



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

ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DA CURVA QV EM SIMULAÇÕES DINÂMICAS EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

RENAN SOUZA MOURA

Itajubá, julho de 2016





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

RENAN SOUZA MOURA

ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DA CURVA QV EM SIMULAÇÕES DINÂMICAS EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração:**

Sistemas Elétricos de Potência

**Orientador:**

Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza

**Co-Orientador:**

Prof. Benedito Isaías de Lima Lopes

Julho de 2016  
ITAJUBÁ-MG

ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DA CURVA QV EM SIMULAÇÕES DINÂMICAS EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

RENAN SOUZA MOURA

Proposta de tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá e avaliada pela seguinte banca examinadora.

BANCA EXAMINADORA

---

Professor Carlos Alberto de Castro Júnior  
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP

---

Professor João Alberto Passos Filho  
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

---

Professor João Guilherme de Carvalho Costa  
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

---

Professor Benedito Donizeti Bonatto  
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

---

Professor Benedito Isaías Lopes de Lima  
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

---

Professor Antonio Carlos Zambroni de Souza  
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

Dedico este trabalho em especial aos meus familiares que sempre me deram força para conquistar mais essa vitória em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou em todos os momentos da minha vida, me dando a força necessária para vencer as barreiras do dia a dia.

Aos meus pais Josmar Negrinho Moura e Angela Maria de Souza Moura, pelo apoio e suporte, pois através deles pude obter conhecimento e motivação para sempre alcançar os meus objetivos.

À minha esposa, Fabienne da Silva Rennó Moura, pelo carinho e amor dedicados.

Aos orientadores, Antonio Carlos Zambroni de Souza e Benedito Isaías de Lima Lopes, pela motivação de sempre continuar nos momentos de desânimo, onde nada dá certo, mas “o importante é ser feliz” e “vai dar certo”.

Aos funcionários do Instituto Federal de Minas Gerais-Campus Formiga por me aceitarem como professor de ensino básico e superior e também por sempre me motivarem e darem total apoio à conclusão do curso de Doutorado.

E a todos que encontrei pelo caminho que contribuíram de maneira direta ou indireta para que este trabalho fosse finalizado.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

Este trabalho aborda algumas questões relacionadas com suporte de potência reativa em sistemas elétricos de potência. O trabalho considera a curva QV como uma ferramenta para indicar a robustez dos geradores em termos da sua margem de potência reativa.

A curva QV produz informação que é então considerada nos estudos de contingência. Em seguida, o comportamento dinâmico de um sistema no que diz respeito à margem de potência reativa é investigado. A margem positiva, como mostrado nos estudos, pode levar um sistema à instabilidade.

Para mover o sistema para uma região segura, uma metodologia baseada em lógica *fuzzy* é proposta e os efeitos dinâmicos são analisados. Para simular essa metodologia, o estudo emprega um sistema simples com 5 barramentos e um sistema real brasileiro.

Palavras chaves: Estabilidade de Tensão, Curva QV, Simulação Dinâmica.

## ABSTRACT

This work addresses some issues related to reactive power support in Electric Power Systems. The work considers the QV curve as a tool for indicating the robustness of generators in terms of their reactive power margin.

The QV curve yields information that is considered for contingency studies. Then, the dynamic behaviour of a system with respect to the reactive power margin is investigated. A positive margin, as shown in the studies, may drive a system to instability.

To move the system to a secure region, *fuzzy* logic based methodology is proposed and the dynamic effects are analyzed. To simulate the proposed methodology, the study employs a sample 5-bus system and a realistic Brazilian system.

