

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**BLOQUEIO DA TENSÃO DE CAMPO DE
MÁQUINAS GERADORAS COMO MEDIDA PARA
EVITAR O FENÔMENO COLAPSO DE TENSÃO**

Renan Souza Moura

Itajubá, Março de 2010

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

Renan Souza Moura

BLOQUEIO DA TENSÃO DE CAMPO DE
MÁQUINAS GERADORAS COMO MEDIDA PARA
EVITAR O FENÔMENO COLAPSO DE TENSÃO

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

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTAÇÃO: Ph.D. Antonio Carlos Zambroni de Souza

CO-ORIENTAÇÃO: D.Sc. Rafael Coradi Leme

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, Março de 2010

**BLOQUEIO DA TENSÃO DE CAMPO DE MÁQUINAS
GERADORAS COMO MEDIDA PARA EVITAR O
FENÔMENO COLAPSO DE TENSÃO**

Renan Souza Moura

Esta Dissertação foi julgada para obtenção do título de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica,
e aprovada pela Banca Examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Carlos Alberto Castro
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Benedito Isaias de Lima Lopes
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza
3º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Rafael Coradi Leme
4º Examinador - UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico As Todas Pessoas Que Amo E Contribuíram Para o Sucesso Deste Trabalho , Em Especial Para Minha Mãe Angela Maria de Souza Moura, Meu Pai Josmar Negrinho Moura, Meus Irmãos Bruno e Brenda, Meu Avô Jair Honório, Minha Avó Cidinha E Em Memória De Luiz Moura e Leônidas.

AGRADECIMENTOS

A todos indistintamente.

Muito Obrigado
Renan Souza Moura

“Sem saber que era impossível, foi lá e fez”

Jean Maurice Eugène Clément Cocteau

Resumo

O objetivo desta Dissertação de Mestrado é fornecer um método que bloqueie a ação do regulador de tensão com a intenção de aumentar a margem de carga do sistema. O conceito de margem de carga está relacionado ao problema de colapso de tensão, que pode ocorrer, conforme considerado neste trabalho, em consequência de sucessivos aumentos de carga. A interpretação correta de alguns sinais anteriores à ocorrência do fenômeno pode ajudar a evitá-lo. Ações de controle locais podem ser efetivas para este propósito, mas são dependentes da existência de fontes locais de energia.

Neste trabalho, a relação da potência reativa gerada e o nível de tensão é monitorada para que a potência reativa seja bloqueada em um ponto anterior à ocorrência do colapso de tensão. Esse bloqueio é baseado na coerência entre o suprimento de potência reativa e os efeitos no nível de tensão. Quando esta coerência não se manifestar, o bloqueio no aumento de geração de potência reativa ocorre. Isso inibe o controle local de potência reativa e tensão, mas preserva a estabilidade do sistema. Usando os métodos de simulação do tipo estático e quase-dinâmico, dois pequenos sistemas testes são empregados para testar a metodologia.

Palavras Chaves: Colapso de tensão, Método da Continuação, Fluxo de Potência, regulador de tensão, margem de carga.

Abstract

The goal of this work is to propose a method to block the voltage regulator action with the meaning to enlarge the system load margin. The concept of load margin is linked to the problem of voltage collapse, which it may take place, as considered in this work, as a consequence of successive load increases. The correct interpretation of some signals may avoid voltage collapse occurrence. Local control actions may be effective for this purpose, but they are dependent on the existence of local reactive energy sources.

In this work, the relationship between the reactive power generation and voltage level is monitored, enabling one to block the reactive power generation increase in an operating point just prior to the occurrence of the voltage collapse. This blocking is based on the coherence between the reactive power supply and the effects in the voltage level. When this coherence is no longer valid, the blocking occurs. This inhibits the reactive power-voltage level control, but preserves the system stability. By using static and quasi-dynamic type simulation methods, two small test systems are employed to test the methodology.

Index Terms: Voltage collapse, continuation methods, power flow, voltage regulator, load margin.

Índice

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Discussão sobre Algumas Ocorrências de Colapso de Tensão	2
1.3. Motivações e objetivos.....	4
1.4. Organização do trabalho	6
Capítulo 2.....	7
Fundamentos teóricos	7
2.1 Equações Diferenciais Ordinárias.....	7
2.2 Equilíbrio das Equações Diferenciais Ordinárias	9
2.3 Teoria das Bifurcações.....	11
2.3.1 Bifurcação Sela-nó.....	11
2.4 Método da Continuação	13
2.4.1 Passo Previsor	13
2.4.2 Passo Corretor.....	14
2.5 Sistemas de Equações Algébrico-Diferencial	15
2.6 Método Iterativo de Newton-Raphson.....	16
2.7 Modelo Quase-Dinâmico	18
Capítulo 3.....	20
Modelo Matemático do Sistema Elétrico.....	20

3.1	Apresentação de alguns elementos básicos de um SEP	20
3.1.1.	Geradores e Compensadores Síncronos	21
3.1.2.	Cargas	22
3.1.3.	Reatores e Capacitores Shunt, Compensadores Estáticos	23
3.1.4.	Linhas de Transmissão.....	24
3.1.5.	Transformadores	25
3.1.6.	Capacitores e Reatores Série.....	26
3.2	Fluxo de Potência.....	27
3.2.1	Limitações do Fluxo de Potência	28
3.3	Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência	29
3.3.1	Estudo de estabilidade angular do rotor	29
3.3.2	Estudo de estabilidade de tensão.....	30
3.3.3	Estudo de Estabilidade de Longo Prazo.....	31
3.4	Modelagem dinâmica de elementos no SEP	31
3.4.1	Gerador Síncrono	32
3.4.2	Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão	34
3.4.3	Equações de Rede	36
3.5	Estabilidade de Tensão - Métodos Utilizados para Análises	37
3.5.1	Método do Vetor Tangente	37
3.5.2	Método da Continuação aplicado nos Sistemas Elétricos.....	38
3.5.2.1	Passo Previsor	39
3.5.2.2	Passo Corretor.....	39
3.6	Métodos de Simulação	40
3.6.1	Análise Estática.....	40
3.6.2	Modelo Quase-Dinâmico	40
Capítulo 4.....		43
Proposta de Bloqueio no Ajuste da Tensão Terminal das Máquinas Síncronas e Apresentação dos Resultados.....		43

4.1	Proposta de Bloqueio	43
4.2	Resultados da Análise Estática	47
4.2.1	Sistema de 3 barras sem a proposta de bloqueio.....	47
4.2.2	Sistema de 3 barras com a proposta de bloqueio	49
4.2.3	Sistema de 14 barras sem a proposta de bloqueio.....	51
4.2.4	Sistema de 14 barras com a proposta de bloqueio	52
4.3	Resultados da Análise Quase-Dinâmica	54
4.3.1	Sistema de 3 barras sem a proposta de bloqueio.....	54
4.3.2	Sistema de 3 barras com a proposta de bloqueio	58
4.3.3	Sistema de 14 barras sem a proposta de bloqueio.....	62
4.3.4	Sistema de 14 barras com a proposta de bloqueio	64
4.4	Comparação Análise Estática X Análise Quase-Dinâmica.....	66
Capítulo 5.....		67
Considerações Finais		67
Apêndice		69
A- 1.	Sistema de 3 barras	69
A- 2.	Sistema de 14 barras	71
Referências Bibliográficas		75

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Circuito RL simples	7
Figura 2.2 - Exemplo de curva caracterizando a bifurcação sela-nó	12
Figura 2.3 - Ilustração do funcionamento do Método da Continuação	14
Figura 2.4 - Solução comparando o processo Dinâmico e Quase-Dinâmico	19
Figura 3.1-Representação simbólica de um gerador	21
Figura 3.2-Representação simbólica de um compensador síncrono	22
Figura 3.3-Representação simplificada de uma carga conectada ao barramento (i)	22
Figura 3.4-Representação de um capacitor e reator shunt	23
Figura 3.5-Representação simplificada de um compensador estático e sua faixa de operação	24
Figura 3.6-Circuito π equivalente de uma linha de transmissão	25
Figura 3.7-Representação de um transformador através de uma impedância	25
Figura 3.8-Transformador com taps genéricos e a sua representação matricial	26
Figura 3.9 - Curva PV	30
Figura 3.10 - Representação do modelo de Dois Eixos (IEEE 2.2)	32
Figura 3.11 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação	34
Figura 3.13 - Método da Continuação	39
Figura 4.1 - Representação da ação de controle	44
Figura 4.2 - Fluxograma do teste para o sistema de 3 barras, sem controle, modelo estático	47
Figura 4.3 - Tensão da Barra 3 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo estático	49
Figura 4.4 – Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo estático	50
Figura 4.5 – Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo estático	51
Figura 4.6 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo estático	52
Figura 4.7 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo estático	53
Figura 4.8 - Tensão da barra 1 para o sistema de 3 barras ,sem a proposta, modelo quase-dinâmico	54
Figura 4.9 - Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras , sem a proposta, modelo quase-dinâmico	55
Figura 4.10 - Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras , sem a proposta, modelo quase-dinâmico	55
Figura 4.11 - Tensão de Campo (Efd) da barra 1 para o sistema com 3 barras ,sem a proposta, modelo quase-dinâmico	56
Figura 4.12 - Tensão de Campo (Efd) da barra 2 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico	56

Figura 4.13- Velocidade angular síncrona (ω_r) da barra 1 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico	57
Figura 4.14 - Velocidade angular síncrona (ω_r) da barra 2 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico	57
Figura 4.15 - Tensão da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico.....	58
Figura 4.16 - Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico.....	59
Figura 4.17 - Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico.....	59
Figura 4.18 - Tensão de campo (Efd) da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	60
Figura 4.19 - Tensão de campo (Efd) da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	60
Figura 4.20 - Velocidade angular síncrona (ω_r) da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	61
Figura 4.21- Velocidade angular síncrona (ω_r) da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	61
Figura 4.22 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico	62
Figura 4.23 - Perfil de tensões de campo (Efd) para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico.....	63
Figura 4.24 - Perfil de velocidades angulares síncronas (ω_r) para o sistema de 14 barras, sem proposta, modelo quase-dinâmico	63
Figura 4.25 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico.....	64
Figura 4.26 - Perfil de tensões de campo (Efd) para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	65
Figura 4.27 - Perfil de velocidades angulares síncronas (ω_r) para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico	65
Figura A.1 - Sistema elétrico de 3 barras para testes	69
Figura A.2- Sistema de 14 barras do IEEE modificado	74

Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Analogia matemática-física	28
Tabela 4.1 - Resumo do controle proposto	45
Tabela 4.2 – Resumo do controle proposto de maneira alternativa	46
Tabela 4.3 - Resultados para o sistema de 3 barras, sem controle, modelo estático	48
Tabela 4.4 - Resultados da proposta de bloqueio para o sistema de 3 barras, modelo estático	50
Tabela 4.5- Resultados para o sistema de 14 barras, com controle, análise estática.....	53
Tabela 4.6- Comparação Análise Estática X Análise Quase-Dinâmica.....	66
Tabela A.1 - Características das linhas de transmissão para o sistema de 3 barras	69
Tabela A.2 - Valores iniciais para o programa fluxo de carga para o sistema de 3 barras	70
Tabela A.3- Constantes dos modelos de gerador e regulador de tensão para o sistema 3 barras	70
Tabela A.4 - Valores iniciais para o programa fluxo de carga para o sistema de 14 barras	72
Tabela A.5 – Rede passiva para o sistema de 14 barras.....	73
Tabela A.6- Constantes para os modelos de gerador e regulador de tensão, sistema de 14 barras.....	73

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações iniciais

Um sistema elétrico de potência deve garantir o suprimento de energia às cargas de forma confiável e ininterrupta. O conceito de confiabilidade dos sistemas elétricos, além da continuidade do fornecimento de energia, também define as condições mínimas necessárias para uma operação adequada e segura. Além disso, com o desenvolvimento tecnológico, os equipamentos ficam susceptíveis às menores faixas de variação de tensão e frequência.

O homem moderno tornou-se dependente da energia elétrica. O consumo deste tipo de recurso tem-se elevado com o tempo. Para atender a toda essa demanda, com alto padrão de qualidade, são planejados, construídos e desenvolvidos, complexos sistemas elétricos interligados, muitas vezes com dimensões continentais.

Esses complexos sistemas interligados sofrem variações graduais de carga ou até mesmo grandes impactos, como na eventualidade de um curto-circuito em transformadores e linhas de transmissão, saída de unidades geradoras, perda de grandes blocos de carga, entre outras situações. Eventos dessa natureza alteram o ponto de operação, o que torna o estudo da dinâmica do sistema elétrico de potência vital.

No sentido de avaliar o desempenho do sistema elétrico diante de diversos impactos, são desenvolvidos diversos estudos. Dentre eles, a análise de estabilidade de tensão é responsável por verificar se os níveis de tensão (em regime estacionário), de forma que todos os barramentos do sistema estejam dentro de valores de operação aceitáveis [1]. A primeira publicação abordando o problema de estabilidade de tensão é datada de 1968 [2]. Desde então, o número de publicações tem sido cada vez maior, intensificando-se a partir da década de 80. No entanto, quando ocorre algum distúrbio e o sistema não consegue fornecer a potência reativa solicitada, é caracterizada a instabilidade de tensão.

A instabilidade de tensão é um fenômeno essencialmente local. Já o colapso de tensão é mais complexo, afetando diversas áreas ao mesmo tempo [1]. Ambos os eventos são caracterizados por um rápido declínio do nível de tensão dos barramentos.

A margem de carga, definida como a distância do ponto de operação até o ponto de colapso de tensão, deve ser calculada para que se evite fenômenos indesejáveis como um *blackout* em função dos níveis de tensão.

Em estudos para determinação de margem de carga, métodos convencionais [3-4] normalmente consideram que o carregamento cresce numa direção pré-definida com constante fator de potência e aumento proporcional de geração até atingir o ponto de máxima carga atendida pelo sistema. Contudo, em sistemas reais uma nova direção de crescimento da carga pode acontecer, resultando em um menor índice de margem de carga. Bedoya e Castro demonstraram em [5] um método para calcular a menor margem de carga de um sistema elétrico, possibilitando operadores tomarem medidas que previnam situações de instabilidade de tensão. Essa “quase-aleatoriedade” da direção de crescimento da carga é trabalhada em [6], onde a utilização da lógica fuzzy seleciona os índices de estabilidade de tensão heurísticamente.

1.2. Discussão sobre Algumas Ocorrências de Colapso de Tensão

Os trabalhos citados no parágrafo anterior evidenciam o fato de que a busca de índices de seguranças que sejam capazes de indicar a estabilidade de sistemas sob o ponto de vista de tensão é fundamental e medidas eficazes para melhorar o controle de potência reativa devem ser consideradas. Se ações efetivas de controle não são implementadas, sucessivos aumentos de carga podem levar à instabilidade como o ocorrido na área de São Paulo no dia 24 de abril de 1997 [7]. Devido à importância deste evento, o mesmo é discutido nos parágrafos seguintes.

Em [7] é mostrado que o esgotamento de recursos de controle de tensão da área São Paulo, mesmo antes do patamar de transição de carga média para carga pesada, aliada a uma excessiva importação de potência reativa na carga média ocasionou o esgotamento dos recursos de potência reativa do restante do sistema. Tal evento ocasionou uma instabilidade de tensão nos troncos de transmissão e sub-transmissão da área São Paulo durante a tomada de carga pesada.

Ainda em [7] é discutido que as demais áreas (Minas Gerais, Goiás/Brasília e região Sul) já operavam com carga pesada enquanto que as usinas de São Paulo ainda apresentavam

aumento de carga. As empresas controladoras da área, ao perceberem a iminência de um problema com graves conseqüências, ordenaram cortes preventivos de carga em diversas regiões do sistema interligado sul/sudeste. No entanto, as empresas distribuidoras cortaram um montante de carga bem inferior àquele sugerido, alegando que a freqüência se encontrava estável e no seu valor nominal (60 Hz). No mesmo instante, as máquinas da área de São Paulo não conseguiam acompanhar o crescimento de carga. Isto ocasionou problemas de subfreqüência nesta região. O ERAC [8] (“Esquema regional de alívio de carga”) atuou em algumas regiões por subfreqüência, mas em diversos barramentos, o sistema de proteção não atuou devido aos baixos níveis de tensão.

Quinze minutos após este declínio de tensão, esgotaram-se os recursos de controle de tensão de Ibiúna 345 kV, ocasionando, por sua vez, em uma grande queda de tensão nesta subestação inversora [9]. Embora um baixo nível de tensão nesta subestação possa ocasionar falhas de comutação entre fases na ponte conversora do elo de corrente contínua (CCAT), tais falhas não aconteceram. Contudo, houve um colapso das válvulas das pontes conversoras. Isto ocasionou um desligamento de um bipolo e, logo após, do segundo bipolo [10].

Um outro exemplo de instabilidade de tensão mais recente é o ocorrido em 14 de agosto de 2003, quando houve um *blackout*, provocado por uma série de contingências, no nordeste dos EUA e sul do Canadá, na região de Ontário em particular. Este problema afetou em torno de 50 milhões de pessoas e causou prejuízos da ordem de US\$ 5 bilhões [11]. Uma das recomendações do relatório [12] é o estudo de novas ferramentas, como *softwares* de monitoração de margem de carga.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe a este órgão monitorar, em tempo real, a margem de segurança do sistema em relação à instabilidade de tensão, e despachar, quando necessário, ações preventivas para a manutenção de níveis adequados de operação, evitando problemas de instabilidade de tensão.

Diante da preocupação em relação ao fenômeno colapso de tensão, em [13] ações de controle, como a inserção de capacitores chaveados, comutação automática de taps e PSS são inseridos dentro de uma análise estática e dinâmica com a intenção de melhorar o

comportamento do sistema frente às perturbações. Também em [13] é desenvolvido um controle ótimo dos parâmetros envolvidos.

Assim, estudos de estabilidade de tensão têm sido uma preocupação para engenheiros e pesquisadores ao redor do mundo nos últimos 20 anos. Com este intuito são investigadas, neste trabalho, metodologias que possam permitir o aumento de margem de carga do sistema ao operador.

1.3. Motivações e objetivos

A condição de estabilidade de tensão de um sistema elétrico de potência pode ser conhecida utilizando diversos índices (em inglês, Voltage Stability Indices-VSI). Em [14], M.V.Suganyadevi e C.K.Babul comparam diversos VSI's com propósito de determinar o ponto de instabilidade de tensão, a barra que apresenta maior variação do nível de tensão com a mudança do ponto de equilíbrio, também chamada de barra crítica, e a linha crítica, aquela que se conecta a barra crítica, no sistema de 14 barras do IEEE.

Por outro lado, [15] propõe um método para classifica contingências baseado na informação do caso base e o estado de operação pós-contingência, resultando em um modelo potencialmente aplicado em simulações reais.

O Método da Continuação é amplamente utilizado na literatura para o cálculo da margem de carga, pois identifica o ponto de sela-nó e traça o diagrama de bifurcação, conhecida como curva PV [3-4]. Essa curva é definida por um gráfico do comportamento do nível de tensão em função do aumento do carregamento e é utilizada nas análises de estabilidade de tensão para pequenos distúrbios como, por exemplo, um aumento gradual de carga. Apesar dos resultados precisos obtidos por este método, seu uso é limitado pelo alto esforço computacional requerido. Manfred Bedriñana, Duvier Bedoya, e Carlos A. Castro combinaram em [16] as características do Método da Continuação com técnicas de programação não-linear, utilizando a sensibilidade da matriz Jacobiana como função objetivo, para calcular o máximo carregamento do sistema.

A sensibilidade das variáveis de estado do sistema é obtida através do Jacobiano do fluxo de carga para um ponto de operação conhecido [3]. Esta análise permite determinar as barras cujas variáveis de estado mais sensíveis em relação a uma variação de carga. A avaliação da utilização da sensibilidade da potência reativa gerada com a variação da carga é analisada em

[17], onde um procedimento otimizado de ajuste de carga que traz o sistema de volta para o limite de operação quando excedida a margem de carga é testado. Essas ações de controle fornecem resultados interessantes, com efeitos positivos na margem de carga do sistema. Uma ação de controle efetiva pode ser proposta quando a relação entre a potência reativa gerada e o nível de tensão controlado é monitorada em cada ponto operativo.

