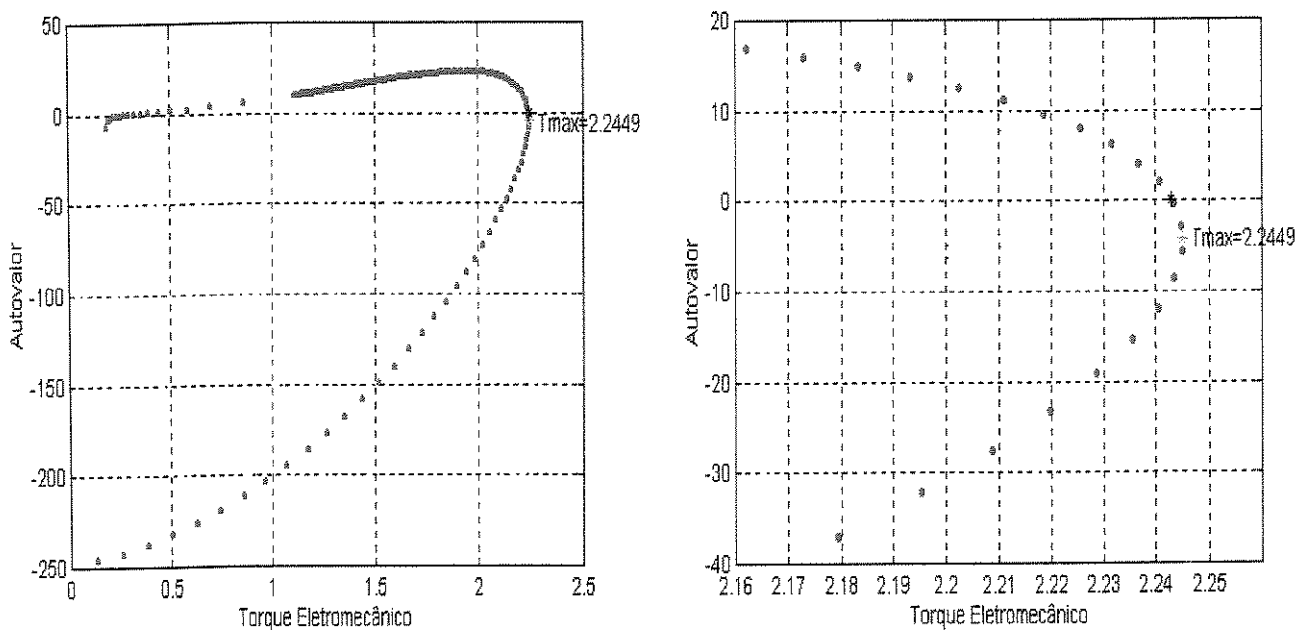


Figura 4.16 – Análise Dinâmica

- Dependência Quadrática

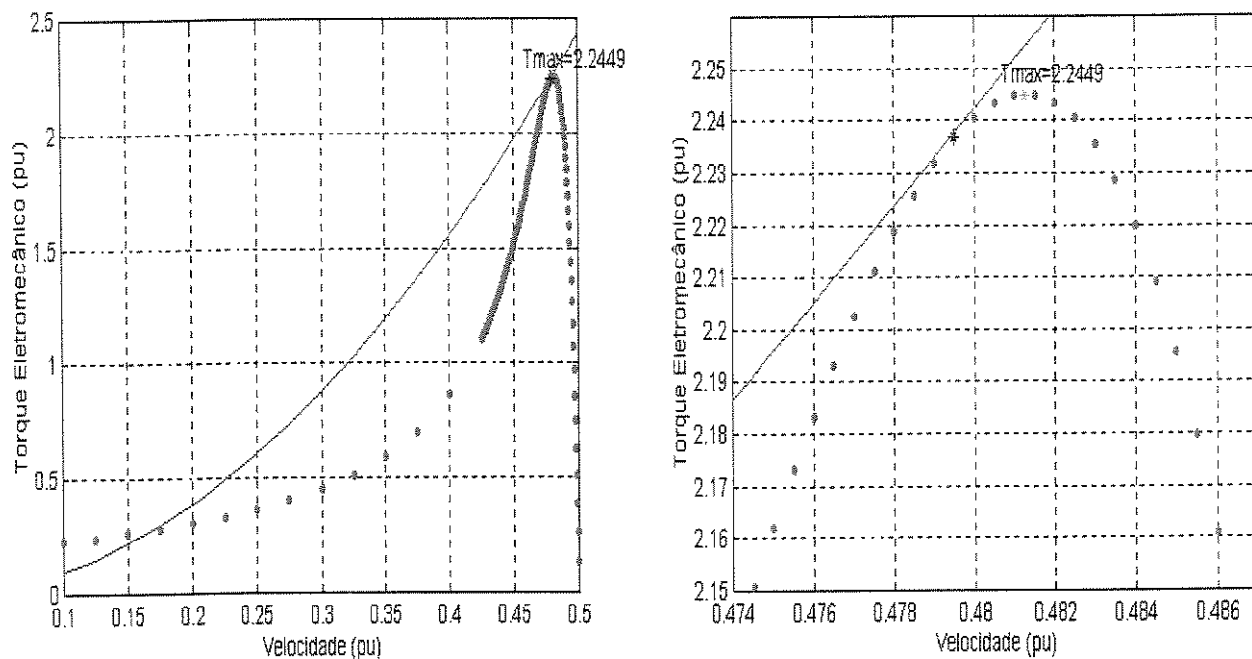


Figura 4.17– Análise Estática

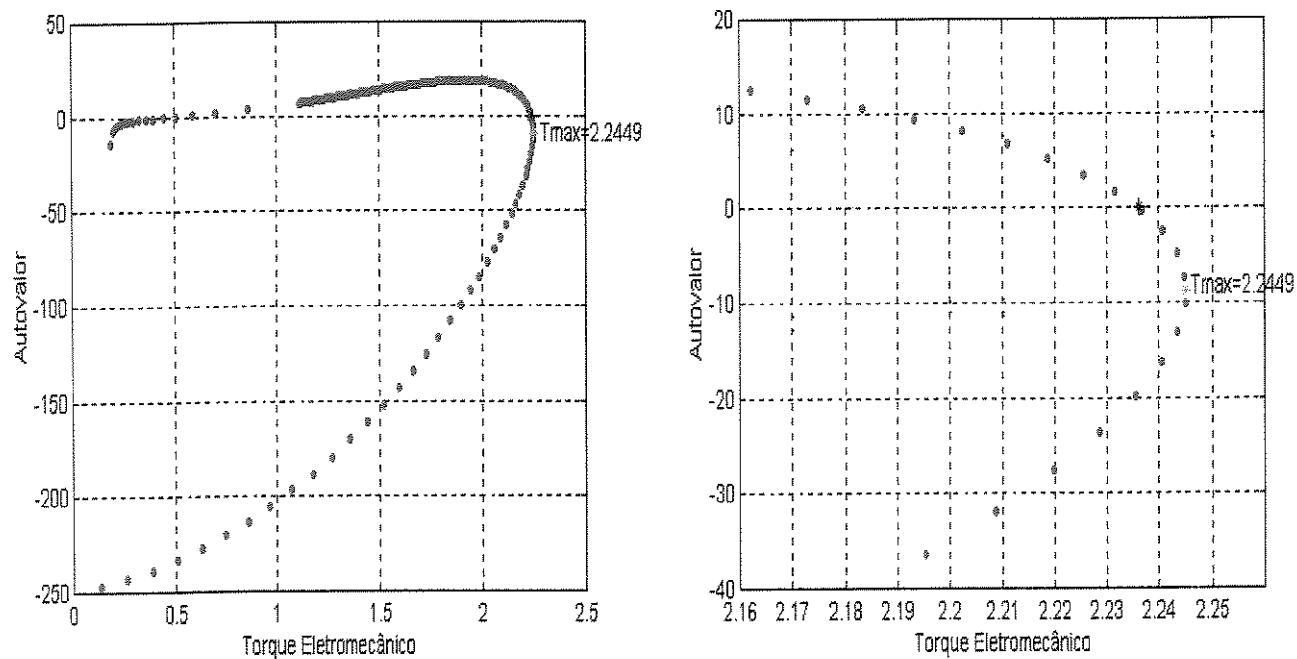


Figura 4.18 –Análise Dinâmica

- Carga Composta

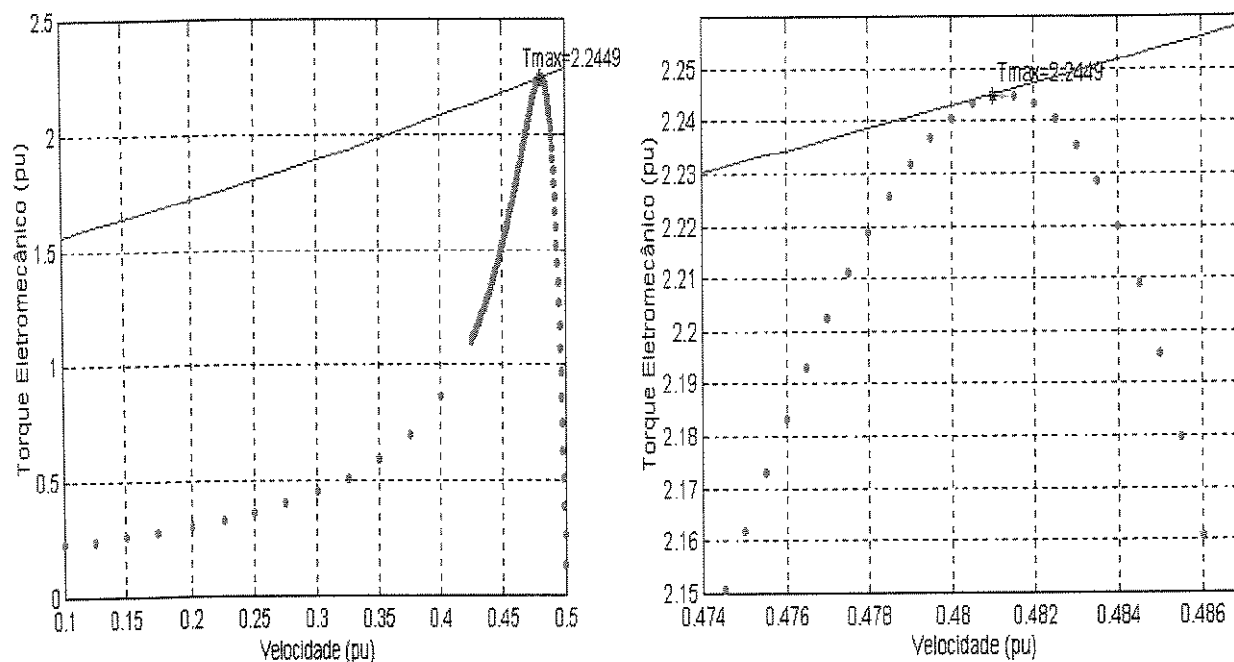


Figura 4.19 – Análise Estática

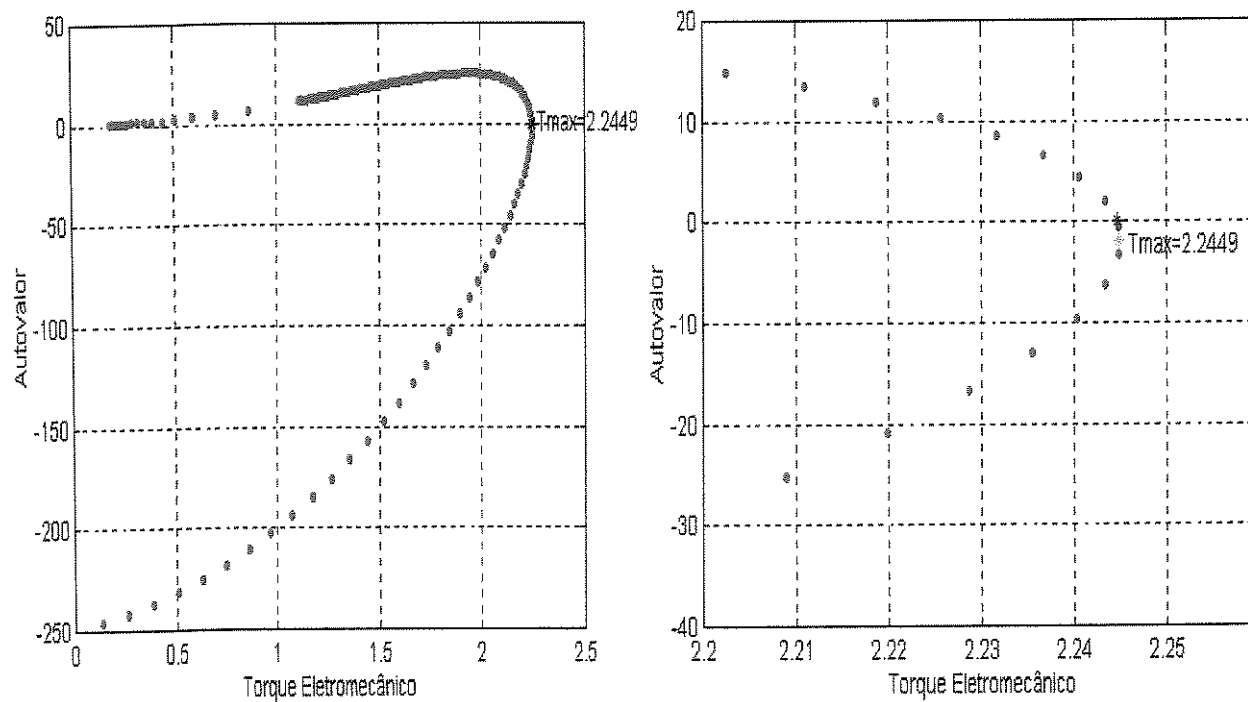


Figura 4.20 – Análise Dinâmica

Conforme se pode notar nas Figuras 4.13 a 4.20, para todas as características de torque mecânico os resultados são iguais aos obtidos no item 4.3 utilizando-se o modelo de terceira ordem. Isto mostra que