Index Terms: Voltage Stability, QV Curve, Dynamic Simulation

---

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
SUMÁRIO.....	9
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE SÍMBOLOS .....	15
CAPÍTULO 1: Introdução .....	16
1.1 Revisão bibliográfica .....	17
1.1.1 Adição de dispositivos .....	17
1.1.3 Estabilidade de Tensão .....	21
1.1.4 Lógica fuzzy .....	24
1.2 Motivação, objetivos e organização do trabalho .....	26
CAPÍTULO 2: Conceitos básicos.....	28
2.1 Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos de Potência.....	28
2.1.1 Limitações do injeções de potência .....	29
2.1.2 Tipos de variáveis em uma análise de fluxo de potência.....	30
2.2 Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência .....	30
2.2.1 Curva PV .....	34
2.2.2 Curva QV .....	34
2.2.3 Relação entre as curvas PV e QV .....	36
2.3 Modelagem dinâmica de geradores e seus reguladores .....	37
2.4 Hipóteses e considerações finais do capítulo 2.....	38
CAPÍTULO 3: Testes de compensação de potência reativa.....	40
4.1 Sistema com 5 barramentos .....	43

---

4.2 Sistema com 9 barramentos .....	44
4.3 Sistema com 14 barramentos .....	47
4.4 Sistema com 30 barramentos .....	48
4.5 Sistema sul sudeste com 65 barramentos.....	49
CAPÍTULO 4: Proposta de mudança da margem da curva QV utilizando lógica <i>fuzzy</i> .....	52
4.1 Conceitos básicos sobre lógica <i>fuzzy</i> .....	52
4.2 Metodologia para aumentar a margem de potência reativa. ....	53
4.2.1 Testes preliminares .....	53
4.2.2 Redespacho de potência reativa por lógica <i>fuzzy</i> .....	55
CAPÍTULO 5: Resultados da proposta de mudança da margem da curva QV utilizando lógica <i>fuzzy</i> .....	59
5.1 Sistema com 5 barramentos .....	59
6.2 Sistema com 9 barramentos .....	61
6.3 Sistema real brasileiro.....	63
CAPÍTULO 6: Considerações finais .....	66
ANEXO A-Descrição dos modelos de geradores e reguladores utilizados.....	69
A.1 Modelo dinâmico de gerador .....	69
A.2 Modelo dinâmico de regulador de tensão .....	71
A.3 Modelo dinâmico de regulador de velocidade.....	72
ANEXO B-Dados dos sistemas testes .....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Curva PV .....	34
Figura 2.2 Representação de uma curva QV genérica.....	35
Figura 2.3 Curva QV com margem positiva de potência reativa .....	36
Figura 2.4 Curva QV com margem negativa de potência reativa.....	36
Figura 2.5 Modelo de gerador utilizado .....	37
Figura 2.6 Modelo de regulador de tensão utilizado .....	38
Figura 2.7 Modelo de regulador de velocidade utilizado .....	38
Figura 4.1 Blocos principais que compõem a lógica <i>fuzzy</i> .....	53
Figura 4.2 Entrada da lógica <i>fuzzy</i> como margem da curva QV .....	56
Figura 4.3 Entrada da lógica <i>fuzzy</i> como vetor tangente .....	56
Figura 4.4 Saída da lógica <i>fuzzy</i> como redespacho de potência reativa .....	57
Figura 5-1 Nível de tensão no sistema com 5 barramentos depois da primeira aplicação da metodologia considerando a contingência entre as barras 1 e 3.....	60
Figura 5.2 Nível de tensão no sistema com 5 barramentos depois da segunda aplicação da metodologia considerando a contingência entre as barras 1 e 3.....	61
Figura 5.3 Potência reativa gerada das máquinas selecionadas para ambos os tipos de margem na curva QV considerando a contingência 33-47 circuito 1.....	64
Figura 5.4 Tensões terminais das máquinas selecionadas para ambos os tipos de margens considerando a contingência 33-47 circuito 1.....	64
Figura A.1 Diagrama para a equação de oscilação eletromecânica.....	70
Figura A.2 Diagrama para as equações de eixo em quadratura.....	70
Figura A.3 Diagrama para as equações de eixo direto .....	71
Figura A.4 Modelo predefinido de regulador de tensão .....	72
Figura A.5 Modelo predefinido de regulador de velocidade.....	72