Este tipo de abordagem foi proposto em [18], onde fica evidenciado que o ponto de sela-nó sempre associado ao determinante nulo da matriz Jacobiana[3-4-16-17] não é um índice adequado para ser utilizado em grandes sistemas, pois o seu valor nunca é numericamente igual a zero, a não ser que os problemas de carregamento estejam espalhados na rede e o processo numérico tenha muitas casas decimais. Dessa forma, R.B.Prada, L.J.Souza, L.A.P. Souza propõem em [18] um índice baseado na relação entre a potência reativa e seu respectivo nível de tensão em cada barramento com o objetivo de analisar o problema de controle de tensão em Fortaleza-CE após a instalação de um compensador estático.

Por sua vez, Schlueter, Costi, Sekerke e Forgey propuseram em [19] testes de controlabilidade de acoplamento de potência ativa com o nível de tensão e de potência reativa com o ângulo para cada barra no sistema New England de 30 barras. Os testes se mostraram mais precisos que os modelos de controlabilidade desacoplados quando o sistema se aproxima do colapso de tensão. O mesmo trabalho analisou múltiplos fluxos de carga, métodos de estabilidade transitória (preocupação com a convergência/divergência e a sua velocidade de processamento), métodos de linearização dinâmica que estabelecem testes que asseguram a mudança automática de taps, chaveamento de capacitores shunts, compensadores estáticos, métodos dinâmicos não-lineares e métodos de sensibilidade de fluxo de potência.

Este trabalho visa ao aumento da margem de carga através do cálculo do vetor tangente que relaciona a relação de sensibilidade entre as variáveis de estado e o parâmetro que altera o ponto de equilíbrio do sistema. Esta sensibilidade é calculada para a relação entre a potência reativa e o nível de tensão no regulador de tensão. Enquanto houver coerência entre ação e consequência (aumento de geração de potência reativa causar um aumento no nível de tensão), o sistema atua normalmente. Quando esta coerência não mais ocorrer, a sensibilidade indicará, resultando em indicação de bloqueio na geração de potência reativa. Esta metodologia encontra similares na literatura, como bloqueio de taps de transformadores e controle secundário de tensão, mas a proposta de controlar diretamente o regulador de tensão é mérito deste trabalho. Os

resultados obtidos com alguns sistemas-teste são encorajadores, mostrando o potencial da ferramenta proposta.

1.4. Organização do trabalho

O Capítulo 1 apresentou uma visão geral sobre o estudo de estabilidade de tensão em sistemas elétricos. O capítulo 2 é responsável pela apresentação dos conceitos teóricos que serão aplicados na caracterização do sistema elétrico de potência ocorrida no Capítulo 3. Por sua vez, a proposta da dissertação e os resultados são demonstrados no Capítulo 4. Por fim, as considerações finais são discutidas no Capítulo 5 e o Apêndice A descreve com detalhes quais os sistemas testes utilizados na metodologia proposta.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Neste capítulo são discutidos os fundamentos teóricos utilizados durante o desenvolvimento da dissertação. É realizada uma breve revisão das equações diferenciais ordinárias e, em seguida, introduzido o conceito das Bifurcações e do Método da Continuação, para, finalmente, apresentar o modelo de equações algébrico-diferenciais utilizadas no método de resolução quase-dinâmico.

2.1 Equações Diferenciais Ordinárias

Equações diferenciais aparecem com grande frequência em modelos que descrevem quantitativamente fenômenos em diversas áreas. Considere, por exemplo, o circuito RL alimentado pela tensão constante E mostrado na Figura 2.1. A equação que descreve o comportamento do sistema em função do tempo é dada por (2.1)

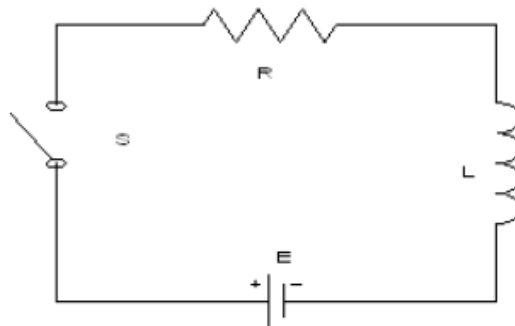


Figura 2.1 - Circuito RL simples

$$E - L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (2.1)$$

A equação (2.1) é chamada de equação diferencial, uma vez que envolve a derivada de funções. Se uma equação diferencial tem apenas uma variável independente, então ela é chamada de equação diferencial ordinária.

A solução de uma equação diferencial ordinária é uma função da variável independente que satisfaça a equação. Assim,

a) $\frac{dy}{dx} = y$ tem-se $y(x) = ae^x$ como solução, sendo $a \in \mathfrak{R}$

b) $E - L \frac{di}{dt} - Ri = 0$ tem-se $i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right)$ como solução

c) $u''' = 0$ é satisfeita para $u(x) = p_2(x)$ onde $p_2(x)$ é qualquer polinômio de grau 2.

Tais exemplos ilustram o fato de que uma equação diferencial possui uma família de soluções. Contudo, para individualizar uma solução é preciso impor condições suplementares e, em geral, uma equação de ordem m requer m condições adicionais a fim de se ter uma única solução.

Se as condições fornecidas para a busca de solução única são localizadas em um mesmo ponto, trata-se de um problema de valor inicial, PVI, como mostrado a seguir:

$$\begin{cases} y'(x) = y \\ y(0) = 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} y''' + (x+1)y'' + \cos xy' - (x^2 - 1)y &= x^2 + y^2 \sin(x+y) \\ y(0) &= 1,1 \\ y'(0) &= 2,2 \\ y''(0) &= 3,3 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Por outro lado, se a equação diferencial envolve mais de uma variável independente, trata-se de uma equação diferencial parcial.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.4)$$

Considere agora uma barra de comprimento L sujeita a uma carga uniforme q . Este caso trata de um problema de valor de contorno, PVC, pois as condições suplementares estão localizadas em pontos distintos da barra, conforme descrito por (2.5)

$$\begin{cases} y^{(iv)}(x) + ky(x) = q \\ y(0) = y'(0) = 0 \\ y(L) = y''(L) = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

onde k é uma constante que depende do material da barra.

Se o comportamento de qualquer sistema não depender explicitamente do tempo, o sistema é dito autônomo e sua representação é dada por:

$$x' = f(x) \quad (2.6)$$

onde x é um vetor ($n \times 1$) de variáveis linearmente independentes que definem o estado do sistema. Qualquer variável real do conjunto de equações diferenciais pode ser escrita através de uma combinação linear das variáveis de estado.

O estudo do ponto de equilíbrio das equações diferenciais ordinárias está intimamente relacionado com o seu comportamento dinâmico e é alvo de análise da próxima seção.

2.2 Equilíbrio das Equações Diferenciais Ordinárias

Os pontos de equilíbrio de um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO), se existirem, são dados, levando em consideração a representação dada por (2.6), quando

$$f(x) = 0 \quad (2.7)$$

Um ponto de equilíbrio x_0 é dito assintoticamente estável se, para qualquer condição inicial x nas redondezas de x_0 , a solução de (2.7) permanece nas redondezas de x_0 quando o tempo tender para o infinito.

Um sistema de equações ordinárias linear apresenta uma única solução e pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\dot{x} = Ax \quad (2.8)$$

Os autovalores da matriz de estado A são dados por:

$$\det(A - \mu I) = 0 \quad (2.9)$$

Os autovalores definem a estabilidade do sistema, pois, se todos os autovalores da matriz A tiverem parte real negativa, o equilíbrio é assintoticamente estável. Na ocorrência de algum autovalor com parte real positiva, o equilíbrio torna-se instável.

Em sistemas não-lineares, múltiplas soluções podem ser encontradas. Assim, a estabilidade em regime permanente de sistemas não-lineares é obtida através do método de linearização em torno do ponto de equilíbrio qualquer (x_0). Definindo:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2.10)$$

$$\Delta \dot{x} = J \Delta x \quad (2.11)$$

onde o Jacobiano J é dado por:

$$J = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x = x_0} \quad (2.12)$$

Da mesma forma como foi definido para sistemas lineares, se a matriz Jacobiana possuir todos os autovalores com parte real negativa, o ponto de equilíbrio x_0 é assintoticamente estável. Pontos de equilíbrio estáveis são conhecidos como nós estáveis. Por outro lado, um ponto de equilíbrio é denominado fonte ou nós instáveis quando todos os autovalores da matriz de estado do sistema apresentarem parte real positiva. Se alguns autovalores possuírem parte real positiva, enquanto outros possuírem parte real negativa, o ponto de equilíbrio é conhecido como sela. Por fim, a existência de um autovalor nulo identifica que a matriz Jacobiana é singular. A bifurcação

sela-nó tem essa característica, e junto com as condições de transversalidade definem uma condição bastante importante nos estudos de estabilidade de tensão.

2.3 Teoria das Bifurcações

A teoria da bifurcação descreve o comportamento de um sistema não-linear quando um parâmetro é variado. É adicionado um vetor de parâmetros ao modelo da equação (2.7) apresentado na seção anterior.

$$x' = f(x, h) \quad (2.13)$$

onde x é um vetor de dimensão n composto pelas variáveis de estado do sistema e h representa o vetor de dimensão k composto pelos parâmetros que levam o sistema de um ponto de equilíbrio ao outro. É importante notar que para cada valor de h , existe um ponto de equilíbrio x_0 definido por:

$$f(x_0, h) = 0 \quad (2.14)$$

No presente trabalho não se detalhará a teoria da bifurcação, caracterizando somente as bifurcações sela-nó e a induzida por singularidade. Para os leitores interessados no assunto, é recomendado ler [20].

2.3.1 Bifurcação Sela-nó

Para uma abordagem inicial sobre o assunto, considere o seguinte sistema de equações diferenciais em \mathbb{R}^2 , com x e y sendo as variáveis de estado e h um parâmetro que altera o ponto de equilíbrio do sistema:

$$\begin{aligned} x' &= y \\ y' &= x^2 - y + h \end{aligned} \quad (2.15)$$

Para os pontos de equilíbrio ($x' = 0$ e $y' = 0$) claramente

$$x = \pm\sqrt{h} \quad (2.16)$$

A matriz Jacobiana do sistema é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial y} \\ \frac{\partial y}{\partial x} & \frac{\partial y}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2x & -1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

O determinante de A:

$$\det(A) = -2 \pm (2\sqrt{h}) \quad (2.18)$$

Para $h=0$, tem-se $\det(A)=0$, identificando dessa maneira uma das características da bifurcação sela-nó. Isso explica matematicamente porque a sensibilidade de uma variável de estado com relação ao parâmetro tende ao infinito no ponto de sela-nó. Outra característica importante é a união de pontos de equilíbrio (sendo um estável e o outro instável).

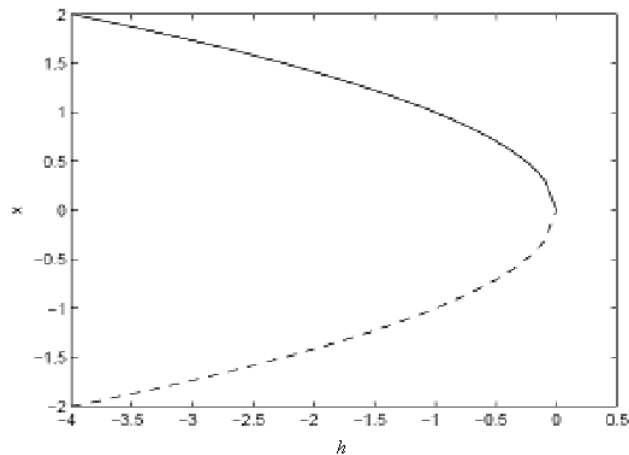


Figura 2.2 - Exemplo de curva caracterizando a bifurcação sela-nó

O Método da Continuação é utilizado para traçar a trajetória de um sistema de um ponto de equilíbrio até o ponto de bifurcação e é discutida na próxima seção.

2.4 Método da Continuação

Este método é dividido em dois passos para traçar o caminho até a bifurcação: Passo Previsor e Passo Corretor.

2.4.1 Passo Previsor

Assumindo que o primeiro ponto de equilíbrio de um sistema é conhecido e dado por (2.19).

$$f(x_0, h_0) = 0 \quad (2.19)$$

A sua derivada em relação às variáveis de estado x e aos parâmetros h resulta em:

$$D_x f(x_0, h_0) \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f(x_0, h)}{\partial h} = 0 \quad (2.20)$$

Rearranjando a equação acima, o vetor tangente é definido como sendo igual à equação (2.21)

$$VT_0 = \frac{\partial x_0}{\partial h} = -D_x^{-1} f(x_0, h_0) \frac{\partial f(x_0, h)}{\partial h} \quad (2.21)$$

A Figura (2.3) ilustra que quanto mais inclinada for a curva da bifurcação, maior é a norma do vetor tangente. É interessante que o passo previsor apresente grandes variações do parâmetro h para pontos distantes da bifurcação e pequenos nas suas proximidades. Dessa forma, o passo previsor, ao utilizar essa característica da norma do vetor tangente, é definido como:

$$\Delta h = \frac{k}{\|VT\|_2} \quad (2.22)$$

onde o coeficiente k é utilizado para acelerar ou retardar o processo até o ponto de bifurcação.

2.4.2 Passo Corretor

Com a utilização do passo predictor, o sistema desloca-se para uma nova condição de equilíbrio e a necessidade de encontrar a solução para este novo ponto é feita através do passo corretor. Logo, o passo predictor altera as variáveis de estado e o parâmetro conforme representado pelas equações (2.23) e (2.24)

$$x_1 = x_0 + \Delta x \quad (2.23)$$

$$h_1 = h_0 + \Delta h \quad (2.24)$$

Por sua vez, o passo corretor, ao ser perpendicular ao passo predictor, é solução de (2.25):

$$f(x_1, h_1) = 0 \quad (2.25)$$

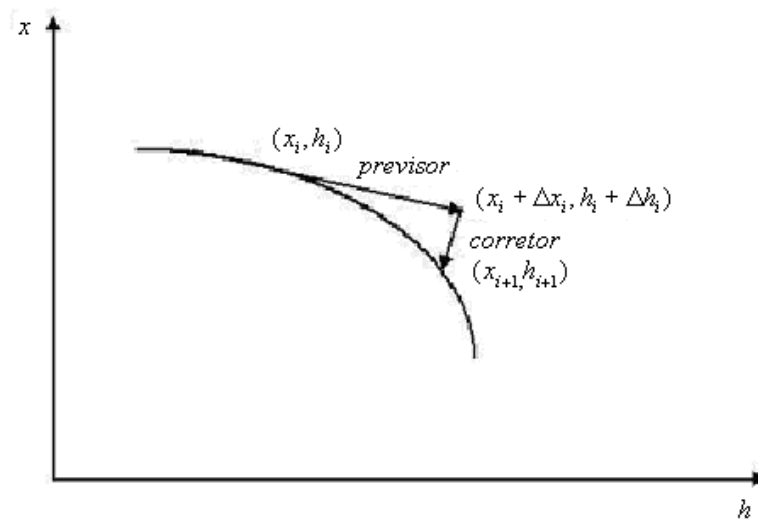


Figura 2.3 - Ilustração do funcionamento do Método da Continuação

A utilização dos passos predictor e corretor nos sistemas elétricos de potência é discutida com maiores detalhes no Capítulo 3. A próxima seção caracteriza os sistemas de equações algébrico-diferenciais, para, enfim, comentar sobre a bifurcação induzida por singularidade.

2.5 Sistemas de Equações Algébrico-Diferencial

Quando um sistema de equações diferenciais ordinárias está sujeito a um conjunto de restrições algébricas, trata-se de um conjunto de equações algébrico-diferenciais e é representado por:

$$x' = f(x, y, h) \quad (2.26)$$

$$0 = g(x, y, h) \quad (2.27)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado, enquanto que y corresponde às variáveis algébricas e h representa os parâmetros do sistema.

Para um valor fixo no vetor de parâmetros h , o equilíbrio das equações algébrico-diferenciais é dado por:

$$0 = f(x, y, h) \quad (2.28)$$

$$0 = g(x, y, h) \quad (2.29)$$

Semelhante ao ocorrido nas equações diferenciais ordinárias, linearizações são possíveis de serem realizadas em torno de um ponto de equilíbrio.

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Utilizando o teorema da função implícita [21], as equações algébricas podem ser incorporadas resultando em:

$$\Delta x' = \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right] * \Delta x \quad (2.31)$$

Novamente, a estabilidade depende dos autovalores da matriz de estados e, à medida que os parâmetros são variados, a ocorrência de bifurcações é esperada. Se $\frac{\partial g}{\partial y}$ for singular, outro tipo de bifurcação é observado: **a bifurcação induzida por singularidade**.

As equações algébrico-diferenciais (EAD) podem ser resolvidas através do Método de Newton-Raphson, caso haja somente interesse no regime permanente com a consideração de que o sistema consegue suportar o período transitório. Este tipo de solução que considera a solução de estado nulo de uma equação diferencial nas EAD é chamado de modelo quase-dinâmico e é apresentada em seguida após uma rápida discussão sobre o método iterativo de Newton-Raphson.

2.6 Método Iterativo de Newton-Raphson

Os métodos para resolução de sistemas não-lineares são iterativos, isto é, a partir de um ponto inicial $x^{(0)}$, geram uma seqüência $\{x^{(k)}\}$ de vetores e, na situação de convergência:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = x^* \quad (2.32)$$

onde x^* é uma das soluções do sistema não linear.

O método mais amplamente conhecido e estudado para resolver sistemas de equações não lineares é o de Newton-Raphson que consiste basicamente em se tomar um modelo local linear do conjunto de funções em torno de um ponto x_k , e este modelo é o plano tangente às funções em x_k .

Como forma de demonstração, o método de Newton-Raphson é utilizado no conjunto de equações definido em (2.33), considerando uma tolerância de erro absoluto igual a $\varepsilon = 10^{-4}$.

$$\begin{cases} x_1 + x_2 - 3 = 0 = f(x_1, x_2) \\ x_1^2 + x_2^2 - 9 = 0 = g(x_1, x_2) \end{cases} \quad (2.33)$$

Supondo que $x_1^{(0)} = 1$ e $x_2^{(0)} = 5$ são as estimativas iniciais do sistema, tem-se

$$\begin{pmatrix} f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) = 1 > \varepsilon \\ g(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) = 17 > \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Como não foi atendida a tolerância do erro, deve-se montar matriz Jacobiana e realizar atualizações das variáveis pretendidas, conforme demonstrado de (2.35) a (2.38):

$$J(x^{(0)}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2x_1 & 2x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 10 \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 10 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 \\ 17 \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.625 \\ -1.375 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$$\begin{pmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.625 \\ 3.625 \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Calculando novamente o vetor de erros,

$$\begin{pmatrix} f(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}) = 0 > \varepsilon \\ g(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}) = 4.53125 > \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

O processo deve ser repetido até que o vetor de erros atenda a tolerância especificada ε . A característica mais atraente é que sob condições adequadas envolvendo o ponto inicial, o sistema pode convergir com taxa quadrática [22]. A próxima seção introduz o modelo quase-dinâmico de resolução de EAD, onde ocorre a utilização do Método iterativo de Newton-Raphson.

2.7 Modelo Quase-Dinâmico

Seja o problema de valor inicial a seguir:

$$\begin{cases} f(x, y) = x' = 1 - \text{sen}(x) + \cos(y) \\ g(x, y) = 0 = x - y^2 \\ x(0) = 0.5 \\ y(0) = 2 \end{cases} \quad (2.40)$$

Conforme já mencionado, o objetivo da análise quase-dinâmica é o regime permanente. Dessa forma a equação diferencial em (2.40) pode ser transformada em algébrica, resultando em:

$$\begin{cases} f(x, y) = 0 = 1 - \text{sen}(x) + \cos(y) \\ g(x, y) = 0 = x - y^2 \\ x(0) = 0.5 \\ y(0) = 2 \end{cases} \quad (2.41)$$

Finalmente, para o processo iterativo quase-dinâmico, tem-se a utilização do Método Iterativo de Newton-Raphson de maneira idêntica aquela discutida na seção 2.6.

$$\begin{bmatrix} \Delta f(x, y) \\ \Delta g(x, y) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

A Figura 2.4 ilustra a solução do conjunto de equações (2.40) ao utilizar o método de integração trapezoidal e o quase-dinâmico.