para se investigar as condições de colapso de tensão associadas com a dinâmica de grandes motores de indução, a qual tipicamente ocorre após o transitório oscilatório inicial, um modelo de primeira ordem pode ser considerado uma aproximação aceitável. Isto é especificamente verdadeiro nos casos onde uma grande proporção da carga é constituída por motores de indução. O modelo de primeira ordem é também útil do ponto de vista do controle, visto que este modelo propicia projetos de ações de controle, como por exemplo, o chaveamento de capacitores, que também são efetivos para modelos de ordem mais elevada.

4.5 - Redução da Margem de Estabilidade de Tensão

A influência de motores de indução na margem de estabilidade de tensão pode ser avaliada através da Figura 4.21, a qual mostra o determinante do Jacobiano do fluxo de potência versus a potência de entreferro (nas simulações foi considerado torque mecânico constante) para três tipos de composição de carga (100% de carga PQ; 50% de carga PQ e 50% de motores de indução; 100% motores de indução). Como se pode notar nesta Figura, quando a carga é totalmente ou parcialmente constituída por motores de indução o limite estático de estabilidade de tensão, identificado pela singularidade do Jacobiano do fluxo de potência, é atingido para um nível de carga menor do que quando 100% da carga é de potência constante estática (modelo PQ). Esta redução nas margens de potência ativa (as curvas PV “encolhem” conforme a parcela da carga constituída por motores de indução aumenta) é devida à dependência da potência reativa do motor com a tensão. Esta é a razão pela qual alguns autores salientam que cargas constituídas por motores de indução representam um problema especial, visto que a instabilidade destes motores pode se tornar a principal restrição à operação estável do sistema [Pal, 1992].