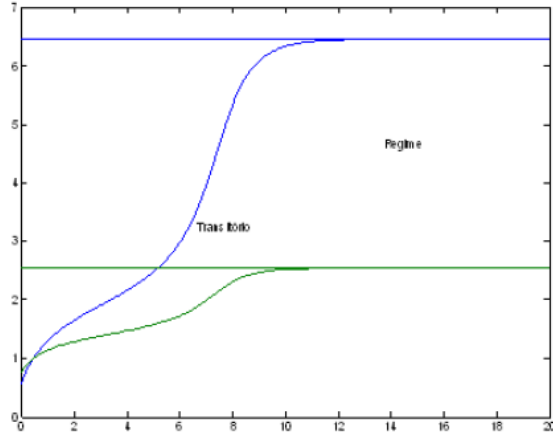


Figura 2.4 - Solução comparando o processo Dinâmico e Quase-Dinâmico

No próximo capítulo, todos os fundamentos teóricos brevemente revisados são aplicados aos elementos presentes nos sistemas elétricos de potência. A nova malha de controle proposta neste trabalho utiliza a análise estática e quase-dinâmica como ferramenta de simulação. O fenômeno de colapso de tensão, por sua vez, é descrito através do Método da Continuação aplicado nos sistemas elétricos.

Capítulo 3

Modelo Matemático do Sistema Elétrico

Neste capítulo a modelagem do sistema elétrico é desenvolvida utilizando os fundamentos teóricos abordados no Capítulo 2.

Os elementos da rede elétrica são caracterizados através da sua modelagem estática e/ou dinâmica. Assim, o Fluxo de Potência é utilizado como ponto de partida para qualquer estudo de estabilidade.

O Método da Continuação é novamente discutido, porém agora aplicado ao Sistema Elétrico de Potência. Por fim, a introdução às simulações estáticas e quase-dinâmicas e as limitações dos métodos são detalhadas.

3.1 Apresentação de alguns elementos básicos de um SEP

Em estudos de estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) alguns elementos podem ser caracterizados através de modelos estáticos, onde se tem uma representação em regime permanente. As linhas de transmissão, transformadores, capacitores série e shunt, reatores série e shunt, e os estatores das máquinas rotativas estão incluídos neste grupo onde o comportamento transitório, quando da ocorrência de uma perturbação, pode ser negligenciado.

Por outro lado, elementos como turbinas, rotores das máquinas síncronas e de indução, compensadores estáticos (SVC), reatores controlados (TCR), capacitores controlados (TCC), sistemas de excitação, reguladores de tensão (AVR) e reguladores de velocidade, etc., devem ser representados em estudos de estabilidade na modelagem dinâmica. Nestes casos, é fundamental verificar o comportamento transitório quando da ocorrência de uma mudança no ponto de equilíbrio do sistema.

Na próxima seção é dada ênfase à caracterização de alguns elementos do SEP para o modelo estático. Os elementos que devem ser analisados nos modelos que levam em consideração períodos anteriores ao regime permanente serão caracterizados após a definição das ferramentas de análise estática e juntamente com a apresentação do modelo quase-dinâmico, onde as equações dinâmicas desses aparelhos são inseridas.

3.1.1. Geradores e Compensadores Síncronos

Em uma modelagem estática, os geradores são caracterizados por barras de tensão controlada (tipo PV) ou de referência (tipo $V\theta$) que entregam potências ativas e reativas ao sistema.

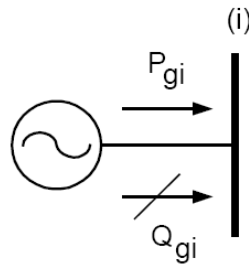


Figura 3.1-Representação simbólica de um gerador

As tensões terminais são variáveis, sendo controladas pelos reguladores de tensão, enquanto que a potência ativa gerada é controlada pela ação conjunta turbina/regulador de velocidade. Quando são atingidos os limites de geração de potência reativa, absorvida ou gerada, as barras geradoras perdem o controle do nível de tensão, transformando-se no tipo PQ, com potência constante no limite atingido.

A potência reativa de um gerador é limitada pela corrente de campo da máquina e pela ação da corrente de armadura sobre os enrolamentos de campo, conforme determinado pelas curvas de capacidade das máquinas.

Por sua vez, os compensadores síncronos são representados, desde que os limites de geração de potência reativa não sejam violados, por barras do tipo PV. São geradores que não fornecem potência ativa ao sistema, apenas reativa.

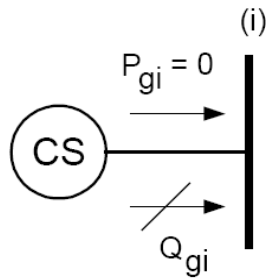


Figura 3.2-Representação simbólica de um compensador síncrono

3.1.2. Cargas

A elaboração de um modelo de carga não é algo tão simples de ser feito. A dificuldade de acesso aos equipamentos dos consumidores, a falta de informações precisas e as incertezas referentes ao comportamento das cargas, implicam em um verdadeiro desafio para o desenvolvimento de modelos compostos adequados.

Em um mesmo barramento, a composição de diversas cargas varia continuamente em função dos componentes ligados, das condições atmosféricas, do horário ao longo do dia, do mês, do status econômico, entre outros fatores.

Uma representação simbólica é ilustrada na figura (3.3) por um barramento de carga (i) onde são representadas as potências ativa e reativa consumidas pela carga.

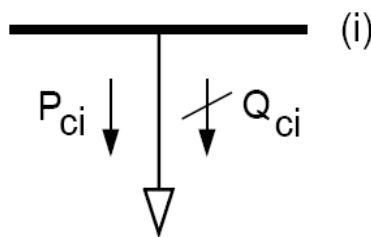


Figura 3.3-Representação simplificada de uma carga conectada ao barramento (i)

Embora algumas cargas sejam sensíveis às variações de frequência, a dependência com relação às variações de tensão é preponderante. Este modelo agregado de carga é representado através de combinações do tipo potência constante, impedância constante e corrente constante,

ou em uma forma exponencial da tensão, $P = P_0^\alpha$, onde α é um parâmetro que representa a dependência da carga com a tensão.

Conforme citado nas seções anteriores, os modelos estáticos de carga ignoram o comportamento dinâmico e, em estabilidade de tensão, tal fato é de suma importância como, por exemplo, os motores de indução. Quando a tensão em um motor de indução sofre uma diminuição, a carga do motor cai imediatamente. Como o escorregamento da máquina não pode mudar instantaneamente, a diferença entre as potências elétrica e mecânica faz com que a carga se recupere rapidamente.

Em [23], é demonstrado que o comportamento de modelos não-lineares de carga é um importante fator para determinar a dinâmica do colapso de tensão, pois é fundamental considerar o efeito transitório quando da ocorrência de algum distúrbio que altera o ponto de equilíbrio do sistema. Novamente, em [24] X. Hou e P. Ju evidencia que a instabilidade de tensão é determinada por ambas as características de geração e carga ao propor a uma análise gráfica tridimensional.

3.1.3. Reatores e Capacitores Shunt, Compensadores Estáticos

Um capacitor ou um reator shunt pode ser considerado como carga do tipo impedância constante, pois o fornecimento ou consumo de potência reativa está relacionado com base no quadrado do nível de tensão onde estão conectados.

$$Q_i = b_i \times V_i^2 \quad (3.1)$$

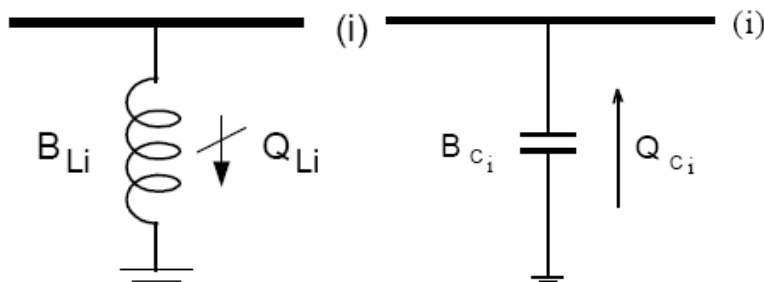


Figura 3.4-Representação de um capacitor e reator shunt

Em condições de baixo nível de tensão, os capacitores não apresentam resultados satisfatórios (situação que necessitaria de maior nível de fornecimento de potência reativa). Os compensadores estáticos (SVC) são uma alternativa para este problema desde que seus limites de fornecimento ou absorção de potência reativa não sejam violados.

Um compensador estático pode ser caracterizado como sendo um elemento de controle de tensão, que fornece ou absorve potência reativa e é composto por reatores e capacitores controlados.

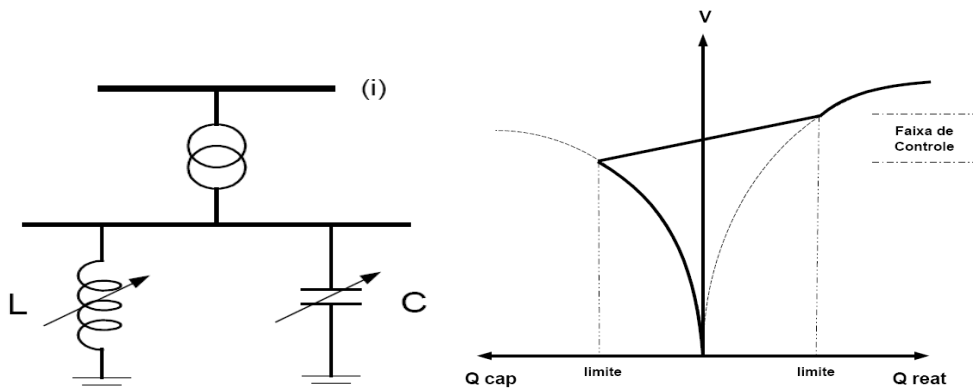


Figura 3.5-Representação simplificada de um compensador estático e sua faixa de operação

Para uma operação fora da faixa de controle, o compensador estático assume as mesmas características dos reatores ou capacitores shunt. Diferenciam-se dos compensadores síncronos porque não têm a propriedade de manter a potência reativa, após ser alcançado o seu limite operativo.

3.1.4. Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão costumam ser classificadas em curtas, médias e longas. No caso de linhas curtas, que representam da ordem de até 80 km de extensão, despreza-se o efeito capacitivo do modelo π equivalente. Com linhas de extensões entre 80 e 200 km aproximadamente, consideradas como linhas médias, o modelo π completo é utilizado. Para comprimentos acima de 200 km, utilizam-se os modelos π em cascata.

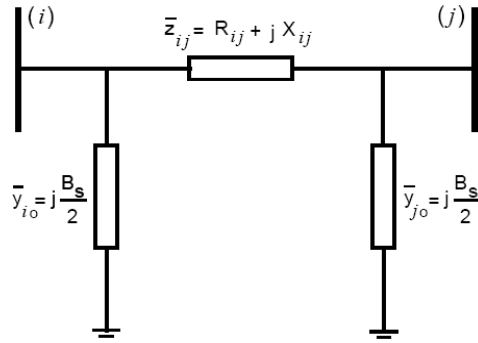


Figura 3.6-Circuito π equivalente de uma linha de transmissão

Em carga pesada, o efeito indutivo do ramo série da linha de transmissão é preponderante sobre o seu efeito capacitivo shunt. É uma situação crítica em se tratando de estabilidade de tensão, pois a redução na tensão devido ao elevado carregamento, e por conseqüência o aumento das perdas no sistema ocasiona a redução do fator de potência. Já em carga leve, as linhas fornecem potência reativa, pois o efeito capacitivo dos ramos shunt suplanta o efeito indutivo do ramo série.

Nas condições de carga pesada são utilizados capacitores shunt para reduzir o efeito indutivo das linhas de transmissão. Analogamente, em carga leve devem ser inseridos reatores shunt.

3.1.5. Transformadores

Estes elementos costumam ser representados por uma impedância série ligados entre as suas respectivas barras terminais.

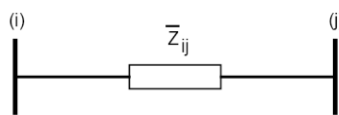


Figura 3.7-Representação de um transformador através de uma impedância

Os transformadores apresentam tap's que alteram o nível de tensão tanto em fase como em quadratura.

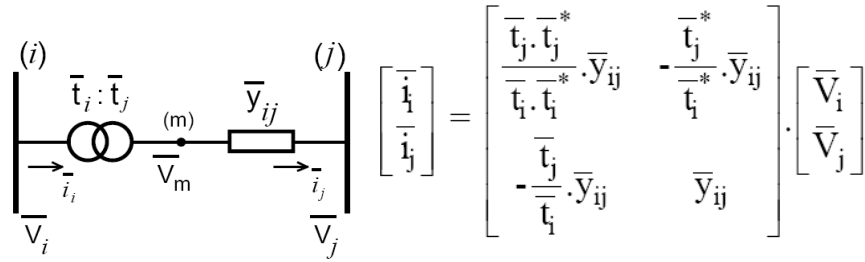


Figura 3.8-Transformador com taps genéricos e a sua representação matricial

Alguns transformadores possuem comutadores que permitem a alteração dos taps em operação com carga (LTC-load tap changer). Quando os níveis de tensão caem, as tensões da carga que são dependentes do LTC têm suas tensões reguladas. Essa ação pode ser exercida tanto de forma automática, através de um sistema de controle, quanto de forma manual.

3.1.6. Capacitores e Reatores Série

Os capacitores série são aplicados em linhas médias e longas com o intuito de reduzir as distâncias elétricas entre os barramentos terminais destas linhas, possibilitando maiores transferências de potência em regime permanente, e elevação dos limites impostos pelos estudos de estabilidade transitória. Em linhas curtas, o controle de tensão pode ser realizado por capacitores série.

Problemas de ressonância subsíncrona com graves efeitos torcionais nos eixos de unidades de geração termoeletricas podem ser causados devido a compensação capacitiva série em linhas de transmissão. A utilização de filtros torcionais evita tais efeitos.

Por sua vez, os reatores são inseridos em série na rede com a finalidade de limitar possíveis correntes de curto-circuito, salvaguardando, então, a operação de componentes como disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores de corrente, etc.

O estudo de Fluxo de Potência utiliza nas suas simulações a modelagem estática dos componentes de um sistema elétrico de potência e, conforme já afirmado no início deste capítulo, serve como ponto de partida em análise de estabilidade de sistemas elétricos.

Os elementos onde o período transitório deve ser considerado são apresentados após a introdução dos conceitos de estabilidade de sistemas elétricos, pois a sua aplicação ocorre nas

simulações quase-dinâmicas. Dessa forma, a próxima seção descreverá resumidamente o Fluxo de Potência para que o conceito de estabilidade seja definido logo em seguida.

3.2 Fluxo de Potência

O cálculo de Fluxo de Potência (carga) em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado de operação desta rede dada a sua topologia e certa condição de carga. Objetivam-se determinar as tensões e ângulos de todos os barramentos do sistema, assim como os fluxos de potência ativa e reativa entre eles.

As equações de potência ativa e reativa são dadas por:

$$\begin{aligned}
 P_i &= V_i^2 \times G_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\
 Q_i &= -V_i^2 \times B_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde V e θ são os módulos da tensão e ângulo de cada barra, enquanto que G_{ik} e B_{ik} são as partes reais e imaginárias da matriz de admitância, respectivamente. Como para cada barramento existem 4 variáveis de estado para serem determinadas para cada 2 equações de potência, é usual classificar as barras de acordo com o seu tipo, especificando duas variáveis e deixando as outras duas restantes como incógnitas.

As barras de carga, classificadas como PQ, apresentam como variáveis especificadas as suas potências ativas e reativas geradas, calculando-se então os valores de tensão e ângulo. Uma barra de geração pode ser classificada como PV, pois a potência ativa gerada e o seu nível de tensão são pré-definidos. Além disso, é necessário designar um gerador como referência angular, classificada como do tipo Swing, para o balanço de perdas do sistema.

Este trabalho utiliza o método iterativo de Newton-Raphson como ferramenta de solução do Fluxo de Carga. A aplicação deste método pode ser entendida a partir da analogia mostrada na Tabela 3.1.

A solução iterativa permite conhecer as tensões e os ângulos em todas as barras. Depois de convergido, calculam-se as potências ativa e reativa entre os barramentos do sistema, além da potência reativa gerada pelas máquinas.

Tabela 3.1- Analogia matemática-física

Matemático	Físico
$f(x)=0$	$\sum P=0$ $\sum Q=0$
x (variável de estado)	V e θ (variáveis de estado)
$x \rightarrow$ solução. Interrompe-se o processo quando a diferença entre duas soluções for menor que uma tolerância	Aceitar uma tolerância, neste caso, equivale a aceitar uma pequena violação na lei de Kirchoff

3.2.1 Limitações do Fluxo de Potência

Na formulação do Fluxo de Potência são assumidas algumas considerações para se obter o ponto de operação do sistema. Quando se classifica uma barra como sendo do tipo PV ou Swing, a tensão terminal é mantida em um valor constante, de forma que os geradores são providos de reguladores de tensão capazes de manter o nível de tensão constante.

Além disso, a barra Swing pode exceder seus limites de geração para um determinado caso de fluxo de potência, o que torna o ponto de operação inviável do ponto de vista prático. Quando isso acontece, uma das alternativas é escolher uma nova barra de referência angular e através de tentativa e erro buscar um novo ponto de equilíbrio.

3.3 Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade de um sistema elétrico está intimamente ligada à capacidade do sistema em manter-se em um determinado estado de operação e de alcançar um novo estado operativo sob condições de impacto [25].

É um tipo de estudo onde devem ser considerados os efeitos de equipamentos, as localizações e tipos de inúmeras perturbações possíveis, a coordenação global e local dos sistemas de controle e proteção, os esquemas especiais de emergência, as flutuações da carga, etc. Dessa forma, pode-se observar quão complexo seria um estudo dessa abrangência. Contudo, fatores como a severidade dos impactos considerados, o tempo de avaliação e as características dos elementos envolvidos contribuem para uma divisão dos estudos em três classes distintas: estabilidade angular do rotor, estabilidade de tensão e estabilidade de longo prazo ou de longo termo [26].

3.3.1 Estudo de estabilidade angular do rotor

Também denominada de estudo de estabilidade convencional. Avalia a habilidade do sistema de potência em manter suas unidades geradoras operando em condições de equilíbrio. Para tanto, analisam-se as potências fornecidas pelos geradores e os deslocamentos angulares de seus rotores.

Para pequenos impactos, como por exemplo, variações normais de carga, a instabilidade angular de regime permanente pode ocorrer ou por falta de conjugado sincronizante ou por insuficiência de conjugado de amortecimento. Os problemas associados à falta de amortecimento das oscilações podem ser causados pelos modos locais, interáreas, de controle e torsionais. Para esse tipo de impacto, as equações linearizadas podem ser utilizadas nas análises.

O estudo de estabilidade angular transitória avalia a habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo de suas unidades geradoras quando da ocorrência de impactos de perturbação como curtos-circuitos em elementos importantes e perdas de grandes blocos de geração. Para eventos dessa natureza, a instabilidade ocorre normalmente através do crescimento progressivo do deslocamento angular devido à falta de conjugado sincronizante. Devido às grandes excursões observadas para as variáveis de estado, a análise deve ser realizada através de equações não-lineares.

3.3.2 Estudo de estabilidade de tensão

Conforme mencionado no Capítulo 1, sendo substancialmente relacionado à indisponibilidade de suprimento de potência reativa, o estudo de estabilidade de tensão está ligado à observação da habilidade do sistema de potência em manter um perfil de tensões adequado em todos os seus barramentos, tanto em condições normais, como em situações de distúrbio.

A curva PV descreve o comportamento da tensão de um determinado barramento em função do aumento de sua carga.

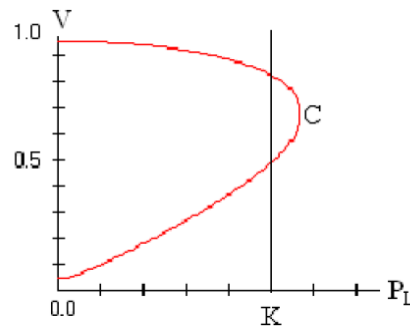


Figura 3.9 - Curva PV

A intersecção da reta K, que representa um carregamento constante e independente do nível de tensão, com a curva PV define dois pontos de operação. O ponto de operação na parte superior da curva é estável sob o ponto de vista de tensão, pois um aumento de carga tem como consequência uma queda de tensão. O ponto inferior da curva é instável, pois o acréscimo de carga representa elevação da tensão.

À medida que a carga do sistema aumenta, dois pontos de operação se aproximam até se tornarem somente um, localizados na extremidade da curva PV. Este único ponto representa o limite de carregamento do sistema, ou ponto de colapso de tensão. Neste ponto a matriz Jacobiana é singular e apresenta um autovalor nulo. Esta característica da matriz Jacobiana desempenha um papel bastante importante nos estudos de colapso de tensão.

Outros gráficos como, por exemplo, a curva PQ apresentada por M.H.Haque em [27] determina o limite de estabilidade de tensão em regime permanente. Este trabalho apenas utiliza os conceitos descritos pela curva PV, de forma que o leitor interessado é convidado a ler [27].

Com o auxílio dos estudos de estabilidade de tensão de regime permanente são esperadas respostas às seguintes questões: (a) o sistema de potência é estável para a condição de equilíbrio considerada?(b) a que distância está o atual ponto de operação da condição de instabilidade de tensão (margem de carga)? Onde e porque ocorre a instabilidade de tensão?

Ressalta-se que este trabalho tem por objetivo detectar a instabilidade de tensão antes da ocorrência do colapso de tensão, conforme será detalhado na metodologia exposta no Capítulo 4.

3.3.3 Estudo de Estabilidade de Longo Prazo

Esse tipo de estudo considera os elementos com constantes de tempo da ordem de vários segundos a muitos minutos, tais como: cargas termostáticas, transformadores com taps ajustáveis, limitadores de correntes nos geradores, turbinas, controle automático de geração, etc.

Logo, ao considerar a dinâmica lenta de determinados elementos, assume-se que a fase transitória tenha alcançado um amortecimento suficiente, capaz de admitir que o sistema esteja em condições de regime permanente, quando do início das avaliações de longo prazo. Dessa forma, os estudos assim definidos podem ser realizados através de equações linearizadas.

3.4 Modelagem dinâmica de elementos no SEP

Com a devida caracterização dos estudos de estabilidade de sistemas elétricos, essa seção apresenta o modelo dinâmico das máquinas e os respectivos controles utilizados neste trabalho.

A máquina síncrona atuando como gerador é um elemento classificado como ativo dentro de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é a fonte de energia. Dessa maneira, ela está intimamente relacionada à estabilidade do sistema a ser analisado.

Um sistema elétrico é constituído, resumidamente, por “nb” barras e “ng” geradores. Cada gerador possui uma dinâmica associada ao seu modelo e é também equipado com reguladores de tensão e velocidade.

3.4.1 Gerador Síncrono

O modelo de Dois Eixos de gerador (IEEE 2.2) [28-29] considera a representação de quatro enrolamentos sendo dois de eixos direto e dois no eixo em quadratura, conforme a Figura 3.10.

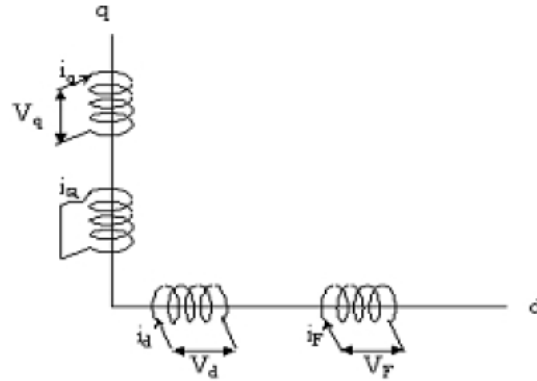


Figura 3.10 - Representação do modelo de Dois Eixos (IEEE 2.2)

Estes quatro enrolamentos são obtidos através da transformação d-q-0. O enrolamento (F), localizado no eixo direto, representa o campo da máquina síncrona, enquanto que o enrolamento (Q), situado no eixo em quadratura, corresponde a um enrolamento amortecedor.

Algumas simplificações são consideradas no desenvolvimento do presente modelo:

- a) as resistências do estator são admitidas nulas ($R_s=0$);
- b) operação balanceada, que permite desprezar a seqüência zero;
- c) as tensões de efeito transformador são admitidas desprezíveis em comparação com as tensões de efeito motcional, o que permite considerar:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = \frac{d\phi_q}{dt} = 0 \quad (3.3)$$

Assim as equações diferenciais do modelo de dois eixos que descrevem o comportamento dinâmico da máquina são dadas por:

$$\frac{dEd_i'}{dt} = \frac{1}{T_{q0i}'} \times \left[-Ed_i' + (Xq_i - Xq_i')Iq_i \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{dE_{q_i}'}{dt} = \frac{1}{T_{d0i}'} \times [E_{fdi}' - E_{q_i}' - (X_{d_i}' - X_{d_i}')Id_i] \quad (3.5)$$

$$\frac{dw_{ri}}{dt} = \frac{1}{2H_i} \times [T_{mi}' - T_{ei}' - D_i(w_{ri} - 1)] \quad (3.6)$$

$$\frac{d\delta_i'}{dt} = 377(w_{ri} - w_{rk}) \quad (3.7)$$

onde E_{d_i}' , E_{q_i}' , Id_i , Iq_i , X_{d_i}' e X_{q_i}' , T_{d0i}' e T_{q0i}' são as tensões, correntes, reatâncias e constantes de tempo transitórias de eixo direto e em quadratura, respectivamente. Em regime permanente as reatâncias são dadas por X_{d_i} e X_{q_i} , enquanto que D_i é o coeficiente de amortecimento mecânico, H_i é a constante de tempo de inércia do gerador e T_{mi} , o torque mecânico da máquina.

O modelo de dois eixos contém mais duas equações algébricas responsáveis por realizar a interface entre o gerador e a rede:

$$Id_i = \frac{E_{q_i}' - V_i \times \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{d_i}'} \quad (3.8)$$

$$Iq_i = \frac{V_i \times \sin(\delta_i - \theta_i) - E_{d_i}'}{X_{q_i}'} \quad (3.9)$$

Por fim, torque elétrico (T_{ei}) é dado pela equação (3.10) e ângulo interno da máquina δ_i deve ser referenciado em relação a um ângulo de referência conforme demonstrado de (3.11) a (3.14):

$$T_{ei} = E_{d_i}' \times Id_i + E_{q_i}' \times Iq_i + (X_{q_i}' - X_{d_i}') \times Id_i \times Iq_i \quad (3.10)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = 377(w_{ri} - 1) \quad (3.11)$$

$$\frac{d\delta_k}{dt} = 377(w_{rk} - 1) \quad (3.12)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} - \frac{d\delta_k}{dt} = 377(w_{ri} - 1) - 377(w_{rk} - 1) \quad (3.13)$$

$$\frac{d\delta_i'}{dt} = 377(w_{ri} - w_{rk}) \quad (3.14)$$

3.4.2 Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão

Os sistemas de excitação e seus reguladores de tensão em uma máquina síncrona têm como finalidades principais a alimentação com corrente contínua do enrolamento de campo e o estabelecimento de funções de controle e proteção. Estas características tornam possível um bom desempenho operativo destas máquinas e dos sistemas de potência aos quais elas estão ligadas.

Um típico sistema de excitação pode ser representado através de um diagrama de blocos conforme demonstrado pela Figura (3.11).

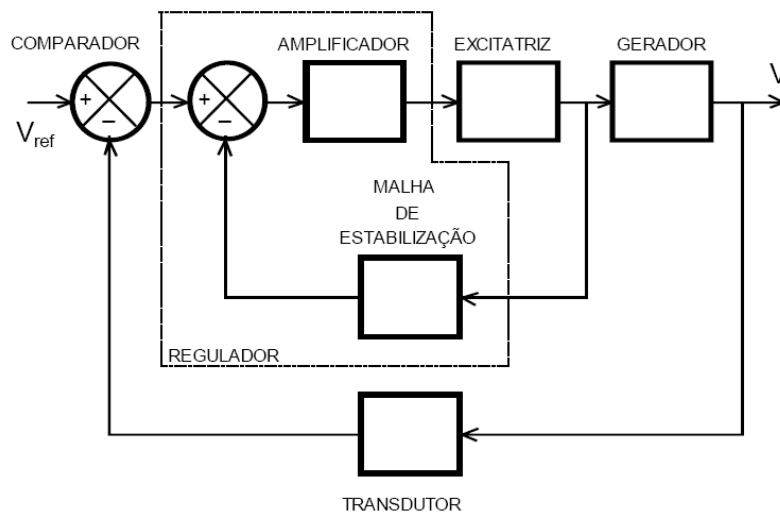


Figura 3.11 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação

O excitador é responsável por fornecer a potência necessária ao enrolamento de campo da máquina síncrona. Amplificadores, por sua vez, aumentam os sinais de controle do excitador, enquanto que a malha de estabilização auxilia na estabilização do controle, podendo ser disposta em cascata ou em realimentação. As diferenças entre as tensões terminais e a de referência são realizadas pelos transdutores da tensão terminal e, caso gere um sinal de erro, alimentará os amplificadores do regulador de tensão. Por fim, os sinais adicionais estabilizantes (PSS) têm o intuito de proporcionar amortecimento nas oscilações dos sistemas de potência.

O conjunto formado pelos amplificadores, a malha de estabilização e seus respectivos limitadores e circuitos de proteção definem o que se denomina de regulador de tensão. Normalmente a potência nominal de um sistema de excitação é da ordem de 0,2 a 0,8% da potência nominal da respectiva unidade geradora.

De uma forma geral, os sistemas de excitação podem ser divididos em rotativos ou estáticos. Os sistemas de excitação rotativos consideram a presença de excitatriz rotativa, como um gerador de corrente contínua, uma máquina de relutância (gerador de indução) ou um alternador. Por outro lado, nos sistemas de excitação estáticos a alimentação do campo do gerador é realizada diretamente por retificadores estáticos controlados, sendo os mesmos alimentados ou pelos terminais do gerador ou por um barramento auxiliar da usina. As respostas das constantes de tempo do tipo de excitação estática são muito mais rápidas se comparadas com as rotativas.

Em reguladores automáticos de tensão (AVR) existem blocos de compensação de carga, responsáveis por compensar as diferenças existentes entre os locais onde as tensões são medidas e onde elas devem ser controladas, conforme exposto pela Figura (3.12).

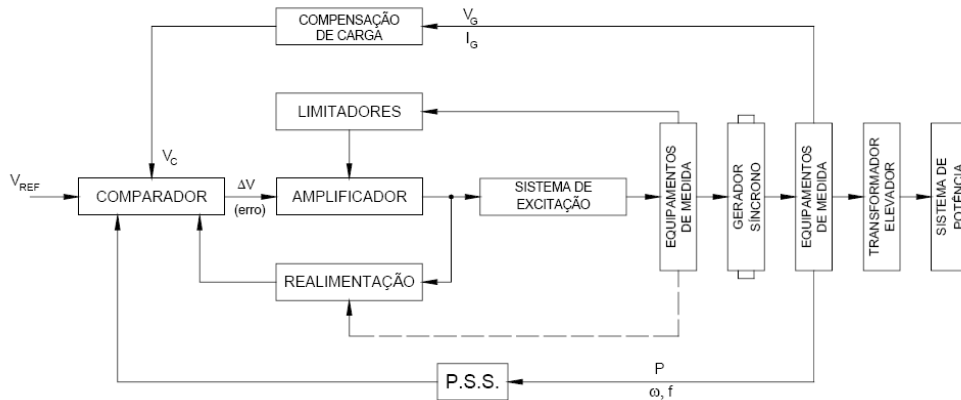


Figura 3.12- Representação simplificada do regulador automático de tensão

Este trabalho utiliza o modelo de regulador de tensão “IEEE type 1 excitation system” apresentado com maiores detalhes em [28]. As equações diferenciais que descrevem o regulador são dadas por:

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = \frac{1}{T_{ei}} \left[- (K_{ei} + S_{ei}(E_{fdi})) E_{fdi} + V_{ri} \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{dV_{ri}}{dt} = \frac{1}{T_{ai}} \left[-V_{ri} + K_{ai} \times R_{fi} - \left(\frac{K_{ai} \times K_{fi}}{T_{fi}} \right) E_{fdi} + K_{ai} (V_{refi} - V_i) \right] \quad (3.16)$$

$$\frac{dR_{fi}}{dt} = \frac{1}{T_{fi}} \left[-R_{fi} + \frac{K_{fi}}{T_{fi}} \times E_{fdi} \right] \quad (3.17)$$

onde V_i é o módulo da tensão terminal da máquina síncrona, V_{ri} é a tensão de saída do regulador de tensão e V_{refi} , a tensão de referência. Já E_{fdi} é a tensão do campo da máquina síncrona e $S_{ei}(E_{fdi})$ modela a função de saturação da excitatriz que será desprezada neste trabalho. As outras constantes de tempo são mais bem explicadas em [28-29-30], de forma que o leitor interessado é convidado a ler.

3.4.3 Equações de Rede

Nos estudos de Fluxo de Potência uma barra classificada como PV apresenta a sua potência ativa gerada especificada enquanto que para uma barra PQ são definidos os valores de potência ativa e reativa gerados. Porém, quando um gerador é caracterizando de uma maneira mais detalhada considerando períodos anteriores ao de regime permanente, as equações de potências, antes especificadas no fluxo de potência, sofrem uma ligeira alteração e são calculadas. As equações são apresentadas a seguir:

Para as barras de geração:

$$\Delta P_i = \left[Ed_i' \times Id_i + Eq_i' \times Iq_i + (Xq_i' - Xd_i') Id_i \times Iq_i \right] - P_{i_{load}} - P_{i_{calculado}} \quad (3.18)$$

$$\Delta Q_i = \left[Eq_i' \times Id_i - Ed_i' \times Iq_i - Xq_i' \times Iq_i^2 - Xd_i' \times Id_i^2 \right] - Q_{i_{load}} - Q_{i_{calculado}} \quad (3.19)$$

Para as barras sem geração:

$$\Delta P_i = P_{i_{gerado\ especifica\ do}} - P_{i_{load}} - P_{i_{calculado}} \quad (3.20)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i_{gerado\ especifica\ do}} - Q_{i_{load}} - Q_{i_{calculado}} \quad (3.21)$$

onde:

$$P_{i_{calculado}} = \left[V_i^2 \times G_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^{nb} V_k (G_{ik} \times \cos \theta_{ik} + B_{ik} \times \sen \theta_{ik}) \right] \quad (3.22)$$

$$Q_{i_{calculado}} = \left[-V_i^2 \times B_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^{nb} V_k (G_{ik} \times \sen \theta_{ik} - B_{ik} \times \cos \theta_{ik}) \right] \quad (3.23)$$

3.5 Estabilidade de Tensão - Métodos Utilizados para Análises

Este trabalho apresenta uma nova ferramenta em estudos de Estabilidade de Tensão que possibilita o aumento da margem de carga em sistemas elétricos. Contudo, a escolha do modelo que caracteriza o sistema analisado é de suma importância.

Modelos mais simplificados servem como ponto de partida, mas dependendo de quais aproximações sejam feitas, o resultado obtido pode não condizer com a realidade. Por outro lado, caracterizações muito detalhadas de sistemas elétricos exigem processamentos computacionais pesados. Dessa forma, conclui-se que uma pessoa que trabalhe como analista de sistemas elétricos deve aliar ao seu conhecimento técnico a utilização do bom senso quando efetuar a escolha do método.

A relação entre o modelo dinâmico de um sistema e o emprego do fluxo de potência é retratada por P.W.Sauer e M.A.Pai em [31], onde ocorre a linearização das equações dinâmicas e a preocupação com as variáveis de estado em regime permanente. Tal característica é utilizada em [32] ao se considerar um aumento tipo rampa de carga do sistema com ações de controle como o bloqueio de taps, chaveamento de capacitores shunt e corte de carga.

Dessa forma, os métodos da Continuação e do Vetor Tangente, já mencionados anteriormente, são detalhados dentro da análise de estabilidade de tensão. Logo em seguida, o processo de simulação estático e quase-dinâmico é devidamente caracterizado.

3.5.1 Método do Vetor Tangente

Retornando ao modelo de fluxo de carga representado pelo seguinte conjunto de equações algébricas:

$$f(x, h) = 0 \quad (3.24)$$

onde h é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio para outro e x representa as variáveis de estado.

Seja o sistema linearizado de equações representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

onde J representa a matriz Jacobiana do fluxo de carga, o vetor ΔP contém as variações incrementais de potência ativa, o vetor ΔQ contém as variações incrementais de potência reativa e os vetores $\Delta\theta$ e ΔV contêm, respectivamente, as correspondentes variações incrementais nos ângulos e módulos das tensões nodais. Da equação anterior, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

O aumento de carga é definido como se segue abaixo:

$$\begin{aligned} P &= P_0 * (1 + \Delta h) \\ Q &= Q_0 * (1 + \Delta h) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Tem-se que:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P - P_0 = P_0 * \Delta h \\ \Delta Q &= Q - Q_0 = Q_0 * \Delta h \end{aligned} \quad (3.28)$$

Substituindo na equação acima, o vetor tangente finalmente é obtido:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} * \frac{1}{\Delta h} = [J]^{-1} * \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Um pequeno esforço computacional é requerido para se calcular o vetor tangente. O maior componente em módulo deste vetor identifica a variável que mais se modifica para uma variação de carga, e a barra à qual esta variável estiver relacionada é a barra crítica.

3.5.2 Método da Continuação aplicado nos Sistemas Elétricos

A instabilidade de tensão surge quando a geração e/ou a transmissão não consegue atender a demanda requerida pela carga. Dessa forma, a determinação do ponto de máximo carregamento é fundamental para a operação segura do sistema elétrico. Existem na literatura

vários métodos de obtenção deste ponto de máximo carregamento, com destaque para o método da Continuação [33], que utiliza o vetor tangente como passo previsor.

Este método consiste em traçar o diagrama da bifurcação, e com sucessivos incrementos de carga, determinar a margem de carga e o ponto de colapso de tensão. O método é dividido em três fases: passo previsor, passo corretor e parametrização.

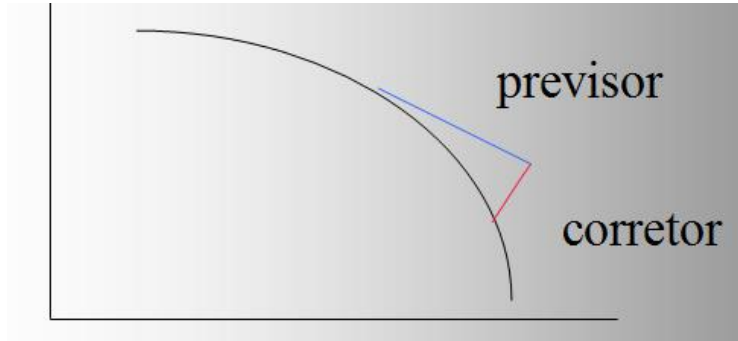


Figura 3.13 - Método da Continuação

3.5.2.1 Passo Previsor

A partir de uma direção de crescimento de carga (Δh) encontram-se os novos incrementos das variáveis de estado (Δx). O vetor tangente é usado para este fim, e o tamanho do passo é dado pela equação (3.30).

$$\Delta h = \frac{k}{\|VT\|_2} \quad (3.30)$$

Onde:

- k é uma constante que determina a velocidade do passo.
- $\|VT\|_2$ é a norma euclidiana do vetor tangente.

3.5.2.2 Passo Corretor

Consiste em achar a solução a partir do passo previsor. Neste trabalho, conforme proposto em [33], o passo corretor obtido a partir do programa de fluxo de carga, considerando o passo previsor como estimativa inicial. Em geral a convergência é obtida rapidamente.

A parametrização não será utilizada neste trabalho, sendo desnecessário, portanto, o relato da sua utilidade e definições.

3.6 Métodos de Simulação

3.6.1 Análise Estática

Como pequenas perturbações podem levar o sistema ao ponto de colapso de tensão, o modelo estático é utilizado neste trabalho. A análise estática da estabilidade de tensão de um sistema de potência requer o exame dos seguintes aspectos:

- Determinar se o ponto de operação é estável sob o ponto de vista de tensão.
- Determinar a barra ou área crítica do sistema de potência.
- Determinar a margem de carga entre o ponto de operação e o ponto de colapso de tensão.