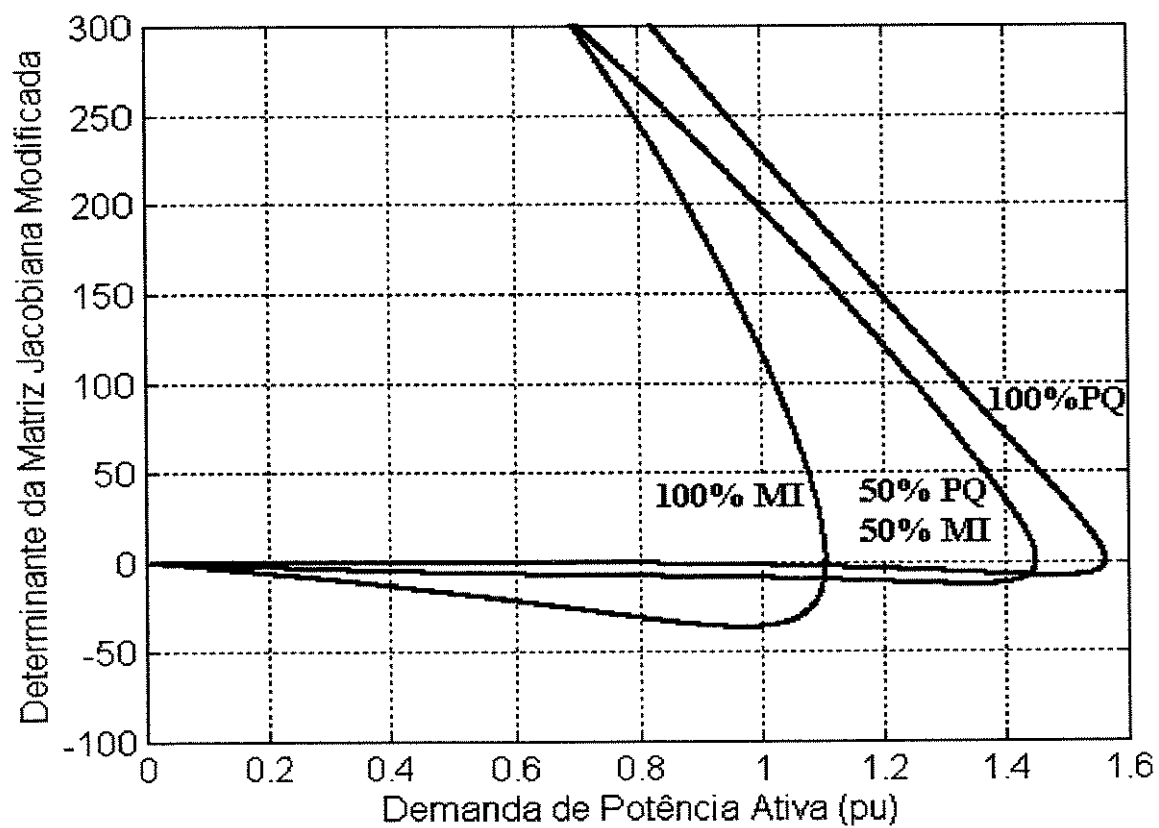


Figura 4.21 – Margem de Estabilidade de Tensão

CAPÍTULO 5

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado uma análise da estabilidade de tensão, sob condições de pequenas perturbações, de um sistema isolado, constituído por um motor de indução alimentado por um barramento infinito através de uma linha de transmissão. A estabilidade foi investigada através da análise das bifurcações estáticas e dinâmica do sistema, realizando-se uma avaliação comparativa para diferentes modelos da carga mecânica conectada ao motor.