Quando se determina a margem de carga de um sistema elétrico, obtém-se um índice de segurança do sistema, tendo em vista que a distância até o ponto de bifurcação é conhecida. A teoria da bifurcação é uma ferramenta bastante útil para a identificação deste ponto, pois descreve como as características físicas da carga afetam o comportamento do sistema.

3.6.2 Modelo Quase-Dinâmico

Conforme explicado no Capítulo 2, o modelo quase-dinâmico somente pode ser utilizado quando o conjunto de equações não-lineares do sistema apresenta estabilidade transitória. Dessa forma, utiliza-se o Método Numérico de Newton-Raphson no seguinte conjunto de equações diferenciais:

$$\frac{dEd_i'}{dt} - \frac{1}{Tq\theta_i'} \left[-Ed_i' + (Xq_i - Xq_i')Iq_i \right] = 0 = \Delta a \quad (3.31)$$

$$\frac{dEq_i'}{dt} - \frac{1}{Td\theta_i'} \left[E_{fd_i} - Eq_i' - (Xd_i - Xd_i')Id_i \right] = 0 = \Delta b \quad (3.32)$$

$$\frac{dw_{r_i}}{dt} - \frac{1}{2H} [Tm_i - Te_i - D_i \times (w_{r_i} - 1)] = 0 = \Delta c \quad (3.33)$$

$$\frac{d\delta_i'}{dt} - 377(w_{r_i} - w_{r_k}) = 0 = \Delta d \quad (3.34)$$

$$\frac{dE_{fd_i}}{dt} - \frac{1}{Te_i} [-(Ke_i + Se(E_{fd_i})) \times E_{fd_i} + Vr_i] = 0 = \Delta f \quad (3.35)$$

$$\frac{dVr_i}{dt} - \frac{1}{Ta_i} \left[-Vr_i + Ka_i \times Rf_i - \left(\frac{Ka_i \times Kf_i}{Tf_i} \right) \times E_{fd_i} + Ka_i \times (V_{ref_i} - V_i) \right] = 0 = \Delta g \quad (3.36)$$

$$\frac{dRf_i}{dt} - \frac{1}{Tf_i} \left[-Rf_i + \frac{Kf_i}{Tf_i} \times E_{fd_i} \right] = 0 = \Delta h \quad (3.37)$$

As equações de (3.31) a (3.37) referem-se aos modelos do gerador e reguladores de tensão descritos nas seções 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente. As equações de rede, seção 3.4.3, devem ser acrescentadas a este conjunto de equações.

Dessa forma, o modelo quase-dinâmico apresenta o seguinte vetor de variáveis de estado:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ E_{d'} \\ E_{q'} \\ \delta \\ w_r \\ E_{fd} \\ Vr \\ Rf \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Os ângulos e as tensões terminais (θ e V , respectivamente), diferentemente de quando se utiliza o Fluxo de Potência, são calculados, considerando o procedimento demonstrado de (3.11) a (3.14), para todas as barras.

O Método de Newton-Raphson é extremamente dependente dos valores iniciais das suas variáveis de estado. Os valores iniciais de ângulos e das tensões terminais das barras são obtidos através do fluxo de potência convencional. Para as outras variáveis de estado, considera-se que a derivada da variável de estado em função do tempo apresenta um valor nulo e obtém-se o seu

valor algebricamente. A maior dificuldade é o valor inicial da tensão de campo da máquina, resultado da seguinte operação fasorial demonstrada por (3.39) e (3.40).

$$\overline{E_{q_0}} = \overline{V} + jX_q \overline{I} \quad (3.39)$$

$$E_{fd} = \left| \overline{E_{q_0}} \right| \pm (X_d - X_q) \times \left| \overline{I_d} \right| \quad (3.40)$$

O sinal de \pm na equação (3.40) deve-se ao fato de o sentido do fasor $\overline{I_d}$ ser importante no diagrama fasorial. A não preocupação com esse detalhe interfere nas condições iniciais das outras variáveis e é motivo de conclusões equivocadas.

Capítulo 4

Proposta de Bloqueio no Ajuste da Tensão Terminal das Máquinas Síncronas e Apresentação dos Resultados

O presente capítulo é responsável pela aplicação da proposta de bloqueio. Considera-se que com a caracterização das metodologias empregadas para análise do sistema elétrico (Capítulo 3) e a apresentação dos sistemas testes encontrada na seção A do Apêndice, ao leitor é disponível todas as ferramentas para a compreensão do objetivo deste trabalho.

4.1 Proposta de Bloqueio

O controle da tensão terminal dos geradores é realizado através de reguladores de tensão. Sob condições normais, as tensões terminais têm que se manter constante, mas com o aumento do carregamento, exige-se maior fornecimento de potência reativa ao sistema. Caso os limites de corrente de campo e de armadura sejam violados, torna-se impossível manter os mesmos níveis de tensão. Tal situação pode contribuir para o caso do colapso de tensão.

Este trabalho utiliza os conceitos do Método da Continuação e a ferramenta do Vetor Tangente com a finalidade de ampliar a margem de carga do sistema, bloqueando ou não o nível de tensão nos terminais das máquinas geradoras. Logo, o trabalho busca a emulação do diagrama de blocos incorporado ao regulador de tensão apresentado na Figura 4.1.

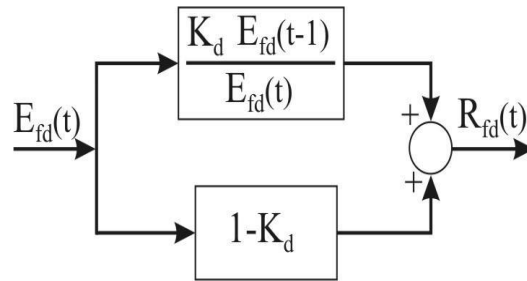


Figura 4.1 - Representação da ação de controle

A chave ‘ K_d ’ pode assumir os valores 0 ou 1. A identificação numérica dessa variável, levando em consideração a modelagem estática do sistema elétrico de potência, é executada da seguinte maneira:

- Para um ponto de operação conhecido, monta-se o Jacobiano completo. Por Jacobiano completo entende-se que as derivadas parciais de todas as equações de potência ativa e reativa em relação ao ângulo de fase e nível de tensão, incluindo as equações de potência reativa das barras PV. Portanto, somente as equações de potência ativa e reativa da barra *swing* não são consideradas.

- Para este Jacobiano, calcula-se o vetor tangente, considerando um incremento de geração de potência reativa na barra PV de interesse como o parâmetro, conforme mostrado na equação (4.1).

$$VT_{\text{completo}} = [J]_{\text{completo}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0.1 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- A partir do vetor tangente, monitora-se a sensibilidade do nível de tensão na barra de interesse em função de uma variação na potência reativa. Enquanto o controle produzir resultados coerentes (aumento de potência reativa produz aumento no nível de tensão), K_d assume o valor “0”. Quando este controle apresentar incoerência, K_d torna-se “1”, conforme resumido na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo do controle proposto

Matemático	Físico	Valor de K_d
$\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_k} > 0$	O aumento de potência reativa na barra k significa um aumento na tensão na barra i.	0
$\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_k} < 0$	A diminuição de potência reativa na barra k significa uma diminuição na tensão na barra i.	1

O índice apresentado pela Tabela 4.1 leva em consideração a relação da variação da potência reativa em função do aumento ou diminuição do nível de tensão. Dessa forma, a variação da potência reativa na barra k (ΔQ_k) e a variação da tensão de campo do gerador (ΔE_{fd_i}) estão relacionadas. Portanto, baseando-se na modelagem quase-dinâmica, tem-se uma pequena modificação ao caracterizar o valor da chave “Kd”, conforme demonstrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resumo do controle proposto de maneira alternativa

Matemático	Físico	Valor de K_d
$\frac{\Delta E_{fd_i}}{\Delta Q_k} > 0$	Um aumento de potência reativa na barra k significa um aumento na tensão de campo da máquina conectada na barra i.	0
$\frac{\Delta E_{fd_i}}{\Delta Q_k} < 0$	Uma diminuição de potência reativa na barra k significa uma diminuição na tensão de campo da máquina conectada na barra i.	1

Nesta formulação “quase-dinâmica” para identificação da chave “Kd”, o cálculo do Jacobiano completo e do vetor tangente se diferencia da Tabela 4.1 porque são consideradas as equações linearizadas de potência de rede e dos modelos de geradores e controles envolvidos.

As caracterizações da chave “Kd” dadas pelas Tabelas 4.1 e 4.2 são intimamente relacionadas, pois quando a tensão de campo é travada, a tensão terminal onde a máquina correspondente está conectada não se mantém constante. Esse controle, inserido no bloco regulador de tensão da máquina, permite manter o controle de tensão do sistema de forma estável. Note que é similar ao desenvolvido em [34], quando o bloqueio dos tapes de LTC’s (*load tap changing*) era o foco de estudo.

A próxima seção apresenta os resultados obtidos pela dissertação. Em um primeiro momento a simulação baseada na modelagem estática é exposta, com e sem a aplicação do controle proposto, para em seguida, o modelo quase-dinâmico ser analisado de maneira análoga. Por fim, a comparação dos resultados no final deste capítulo.

4.2 Resultados da Análise Estática

4.2.1 Sistema de 3 barras sem a proposta de bloqueio

Empregou-se o método da continuação para a determinação da margem de carga no sistema de 3 barras descrito no Apêndice A. Após obtenção desta margem, avaliou-se a sensibilidade para diversos pontos operativos, conforme mostrado na Tabela 4.3. Os valores de tensão nos Barramentos 2 e 3, assim como a componente do vetor tangente completo que relaciona o nível de tensão da Barra 3 em função da injeção de potência reativa na Barra 2 foram monitorados.

Os valores iniciais do módulo e ângulo da tensão, para cada novo carregamento foram extraídos dos valores finais do fluxo de potência anterior convergido.

O critério de parada neste teste foi o ponto de colapso obtido pelo método da continuação, conforme resumido na Figura 4.2.

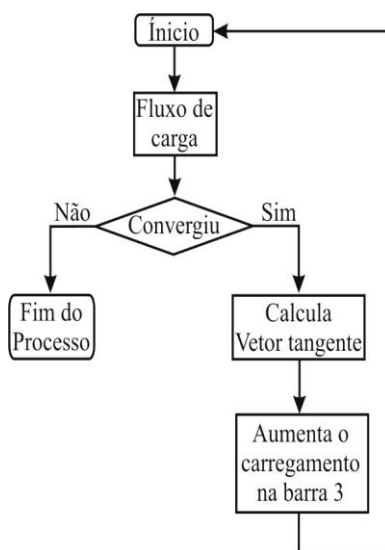


Figura 4.2 - Fluxograma do teste para o sistema de 3 barras, sem controle, modelo estático

Tabela 4.3 - Resultados para o sistema de 3 barras, sem controle, modelo estático

Fator de Carregamento (h)	Número de Iterações	$\Delta V_3/\Delta Q_2$	Fator de Carregamento (h)	Número de Iterações	$\Delta V_3/\Delta Q_2$
1,0	3	144,693	2,5	1	0,0391
1,1	1	0,7557	2,6	1	0,0359
1,2	1	0,3796	2,7	1	0,0331
1,3	1	0,2495	2,8	1	0,0305
1,4	1	0,1838	2,9	1	0,0283
1,5	1	0,1441	3,0	1	0,0263
1,6	1	0,1177	3,1	1	0,0244
1,7	1	0,0988	3,2	1	0,0228
1,8	1	0,0847	3,3	1	0,0212
1,9	1	0,0738	3,4	1	0,0198
2,0	1	0,0650	3,5	1	0,0184
2,1	1	0,0579	3,6	1	0,0172
2,2	1	0,0520	3,7	1	0,0159
2,3	1	0,0470	3,8	2	0,0146
2,4	1	0,0428	3,9	2	0,0133
			4,0	Divergiu	

Como pode ser observado na Tabela 4.3, o máximo carregamento suportado pelo sistema apresenta o valor de $h=4,0$ p.u.. A monitoração da tensão na Barra 3 está representado, por sua vez, na Figura 4.3.

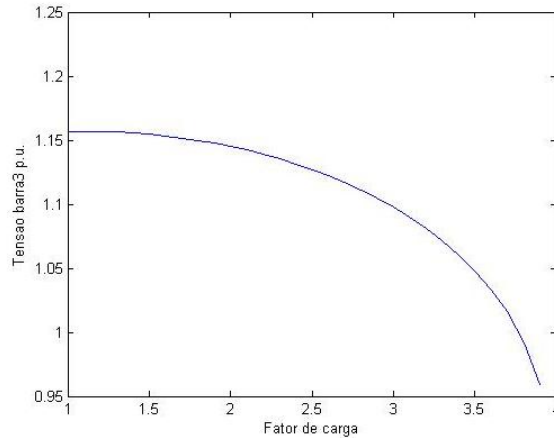


Figura 4.3 - Tensão da Barra 3 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo estático

4.2.2 Sistema de 3 barras com a proposta de bloqueio

Nesta proposta, a barra 2, inicialmente classificada como tipo PV para o carregamento $h=1,0$ p.u., supre toda parcela de potência ativa da carga na Barra 3. O fluxo de carga é realizado, novamente, até o ponto de colapso de tensão. Ocorrerá a avaliação do limite de sensibilidade da chave K_d , dada pela condição (4.2), para cada ponto operativo.

$$\left| \frac{\Delta V_3}{\Delta Q_2} \right| > 0,015 \quad (4.2)$$

Observe que o valor da tolerância na equação (4.2) é estipulado a partir da Tabela 4.3 e, embora não seja nulo, é bem próximo de zero. Caso a Barra 2 seja do tipo PV e a condição imposta pela equação (4.2) seja violada, a Barra 2 mudará para PQ. Quando a violação da equação (4.2) não ocorrer, a barra continuará do tipo PV.

No entanto, quando a Barra 2 é PQ e a equação (9) for atendida, a Barra 2 muda seu tipo para PV novamente, voltando a controlar a tensão na Barra 3.

Os valores do monitoramento até o valor de $h=3,7$ são iguais ao caso anterior. Observe que a margem de carga sofreu um grande acréscimo, mudando seu valor de $h=3,9$ para $h=4,3$ p.u., conforme demonstrado na Tabela 4.4. As Figuras 4.4 e 4.5 retratam esta condição.

Tabela 4.4 - Resultados da proposta de bloqueio para o sistema de 3 barras, modelo estático

Fator de Carregamento (h)	Número de Iterações	$\Delta V_3/\Delta Q_2$	Tipo da Barra 2
3,7	1	0,0159	PV
3,8	2	0,0146	PV
3,9	2	0,0148	PQ
4,0	2	0,0149	PQ
4,1	1	0,0150	PQ
4,2	2	0,0139	PV
4,3	1	0,0140	PQ
4,4	Divergiu		

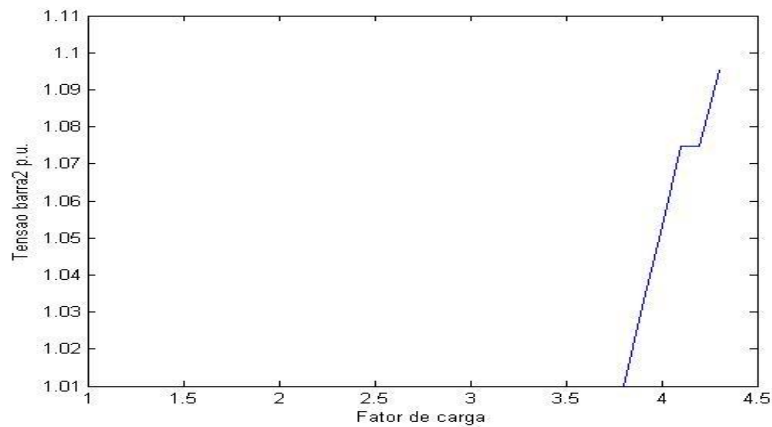


Figura 4.4 – Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo estático

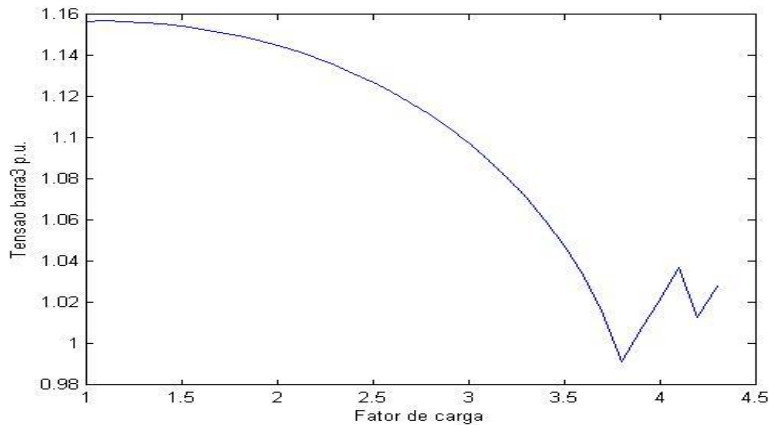


Figura 4.5 – Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo estático

A margem de carga sofreu um aumento de 0,4 p.u. (10,26%) em relação ao caso base. A tensão na Barra 2 elevou-se para 1,0953 p.u. e a queda de tensão na Barra 3 atingiu o valor de 1,0282 p.u.

4.2.3 Sistema de 14 barras sem a proposta de bloqueio

Novamente o Método da Continuação é empregado para se determinar a margem de carga do sistema ao considerar como parâmetros aumentos de carregamento e de geração de potência ativa somente nas barras 1,2 e 5.

A margem de carga apresentou o valor de $h=1,5547$ [p.u.] e o perfil de tensões é ilustrado pela Figura 4.6.

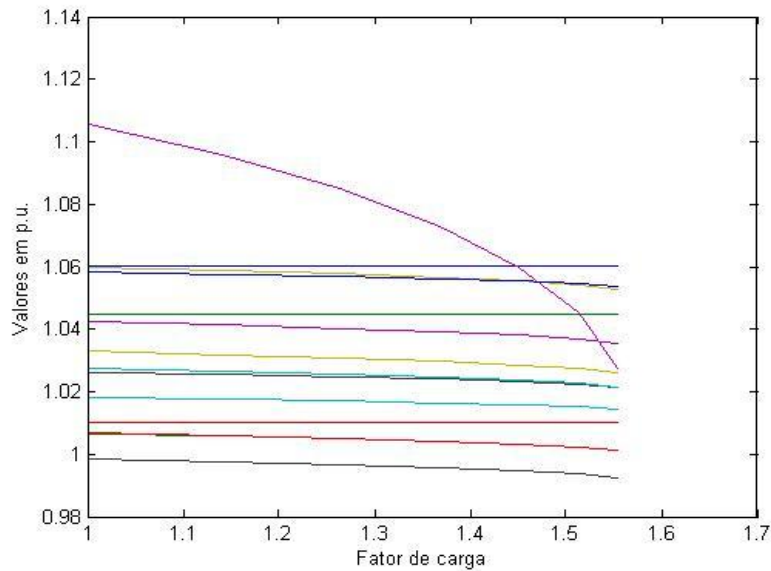


Figura 4.6 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo estático

4.2.4 Sistema de 14 barras com a proposta de bloqueio

Para o sistema de 14 barras a sensibilidade da chave “Kd” está relacionada com a equação (4.3), onde novamente o valor da tolerância, sendo bem próxima do valor nulo, é estipulada a partir da Tabela 4.5. O autor esclarece que todos os futuros valores de tolerâncias foram arbitrários da mesma maneira que o da presente seção.

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta Q_1} > 0,01 \quad (4.3)$$

Caso o barramento 1 seja do tipo PV e a condição imposta pela equação (4.3) seja violada, a barra 1 mudará para PQ. A única diferença em relação à aplicação no sistema de 3 barras fica no fato de que uma vez transformada em PQ, a barra 1 não retoma o controle do seu nível de tensão, mesmo atendendo a equação (4.3).

Os valores monitorados com o seu respectivo carregamento estão indicados na Tabela 4.5, assim como o perfil dos níveis de tensão ilustrados na Figura 4.7.