Os resultados obtidos através das metodologias estática e dinâmica desenvolvidas nestes trabalho, apresentados no capítulo 4, levam às seguintes constatações:

- **Modelos de 1ª e 3ª ordem do Motor de Indução**

Os transitórios elétricos não tem nenhum efeito na estabilidade de motores de indução sob condições de pequenas perturbações e portanto, um modelo de primeira ordem é adequado para se investigar as condições de colapso de tensão. Esta mesma constatação foi feita por Pal [Pal, 1993], o qual enfatiza que a utilização de um modelo de 1ª ordem leva à obtenção de resultado diferentes dos obtidos através de modelos de ordem mais elevada somente sob condições de grandes perturbações, e quando o tempo de duração das mesmas é apreciável.

- **Equivalência entre as Análises Estática e Dinâmica**

As análises estática e dinâmica são equivalentes, isto é, levam à obtenção da mesma bifurcação sela-nó, que identifica o limite de estabilidade de tensão, se as características de regime permanente do motor de indução forem incluídas na modelagem estática;

A utilização de fluxos de potência convencionais, os quais consideram constante (independente da velocidade) o torque da carga conectada ao motor de indução, é adequada para a determinação do limite de estabilidade de tensão.

Sugestões para trabalhos futuros :

- Análise da estabilidade de um sistema gerador - linha de transmissão - motor de indução, sob condições de grandes perturbações, tais como um curto-circuito simétrico.
- Análise da influência de geradores de indução sobre a estabilidade de tensão de sistemas de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, D.A.; da Silva, L.C.P., Castro, C.A., [1999]. "Parameterized Fast Decoupled Load Flow for Tracing the Power Systems Bifurcation Diagrams", *Proceedings of the IEEE Summer Meeting*, pp. 708-713, Edmonton, Canada, July.
- Bompard, E.; Carpaneto, E.; Chicco, G. & Napoli, R., [1995]. "Asynchronous Motor Models for Voltage Stability Analysis". Bulk Power System Voltage Phenomena III, Davos, Switzerland.
- Bompard, E.; Carpaneto, E.; Chicco, G. & Napoli, R., [1993]. "A Practical Application of Bifurcation Theory to Dynamic Voltage Stability", *Colloquium and Meeting of CIGRÉ Study Committee 38*, Florianópolis-Brazil.
- Bompard, E.; Carpaneto, E.; Chicco, G. & Napoli, R., [1996]. "A Dynamic Interpretation of the Load-Flow Jacobian Singularity for Voltage Stability Analysis", *Electrical Power & Energy Systems*.
- Cañizares, C.A. & Hranilovic, S., [1994]. "Transcritical and Hopf Bifurcation in AC/DC Systems", Transcritical L.H. Fink (ed), *Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena III – Voltage Stability, Security and Control*, ECC/NSF Workshop, (Davos, Switzerland).
- Da Costa, V.F. & Da Silva, L.C.P., [1998]. "Voltage Stability Including Detailed Induction Motor Models", *Proceedings of the Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Notre Dame, Indiana, USA.
- Da Silva, L.C.P.; Moreira, C.M. & Da Costa, V.F., "A Influência das Características dos Geradores e das Cargas na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica", VI SEPOPE, Salvador - BA, Maio-1998.
- Da Silva, L.C.P., [1997]. "Uma Formulação Analítica Alternativa para a Análise Modal da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica", *Dissertação de Mestrado*, UNICAMP.
- Deuse, J. & Stuble, M., [1992], "Dynamic Simulation of Voltage Collapses", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 894-904.
- Garcia, A. V. & Almeida, M. C., [1999], "Identificação de Ramos Críticos para Estabilidade Tensão Baseada na Análise Modal do Sistema", *XV SNPTEE*.
- Gao, B.; Morison, G.K. & Kundur, P., [1992], "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.4, pp. 1529-1542.
- Hill, D.J., [1993]. "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, N° 1, pp. 166-176.
- Kwatny, H.G., Pasrija, A.K. & Bahar, L.Y., [1986], Static Bifurcations in Electric Power Networks: Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. CAS-33, No 10, pp. 981-991.
- Kundur, P., [1993]. "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill, pp.300-304.

- Kwatny, H.G.; Fischl, R.F. & NWANKPA, C.O., [1995]. "Local Bifurcations in Power Systems. Theory, Computation, and Application", *Proceedings of the IEEE*, vol.83, n°11, pp.1456-1483, November.
- Lemos, B.F.A; Lerm, A.A.P. & Silva, A.S., [1996]. "Estabilidade de Tensão: Uma Abordagem Através da Teoria de Bifurcações", *XI Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo-SP, PP.1649-1654.
- Lesieutre, B.C.; Sauer, P.W. & Pai, M.A., [1995]. "Development and Comparative Study of Induction Machine Based Dynamic P. Q Load Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, N° 1.
- Lerm, A. A. P., [1995], Análise Modal Aplicada a Estabilidade de Tensão com Inclusão de Modelos Dinâmicos de Carga, *Dissertação de Mestrado*, UFSC.
- Moreira C.M., [1997]. "Modelo de Sensibilidade de Potência para Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica", *Dissertação de Mestrado*, UNICAMP.
- Morison, Gao, B.; & Kundur, P., [1993], Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No.3, pp.1159-1171.
- Navarro-Perez, R. & Prada, R. B., [1991], Voltage Collapse on State Stability Limit, *International Workshop on Bulk Power System Voltage Phenomena 91: Stability e Security*.
- Nema, O.M.S., [1996], Índice de Proximidade ao Colapso de Tensão Baseado nas Perdas de Potência Ativa: Investigação do Potencial de Utilização na Análise de Segurança em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência, de Tese de Mestrado, FEEC-UNICAMP.
- Pai, M.A; Sauer, P.W.; Lesieutre, B.C. & Adapa, R., [1995]. "Structural Stability in Power Systems-Effect of Load Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, N° 2, pp.609-615.
- Pai, M.A; Sauer, P.W.; Lesieutre, B.C. & Adapa, R., [1995]. "Static and Dynamic Nonlinear Loads and Structural Stability in Power Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol.83, N° 11, pp.1562-1571.
- Pal, M.K., [1992]. "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, N° 1, pp. 243-249.
- Pal, M.K., [1993]. "Voltage Stability: Analysis Needs, Modelling Requirement and Modelling Adequacy", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 140, N° 4, pp. 279-286.
- Pal, M.K., [1995]. "Assessment of Corrective Measures for Voltage Stability Considering Load Dynamics", *Electrical of the IEEE*, Vol. 17, N° 5, pp. 325-334.
- Prada, R.B.; Cory, B.J. & Navarro-Perez, R., [1990]. "Assesment of Steady Voltage Collapse Critical Conditions", 11H, PSCC, GRAZ..
- Prada, R.B. & Vieira F, X, [1993], Voltage Stability System Critical Area Identification Based on The Existence of Maximum Power Flow Transmission, PSCC, Vol. 1, pp. 315-321.
- Rajagopalan, C.; Lesieutre, B.; Sauer, P.W. & Pai, M.A., [1992], Dynamic Aspects of Voltage/Power Characteristics, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, N° 3, pp. 990-1000.

Rajagopalan, C.; Sauer, P.W. & Pai, M.A., [1989]. "Analysis of Voltage Control Systems Exhibiting Hopf Bifurcation", *Proceedings of the 28th Conference on Decision and Control*, Tampa-Florida IEEE, CH2642-7/89/0000-0332.

Taylor, C.W., [1993], *Power Systems Voltage Stability*, M Graw - Hill, 273p.

Van Cutsem, T. & Vournas, C.D., [1996]. "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, N°1.

Vournas, G.D., [1994]. "Voltage Stability and controllability Indices for Multimachine Power Systems", *IEEE PES*, 94 SM513-2 – PWRS.

Xu, W. & Mansour, Y., [1993]. "Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, 93 WM185 – 9PWRS, pp. 1-8.