Tabela 4.5- Resultados para o sistema de 14 barras, com controle, análise estática

Fator de Carregamento (h)	$\Delta V1/\Delta Q1$
1,0	0,0969
1,1413	0,0795
1,2644	0,0631
1,3678	0,0479
1,4510	0,0340
1,5136	0,0209
1,5547	0,0072
1,5701	0,0176
1,6576	0,0139
1,7331	0,0093
1,7972	0,0031
1,8505	-0,0058
1,8933	-0,0198
1,9261	-0,0457
1,9490	-0,1155
1,9617	-117,8758

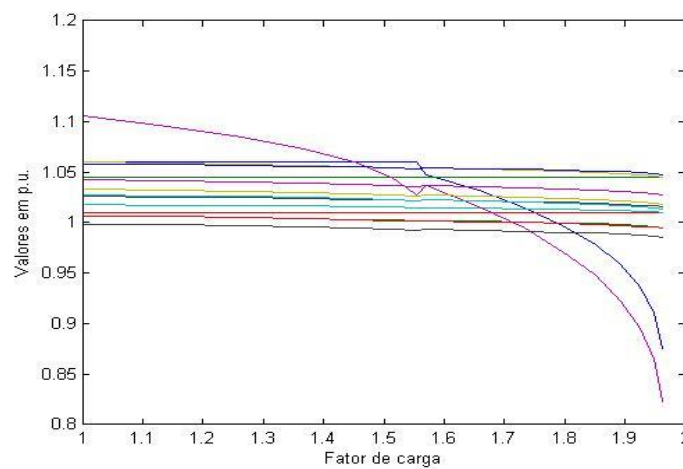


Figura 4.7 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo estático

A margem de carga obtida pela atuação do controle apresentou o valor de $h=1,9617$ [p.u.]. Contudo, as tensões das barras 1 e 5 sofreram quedas acentuadas nos níveis de tensão devido ao elevado carregamento.

4.3 Resultados da Análise Quase-Dinâmica

4.3.1 Sistema de 3 barras sem a proposta de bloqueio

Considera-se um aumento de 1% do fator de carregamento a cada 10 segundos de simulação em todas as barras do sistema. Os modelos de gerador e reguladores de tensão descritos no Capítulo 3 são empregados com as devidas linearizações em função das variáveis de estado do sistema. A margem de carga obtida é de 3,98 [p.u.] e as Figuras 4.8 a 4.14 indicam o comportamento das principais variáveis de estado do processo.

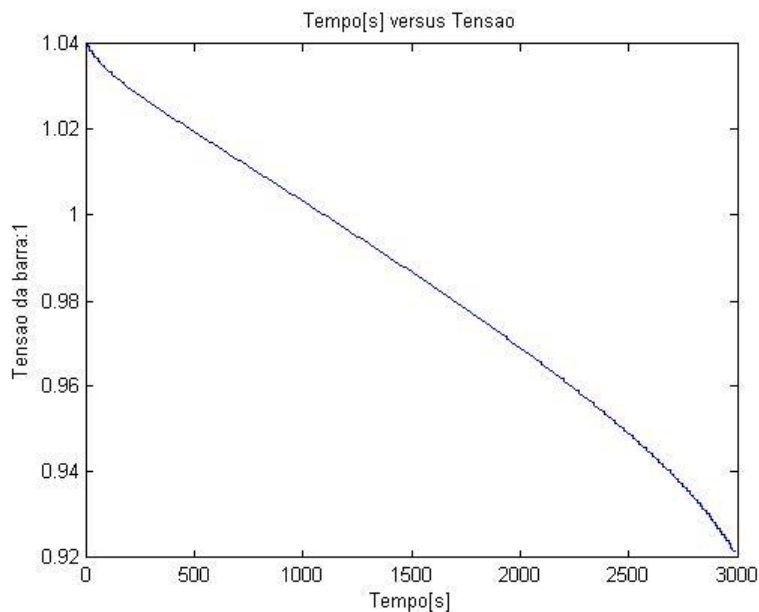


Figura 4.8 - Tensão da barra 1 para o sistema de 3 barras ,sem a proposta, modelo quase-dinâmico

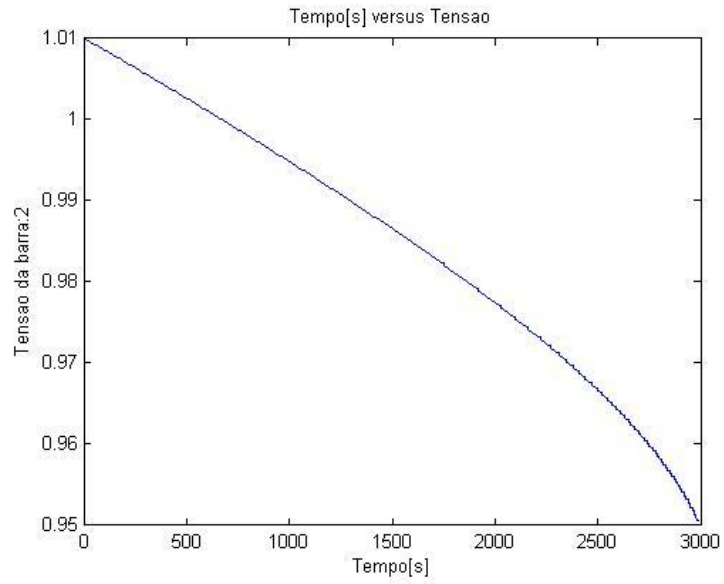


Figura 4.9 - Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

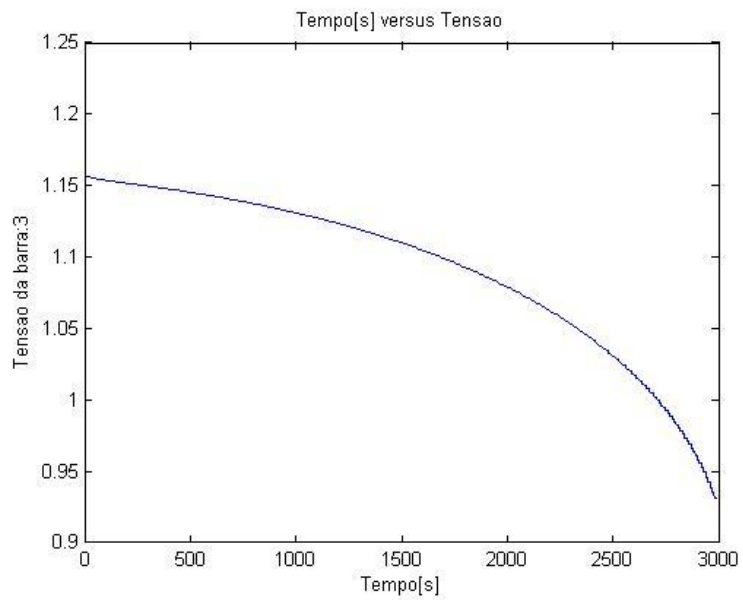


Figura 4.10 - Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras , sem a proposta, modelo quase-dinâmico

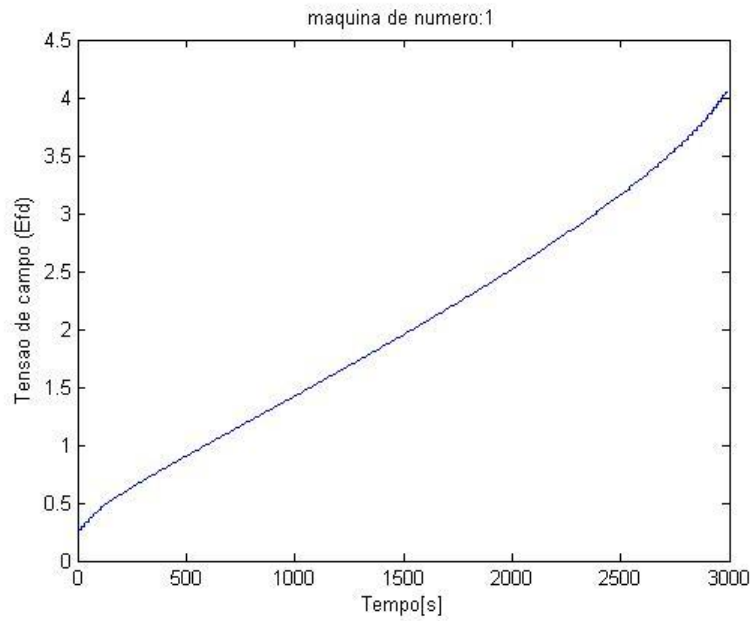


Figura 4.11 - Tensão de Campo (Efd) da barra 1 para o sistema com 3 barras ,sem a proposta, modelo quase-dinâmico

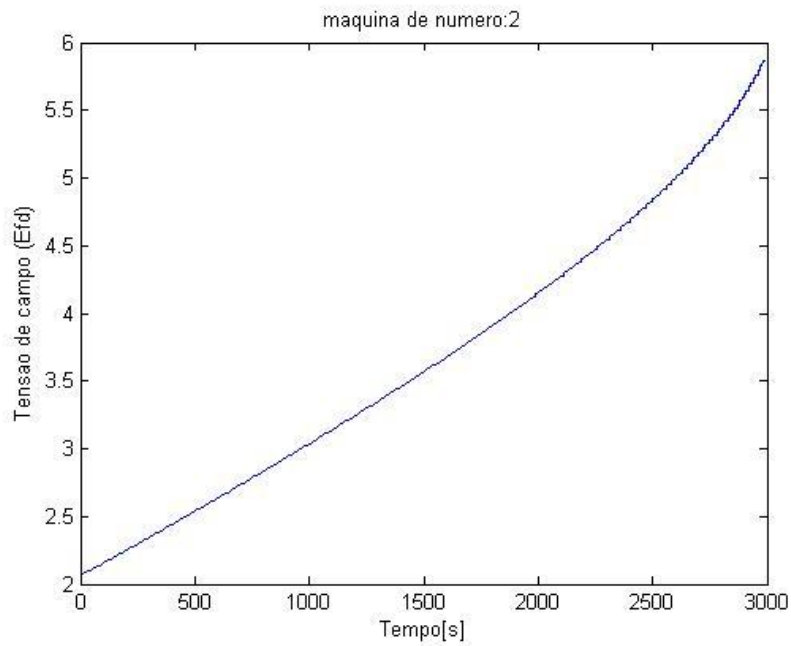


Figura 4.12 - Tensão de Campo (Efd) da barra 2 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

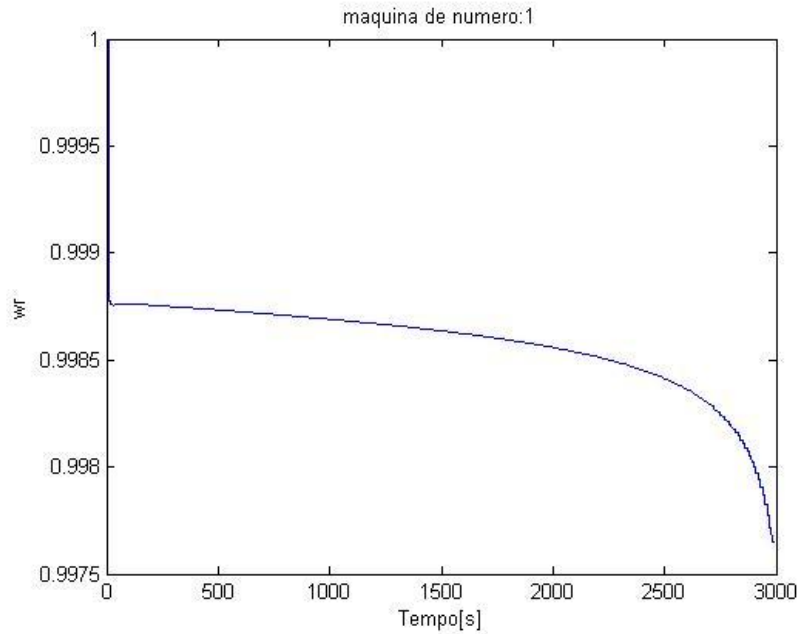


Figura 4.13- Velocidade angular síncrona (w_r) da barra 1 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

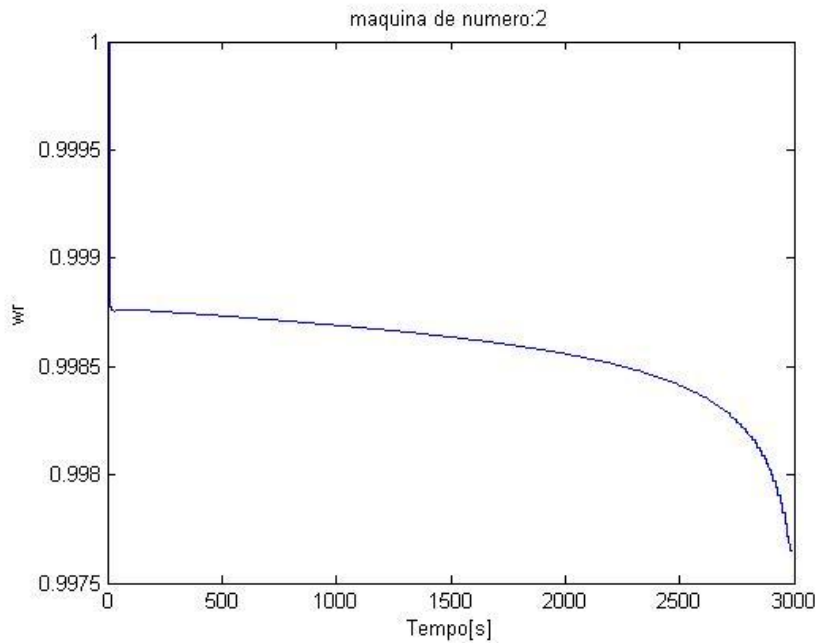


Figura 4.14 - Velocidade angular síncrona (w_r) da barra 2 para o sistema de 3 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

Como o foco de estudo é a tensão de campo da máquina geradora, não houve necessidade de modelar o regulador de velocidade. Contudo, é bom salientar que o torque mecânico

“acompanhou” os valores de torques elétricos calculados ao longo do processo iterativo, de maneira a manter sob controle os valores de velocidade angular síncrona do sistema.

4.3.2 Sistema de 3 barras com a proposta de bloqueio

A equação que rege a sensibilidade da chave “Kd”, para este caso, é dada por (4.4)

$$\frac{\Delta V_3}{\Delta Q_2} > 0,0217 \quad (4.4)$$

As mesmas considerações feitas na seção 4.2.2 valem para a simulação quase-dinâmica. Porém, por se tratar de um modelo quase-dinâmico, o travamento ocorre diretamente na variável de estado da tensão de campo da máquina 2.

Observe também que o mesmo índice de sensibilidade utilizado no processo estático é válido para o quase-dinâmico por considerar que o seu cálculo ocorre em um ponto de equilíbrio.

Conforme demonstrado pelas Figuras 4.15 a 4.21, a tensão de campo da máquina 2 foi travada quando o sistema atingiu o carregamento de $h=3,98$ [p.u.], permanecendo constante até o valor de $h=4,08$ [p.u.], quando o controle é retomado. Em seguida, para o valor de $h=4,09$ [p.u.], um novo travamento da tensão de campo é efetuado, para, enfim, continuar inalterado até o valor da margem de carga de $h=4,59$ [p.u.].

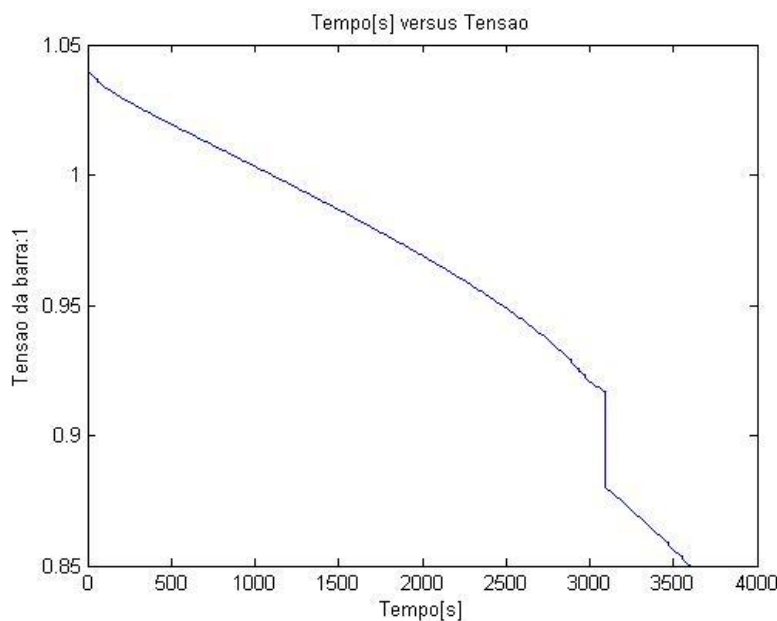


Figura 4.15 - Tensão da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico

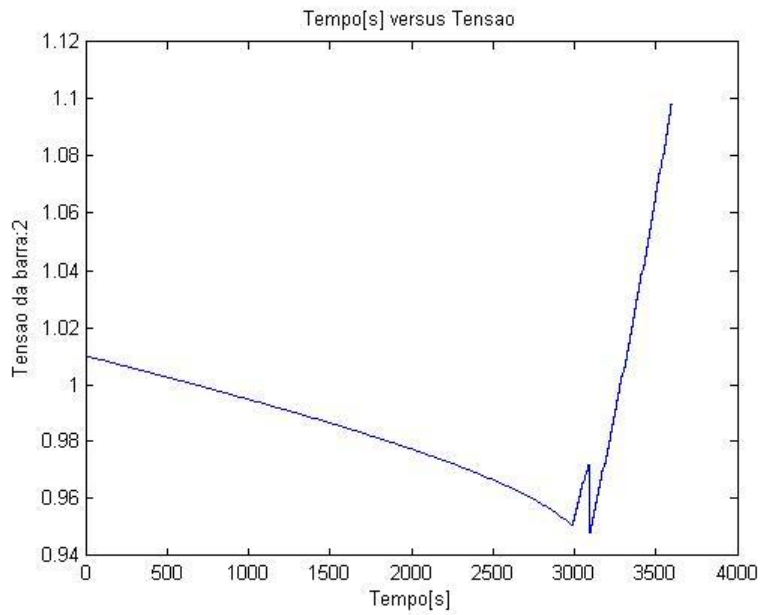


Figura 4.16 - Tensão da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico

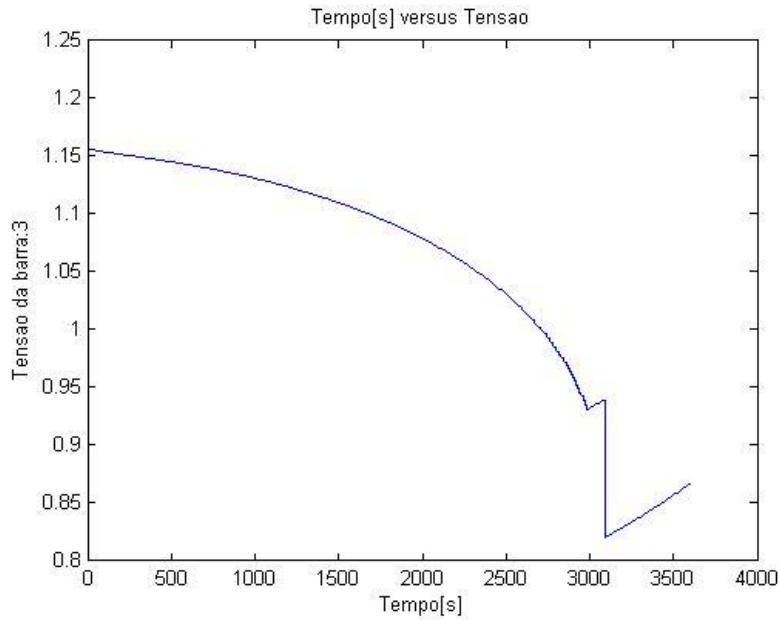


Figura 4.17 - Tensão da barra 3 para o sistema de 3 barras, com a proposta ,modelo quase-dinâmico

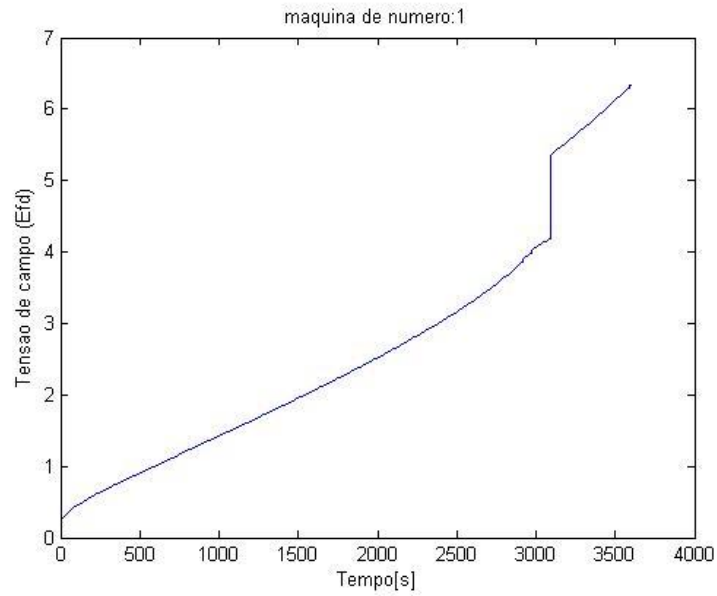


Figura 4.18 - Tensão de campo (Efd) da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

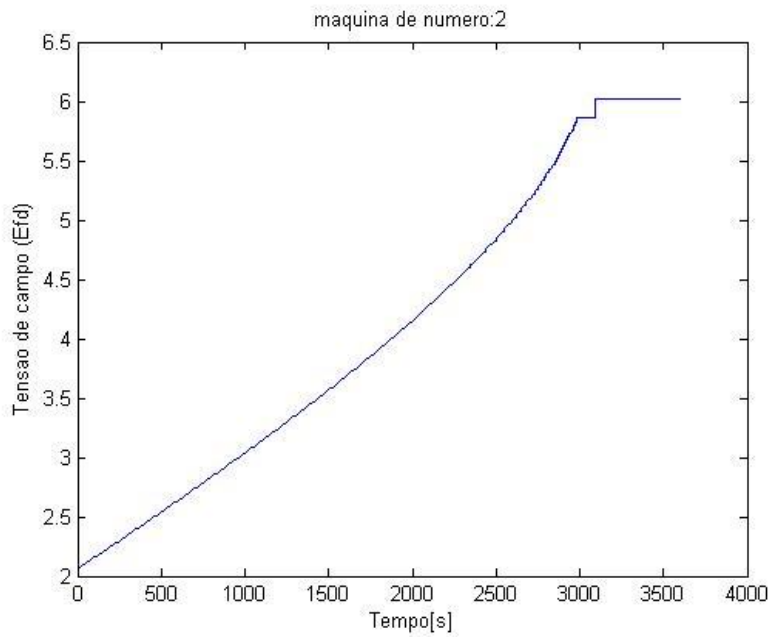


Figura 4.19 - Tensão de campo (Efd) da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

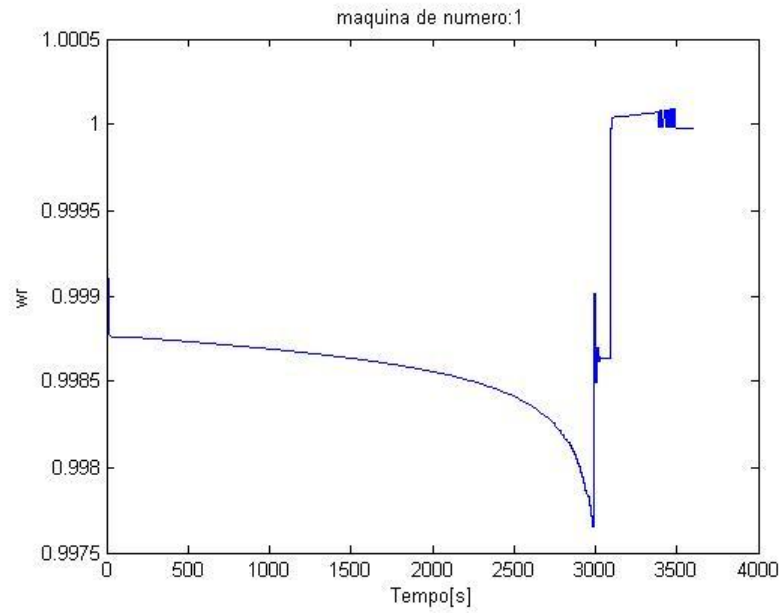


Figura 4.20 - Velocidade angular síncrona (w_r) da barra 1 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

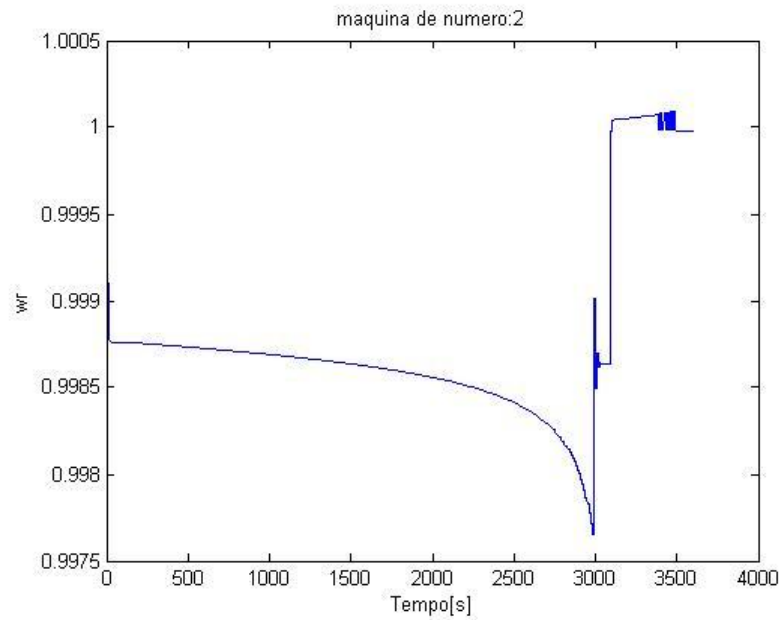


Figura 4.21 - Velocidade angular síncrona (w_r) da barra 2 para o sistema de 3 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

4.3.3 Sistema de 14 barras sem a proposta de bloqueio

Neste teste os carregamentos (h) das barras 1,2 e 5 sofrem um acréscimo de 1% a cada dez segundos de simulação. Por sua vez, os torques mecânicos das máquinas localizadas nos barramentos 1 e 2 apresentam a mesmas variações em função de h , enquanto que para a máquina 3 é mantido constante. Por fim, os torques mecânicos das barras 6 e 8 são alterados e acompanham os valores dos seus torques elétricos calculados iterativamente.

A margem de carga apresentou o valor de $h=1,63$ [p.u.], conforme ilustrado pelas Figuras de 4.22 a 4.24.

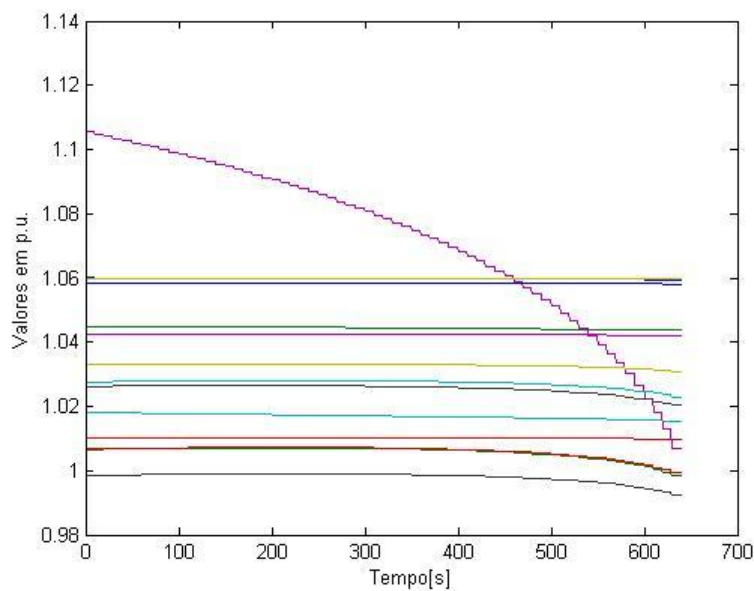


Figura 4.22 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

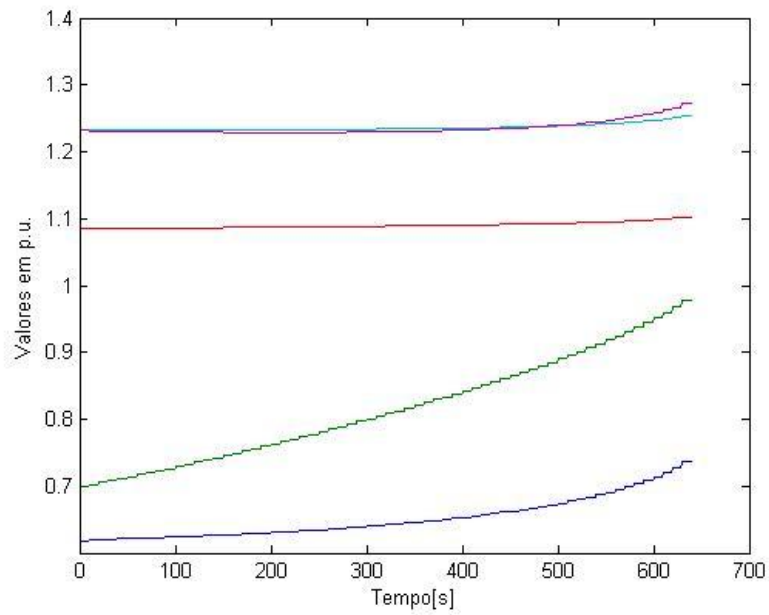


Figura 4.23 - Perfil de tensões de campo (Efd) para o sistema de 14 barras, sem a proposta, modelo quase-dinâmico

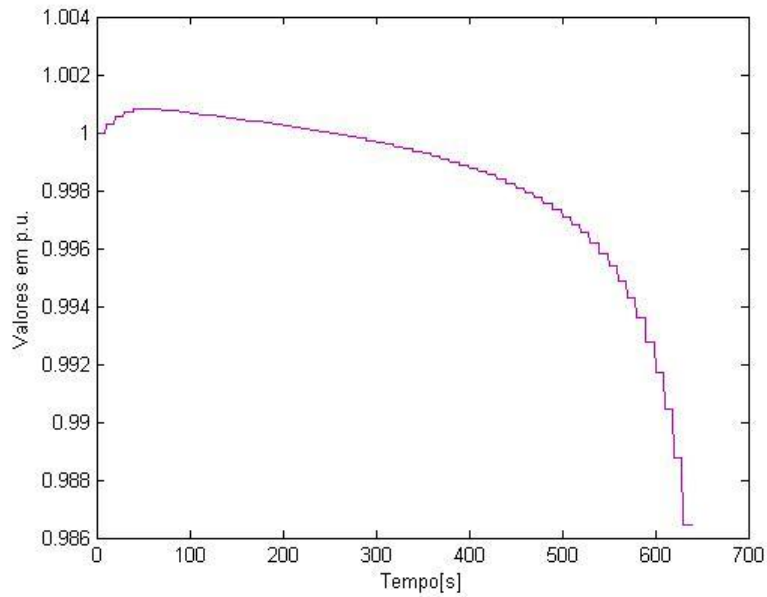


Figura 4.24 - Perfil de velocidades angulares síncronas (wr) para o sistema de 14 barras, sem proposta, modelo quase-dinâmico

4.3.4 Sistema de 14 barras com a proposta de bloqueio

A sensibilidade da chave Kd, diferentemente das outras seções, é caracterizada pela segunda opção descrita no Capítulo 4, onde o Jacobiano completo é construído baseando-se nas equações linearizadas da simulação quase-dinâmica. A equação que orienta o controle proposto é dada por:

$$\frac{\Delta E_{fd1}}{\Delta Q_1} > 0,048823 \quad (4.5)$$

Caso a equação (4.5) seja atendida, o travamento da tensão de campo da máquina 1 não é efetuado. Uma vez não obedecida, a tensão de campo se manterá constante até o final da simulação. A margem de carga obtida apresentou um aumento de 6,75% em relação a este mesmo caso sem a proposta de bloqueio. Resultando no valor de $h=1,74$ [p.u.] de acordo com as Figuras de 4.25 a 4.27.

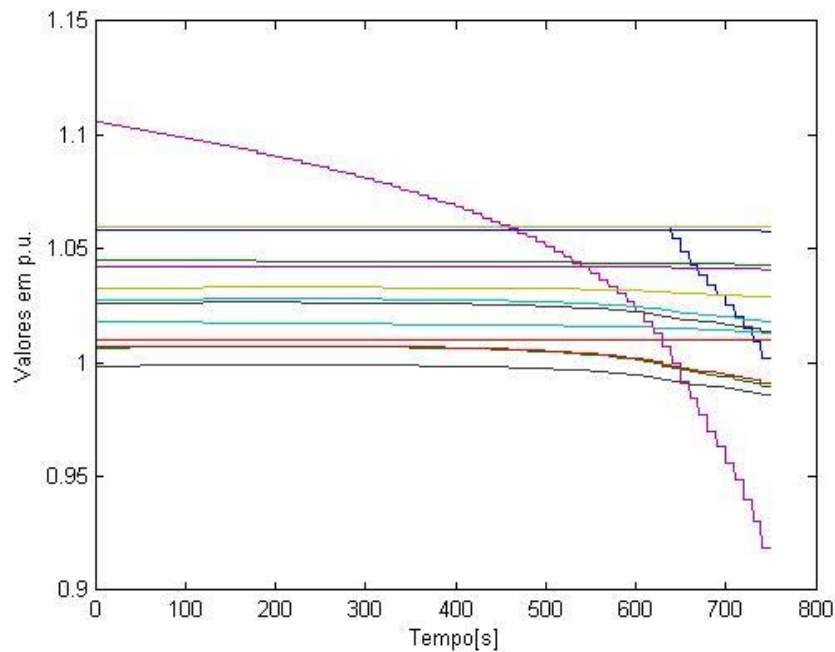


Figura 4.25 - Perfil de tensões para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

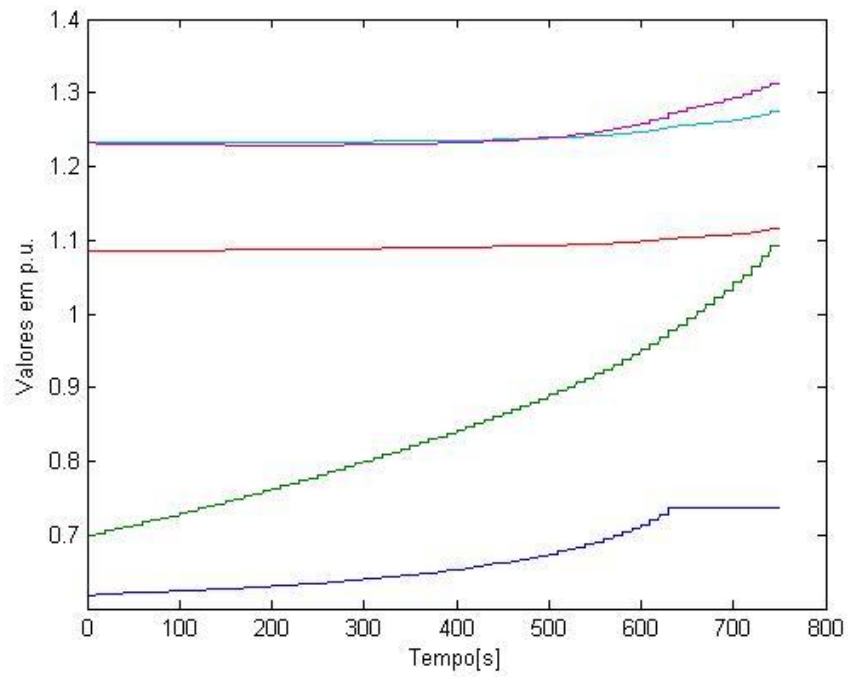


Figura 4.26 - Perfil de tensões de campo (Efd) para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

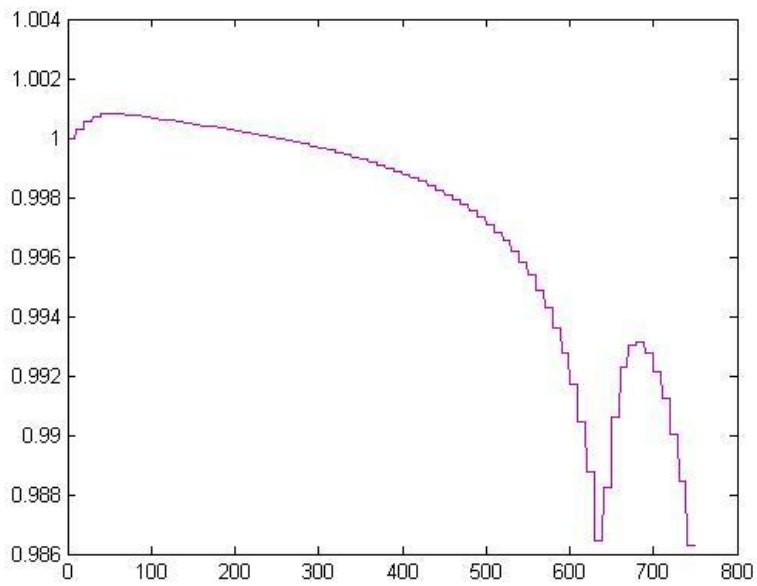


Figura 4.27 - Perfil de velocidades angulares síncronas (wr) para o sistema de 14 barras, com a proposta, modelo quase-dinâmico

4.4 Comparação Análise Estática X Análise Quase-Dinâmica

Esta seção tem por objetivo discutir os resultados obtidos pelas metodologias estática e quase dinâmica empregadas no trabalho.

A Tabela 4.6 compara os resultados obtidos pela simulação Estática e Quase-dinâmica. A malha de controle proposta atingiu os objetivos, porém, a única ressalva ocorre quando acontece a liberação do nível de tensão das máquinas. O exemplo mais evidente corresponde ao sistema de 14 barras, onde uma vez perdido o controle do nível de tensão, ele não é mais retomado, embora a margem de carga do sistema aumente. Por outro lado, os testes no sistema de 3 barras se comportaram muito bem, pois houve o chaveamento entre a perda e retomada de controle do nível de tensão, o que significa que o sistema foi capaz de deslocar de um ponto de equilíbrio ao outro, conseguindo controlar os níveis de tensão.

Os resultados de margem de carga apresentaram valores próximos nos dois modelos, reafirmando que o controle proposto é viável, porém com algumas considerações.

Tabela 4.6- Comparação Análise Estática X Análise Quase-Dinâmica

Análise	Estática		Quase-Dinâmica	
	Sem o controle proposto	Com o controle proposto	Sem o controle proposto	Com o controle proposto
Sistemas testes	Margem de carga obtida			
3 barras	3,9	4,9	3,98	4,59
14 barras	1,5547	1,9617	1,63	1,74

Capítulo 5

Considerações Finais

Os sistemas elétricos de potência apresentam uma dinâmica de funcionamento extremamente complexa devido à enorme interação entre seus componentes. Como deve ser modelado o sistema elétrico é algo vital dado que certos componentes apresentam respostas extremamente rápidas da ordem de segundos, enquanto que a constante de tempo de outros pode durar dezenas de segundos a alguns minutos. Juntamente a esta preocupação de como deve ser a caracterização dos elementos dos sistemas elétricos, a definição do horizonte de análise também é fundamental dentro do contexto de estudos de na operação, planejamento e expansão.

Um estudo de estabilidade de sistemas elétricos se preocupa com o comportamento do sistema quando da alteração de um parâmetro que modifica o ponto de equilíbrio. Em análises de estabilidade de tensão, deve-se não apenas em determinar se o perfil de tensões é adequado sob o ponto de vista operativo após a ocorrência de algum distúrbio, mas também verificar se o ponto operativo apresenta coerência entre as ações de controle tomadas e as variações observadas nos níveis de tensão. Outro aspecto refere-se às perdas elétricas, pois um baixo nível de tensão pode estar relacionado a um baixo fator de potência e, conseqüentemente, em maiores perdas elétricas no sistema. Perdas elétricas devido ao alto nível de corrente são indesejáveis porque, além de significarem uma diminuição do lucro por parte dos proprietários da rede básica, também deterioram os equipamentos envolvidos que operam em uma maior temperatura admissível.

Este parâmetro mencionado no parágrafo anterior que altera o ponto de operação do sistema pode ser uma pequena perturbação que é analisada através de equações linearizadas ou grandes distúrbios tais como curtos-circuitos que requerem uma análise dinâmica.

Como conseqüência, existe a preocupação computacional em relação ao processamento destes dados. Até onde se deve detalhar? Quanto tempo de simulação é perdido? Respostas a estas questões são discutidas com grande entusiasmo atualmente e mesmo com o desenvolvimento tecnológico extraordinário, erros de simulação ainda causam falhas, deixando o consumidor de energia elétrica sem o fornecimento desse recurso. Dessa forma, a busca de uma

margem de segurança para o ponto operativo é outra preocupação essencial, pois permite que operadores consigam tomar medidas preventivas.

Tais medidas preventivas relacionadas à instabilidade de tensão são estudadas com grande empenho ao redor do mundo. A possibilidade de contornar tais transtornos, evitando falhas, é essencial da mesma forma que a busca de uma ferramenta confiável de simulação que consiga descrever o comportamento do sistema frente à um distúrbio.

Dentro deste contexto, este trabalho apresentou como ferramentas de simulação as análises estáticas e quase-dinâmicas, onde é aplicado para ambos os métodos o processo iterativo de Newton-Raphson.

A análise estática baseia-se nas considerações do fluxo de potência, enquanto que um detalhamento maior ocorre com o quase-dinâmico, onde se considera o modelo do gerador e os controles envolvidos. Conforme demonstrado nos trabalhos publicados na literatura, ambos os métodos devem apresentar resultados próximos quando o mesmo perfil do sistema é analisado. Felizmente, tal situação também foi verificada neste trabalho. Tal comprovação elimina a hipótese da existência de erros grosseiros, ou diminui as chances dessa ocorrência, durante a concepção do programa que utilizou a plataforma de programação Matlab.

Conforme citado no capítulo 2, a escolha do método de simulação depende do sistema envolvido e o quanto é requerido em termos computacionais para a resolução do processo. Os computadores atuais apresentam performances extraordinárias, mas como atualmente a questão do monitoramento em tempo real é algo vital, o usuário deve aliar ao seu conhecimento técnico o bom senso quando escolher qual processo utilizar.

O objetivo maior do trabalho é propor uma nova ferramenta baseada na sensibilidade das variáveis de estado, aumentando a margem de carga do sistema elétrico. Testes com os sistemas de 3 e 14 barras se comportaram muito bem, alcançaram seus propósitos, e resultaram em crescimentos de margem de carga consideráveis.

Contudo, é importante ressaltar que embora os resultados tenham sido satisfatórios, a metodologia não está ainda consolidada. Futuramente, espera-se que a metodologia possa ser aplicada em sistemas maiores para, enfim, ser utilizada em casos reais.

Apêndice

A presente seção descreverá com detalhes quais são os sistemas testes utilizados. Em um primeiro momento será caracterizado um sistema de 3 barras, para que, em seguida, o mesmo possa ser feito para o de 14 barras.

A- 1. Sistema de 3 barras

O sistema utilizado é composto por 3 barras conforme a Figura A.1.

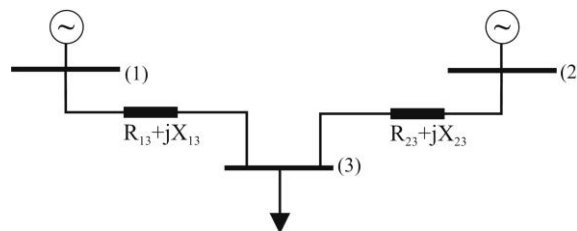


Figura A.1 - Sistema elétrico de 3 barras para testes

As linhas de transmissão são caracterizadas através dos parâmetros concentrados em seu modelo “ π ” (linha de comprimento médio). A potência base apresenta o valor de 100 MVA, onde ‘R’ representa a resistência série, ‘X’ a reatância série e ‘b’ a susceptância *shunt* da linha, conforme Tabela A.1.

Tabela A.1 - Características das linhas de transmissão para o sistema de 3 barras

Barra de origem	Barra de destino	R (p.u.)	X (p.u.)	b (p.u.)
1	3	0,05499	0,2179	0,9428
2	3	0,05499	0,2179	0,9428

Considerando a modelagem estática, a Barra 1 é classificada como sendo do tipo *swing*, apresentando como valores especificados o nível de tensão e o ângulo. Como função principal, supre as perdas do sistema, além de servir como referência angular. A Barra 2 é classificada inicialmente como sendo do tipo PV. Nesta barra os valores de tensão e potência ativa gerada são especificados, tendo como suas variáveis de estado a potência reativa gerada e o ângulo da

tensão no barramento. Por fim, a barra 3 é do tipo PQ, tendo definidos os valores nulos de geração de potências ativa e reativa. A carga presente no Barramento 3 é de caráter resistivo-capacitivo.

Os valores iniciais são dados pela Tabela A.2, para o fator de carregamento unitário ($h=1$). Note, que a barra 2 tem seu limite máximo de geração de potência reativa aberto.

Tabela A.2 - Valores iniciais para o programa fluxo de carga para o sistema de 3 barras

Tipo da Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (°)	Potência Ativa da Carga (p.u.)	Potência Reativa da Carga (p.u.)	Potência Ativa Gerada (p.u.)	Potência Reativa Gerada (p.u.)	Potência Reativa Máxima Gerada (p.u.)
<i>Swing</i>	1,04	0	0	0	0	0	0
PV	1,01	- 4,98	0	0	1,13	0	99,50
PQ	1,019	- 10,33	1,13	-0,5970	0	0	0

Para a utilização da simulação quase-dinâmica, a Tabela A.3 contém os valores das constantes dos modelos de gerador e regulador de tensão das barras 1 e 2, já referenciadas para potência base do sistema(100 MVA).

Tabela A.3- Constantes dos modelos de gerador e regulador de tensão para o sistema 3 barras

Ke	Te	Ka	Ta	Kf	Tf	H
0,5	0,79	16,0	0,02	0,03	1,0	26,0
Xd	Xq	Xd'	Xq'	Td0'	Tq0'	D
1,67	1,0	0,232	0,466	5,4	0,88	5,0

A- 2. Sistema de 14 barras

Este sistema é semelhante ao de 14 barras do IEEE, porém apresenta algumas modificações na sua rede e no despacho das máquinas geradoras. As mudanças ocorreram porque a intenção é de forçar a existência de um sistema de 3 barras semelhante ao descrito na seção anterior dentro de um sistema maior para, assim, testar a proposta de bloqueio. Em outras palavras, as alterações em relação ao sistema teste de 14 barras do IEEE foram:

a) as resistências, reatâncias série e shunt das linhas de transmissão entre as barras 1-5 e 2-5 têm seus valores alterados para os da Tabela A.1;

b) a barra 2 torna-se Swing, enquanto que a 1 é classificada como PV;

c) a carga da barra 5 é capacitiva e o módulo da sua parcela reativa é igual ao da Tabela A.2;

d) a potência ativa gerada especificada da barra 1 tem um módulo igual a soma das parcelas ativas das cargas nas barras 1 e 5;

e) a barra 1 apresenta os limites de geração de potência reativa abertos;

f) os geradores das barras 3, 6 e 8 têm como potência ativa gerada especificada a divisão entre si da soma de todas parcelas de carga ativa do sistema menos as cargas ativas das barras 1,2 e 5;

g) são aumentadas em 200 vezes os valores das reatâncias séries e resistências das linhas de transmissão entre as barras 4-5, 6-5 e 1-2.

Note que, com essas alterações, o conjunto de três barramentos, responsável pela atuação do controle, é composto pelas barras 1,2 e 5.

A Tabela A.4 indica os valores iniciais do sistema para um fator de carregamento unitário ($h=1$), enquanto que a Tabela A.5 demonstra os valores dos parâmetros que compõem a rede passiva do sistema. Em relação aos modelos de geradores e regulador de tensão, a Tabela A.6 consta os valores das constantes utilizadas para o sistema de 14 barras.

Tabela A.4 - Valores iniciais para o programa fluxo de carga para o sistema de 14 barras

Tipo da Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (°)	Potência Ativa da Carga (p.u.)	Potência Reativa da Carga (p.u.)	Potência Ativa Gerada (p.u.)	Potência Reativa Gerada (p.u.)	Potência Reativa Máxima Gerada (p.u.)	Potência Reativa Mínima Gerada (p.u.)
PV	1,06	0,0	0,0	0,0	0,076	0,0	999	-99,5
Swing	1,045	-5,0	0,217	0,127	0,217	0,0	0,5	-9999
PV	1,01	-13,0	0,942	0,19	0,76567	0,0	0,4	-9999
PQ	1,019	-10,0	0,478	-0,039	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,02	-9,0	0,076	-0,597	0,0	0,0	999	-9999
PV	1,07	-14,0	0,112	0,075	0,76567	0,0	0,24	-9999
PQ	1,062	-13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	999	-9999
PV	1,09	-13,0	0,0	0,0	0,76567	0,0	0,24	-9999
PQ	1,0563	-15,0	0,295	0,166	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,0503	-15,0	0,09	0,058	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,0571	-15,0	0,035	0,018	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,0552	-15,0	0,061	0,016	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,0504	-15,0	0,135	0,058	0,0	0,0	999	-9999
PQ	1,0358	-16,0	0,149	0,05	0,0	0,0	999	-9999

Tabela A.5 – Rede passiva para o sistema de 14 barras

Barra de origem	Barra de destino	R (p.u.)	X (p.u.)	b (p.u.)	tap(transformadores)
1	2	3,86	11,82	0,0	-
1	5	0,5499	0,2179	0,9428	-
2	3	0,0469	0,1979	0,00548	-
2	4	0,0581	0,1763	0,00467	-
2	5	0,5499	0,2179	0,9428	-
3	4	0,067	0,171	0,00433	-
4	5	2,66	8,42	0,0	-
7	4	0,0	0,2091	0,0	0,978
9	4	0,0	0,5561	0,0	0,969
6	5	0,0	50,4	0,0	0,932
6	11	0,0949	0,1989	0,0	-
6	12	0,1229	0,2558	0,0	-
6	13	0,0661	0,1302	0,0	-
7	8	0,0	0,1761	0,0	-
7	9	0,0	0,11	0,0	-
9	10	0,0318	0,0845	0,0	-
9	14	0,1271	0,2703	0,0	-
10	11	0,082	0,192	0,0	-
12	13	0,2209	0,1998	0,0	-
13	14	0,1709	0,348	0,0	-

Tabela A.6- Constantes para os modelos de gerador e regulador de tensão, sistema de 14 barras

Ke	Te	Ka	Ta	Kf	Tf	H
0,295	0,65	60,0	0,05	0,12	1,0	8,18
Xd	Xq	Xd'	Xq'	Td0'	Tq0'	D
0,524	0,354	0,1824	0,311	5,50	0,1	1,0

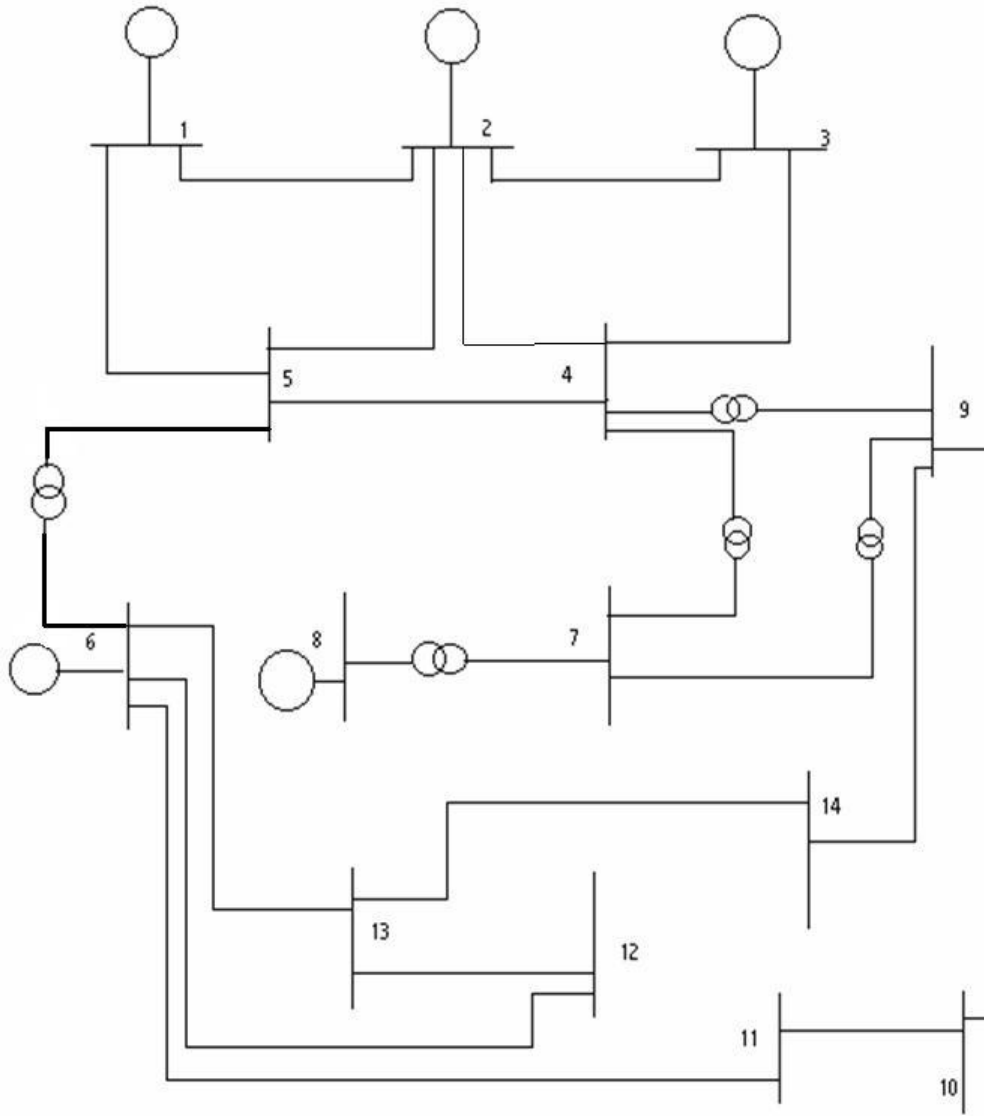


Figura A.2- Sistema de 14 barras do IEEE modificado

Referências Bibliográficas

- [1] José Almeida, Helder Teixeira, “Estabilidade de Tensão-Trabalho final de curso”, Universidade do Porto, ano de publicação não encontrado.
- [2] B.M. Weedy, B.R. Cox, “Voltage stability of Radial Power Links”, Proc IEE vol. 115 No 4 April 1968
- [3] Zambroni de Souza, A.C., “Força Tarefa Colapso de Tensão-Apostila de Curso”, outubro de 1998.
- [4] Taylor, C.W., “Power System Voltage Stability”, McGraw Hill, 1994
- [5] D.B. Bedoya, C.A. Castro, L.C. P. da Silva, “A method for computing minimum voltage stability margins of Power Systems”, IET Generation, Transmission & Distribution, 6th February 2008.
- [6] Santiago P. Torres, Washington H. Peralta, Carlos A. Castro, “Power System Loading Margin Estimation Using a Neuro-Fuzzy Approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.22, No.4, November 2007
- [7] Antônio Carlos, Luiza Maria, Hermínio J.C.P.Pinto, Amélia Y.Takahata, Barbosa Martins, S.Carijó, Albert Melo, Ricardo Diniz Rangel, Carlos Henrique C.Guimarães, “Avaliações de soluções para o fenômeno de instabilidade de tensão no sistema interligado sul/sudeste brasileiro”, 1998.
- [8] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Acompanhamento Regional do Esquema de Alívio de Carga-ERAC”, 2005.
- [9] “Transmissão de energia em alta escala”, Revista Furnas, Ano XXX, 312, Setembro de 2004
- [10] “Eletrodos de terra vigiam estabilidade do sistema de corrente contínua”, Revista Furnas, Ano XXXV, 361, Fevereiro de 2009.
- [11] MaxIdeia, Soluções de Comunicação e Imagem – **‘Apagões da rede eléctrica mostraram vulnerabilidades na rede Internet’**, <http://www.maxideia.com/novidades/novidade.php?id=975>, 27/11/2003.
- [12] U.S.-Canada Power System Outage Task Force – ‘Final Report on the August 14,2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendation’, March 31,2004.
- [13] Byung Ha Lee, Kwang Y. Lee, “Dynamic and Static Voltage Stability Enhancement of Power Systems”, IEEE Transactions on Power System, Vol.8, No 1, February de 1993

- [14] M.V. Suganyadevi, C.K. Babulal, “Estimating of Loadability Margin of a Power System by Comparing Voltage Stability Indices”, Internacional Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, June 2009.
- [15] Mauricio Dester, Carlos A. Castro, “Multi-criteria Contingency Method for Voltage Stability”, Electric Systems Research, 30 June 2008
- [16] Manfred Bedriñana, Duvier Bedoya, Carlos A. Castro, “Hybrid Method for Calculation the Maximum Loading Point using Continuation Load Flow and Non-Linear Programming Techniques”, IEEE.
- [17] L. A. Ll. Zarate, C.A. Castro, “Fast computation of security margins to voltage collapse based on sensitivity analysis”, IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol.153, No.1, January 2006.
- [18] R.B.Prada, L.J.Souza, L.A.P.Souza, “The Need for a New Constraint on Voltage Reactive Power Studies to ensure proper Voltage Control”, International Journal Of Electrical Power Energy Systems, v. 24, n. 7, p.535-540, 2002.
- [19] R.A. Schlueter, A.G. Costi, J.E. Sekerke, H.L. Forgey, “Voltage Stability And Security Assessment”, EPRI Report, EL-5967, RP-1999-8, Aug. 1988.
- [20] R. Seydel. “From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis”, Elsevier Science, North-Holland, 1988.
- [21] Doherty Andrade, “O Teorema da Função Inversa e da Função Implícita- Cálculo Diferencial e Integral: Um Kit de Sobrevivência”, Universidade Estadual de Maringá-Pr,Brasil.
- [22] Dennis, J. & Schnabel, R.B. , “Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations”, SIAM Classics In Applied Mathematics, 16, 1996.
- [23] M. Biglare, “Dynamics of Voltage Stability in a Mult Node System”, Power and Water University of Technology, Tehran, Iran
- [24] X.Hou, P.Ju, “Deterministic and Probabilistic analysis of static voltage stability in Power Systems”
- [25] Kundur, P., Morison, G.K., “A Review of Definitions and Classification Of Stability Problems In Today`s Power Systems”, IEEE Pes Meeting, New York, Feb., 1997.
- [26] Prabha Kundur, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic, Carson Taylor, Thierry Van Cutsem, Vijay Vittal, “Definiton and Classification of Power System Stability”, IEEE, Vol.2, No.2, May 2004

- [27] M.H.Haque, "Determination of Steady-State Voltage Stability Limit using PQ-curve", IEEE Medal for Engineering, Excelent Award, Nomination deadline 1 July, 2002
- [28] C. Rajagopalan, B. Leaitre, P.W. Sauer, M.A. Pai, "Dynamic Aspects of Voltage/Power Characteristics", IEEE, Vol.7, No.3, August 1992
- [29] Pedro Paulo de Carvalho Mendes, "Apostila do curso de graduação de Estabilidade de Sistemas Elétricos", Universidade Federal de Itajubá, março 2006
- [30] Zhihong Feng, Venkataramana Ajarapu, Bo Long, "Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing", IEEE, Vol.15, No.1, February 2000
- [31] P.W.Sauer, M.A.Pai, "Power System Steady-State Stability and load-flow Jacobian", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No 4, November 1990.
- [32] Valério O. Alburquerque, R. Coradi Leme, B. Isaias Lima Lopes, A.C. Zambroni de Souza, Otávio A.S.Carpinteiro, Rodnei Dias dos Anjos, Pedro P. Balestrasi, "A Quase-Dynamic Model Applied to a Ramp Increase Study", 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June-July, Bucharest, Romania
- [33] A.C. Zambroni de Souza, C.A. Cañizares, V.H. Quintana, 'Critical bus and point of collapse determination using tangent vectors', 28th North American Power Symp., Cambridge, MA, November 10-12, 1996, pp.329-333.
- [34] B. Isaiás Lima Lopes, A.C. Zambroni de Souza, "On multiple tap blocking to avoid voltage collapse", Electric System Research 67 (2003) 225-231.