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Analogia matemática-física .....	29
Tabela 3.1 Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barramentos .....	41
Tabela 3.2 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 9 barramentos .....	41
Tabela 3.3 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 14 barramentos .....	41
Tabela 3.4 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 30 barramentos .....	42
Tabela 3.5 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema sul sudeste com 65 barramentos .....	42
Tabela 3.6 Margens da curva PV para diferentes sistemas elétricos de potência..	42
Tabela 3.7 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem positiva de potência reativa para o sistema com 5 barramentos.....	43
Tabela 3.8 Comportamento dinâmico no sistema com 5 barramentos considerando ações corretivas.....	44
Tabela 3.9 Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barramentos com ações corretivas.....	44
Tabela 3.10 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 9 barramentos. ....	45
Tabela 3.11 Comportamento dinâmico no sistema com 9 barramentos considerando ações corretivas .....	46
Tabela 3.12 Relação da curva QV com fator de carga igual 1,4, sistema com 9 barramentos com ações corretivas .....	46
Tabela 3.13 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 14 barramentos. ....	47
Tabela 3.14 Comportamento dinâmico no sistema com 14 barramentos considerando ações corretivas. ....	48
Tabela 3.15 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 30 barramentos. ....	48

---

Tabela 3.16 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa para o sistema sul sudeste. ....	49
Tabela 3.17 Comportamento dinâmico no sistema sul sudeste considerando as ações corretivas.....	50
Tabela 3.18 Relação da curva QV com fator de carga igual 1,1, sistema com Sul-Sudeste com ações corretivas .....	51
Tabela 4.1 Regras <i>fuzzy</i> .....	56
Tabela 4.2 Vetores tangentes para diversos sistemas quando é encontrada a margem negativa de potência reativa .....	57
Tabela 5.1 Margem da curva QV, sistema com 5 barramentos, primeira aplicação da metodologia .....	59
Tabela 5.2 Resposta dinâmica, sistema com 5 barramentos, primeira aplicação da metodologia .....	59
Tabela 5.3 Margem da curva QV, sistema com 5 barramentos, segunda aplicação da metodologia .....	61
Tabela 5.4 Resposta dinâmica, sistema com 5 barramentos, segunda aplicação da metodologia .....	61
Tabela 5.5 Margem da curva QV, sistema com 9 barramentos, primeira aplicação da metodologia .....	62
Tabela 5.6 Margem da curva QV, sistema com 9 barramentos, segunda aplicação da metodologia .....	62
Tabela 5.7 Margem da curva QV, sistema real brasileiro após a aplicação da metodologia .....	63
Tabela 5.8 Níveis de tensão, sistema real brasileiro após a aplicação da metodologia .....	63
Tabela 5.9 Resposta dinâmica após aplicação da metodologia, sistema real brasileiro .....	63
Tabela B.1 Dados de barramentos, sistema com 5 barramentos, fator de carga unitário.....	73
Tabela B.2 Dados de linhas de transmissão, sistema com 5 barramentos, fator de carga unitário. ....	73
Tabela B.3 Dados de barramentos, sistema com 9 barramentos, fator de carga unitário.....	74

---

Tabela B.4 Dados de linhas de transmissão, sistema com 9 barramentos, fator de carga unitário. ....	74
Tabela B.5 Dados de barramentos, sistema com 14 barramentos, fator de carga unitário. ....	75
Tabela B.6 Dados de linhas de transmissão, sistema com 14 barramentos, fator de carga unitário. ....	76
Tabela B.7 Dados de barramentos, sistema com 30 barramentos, fator de carga unitário. ....	77
Tabela B.8 Dados de linhas de transmissão, sistema com 30 barramentos, fator de carga unitário. ....	78

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SVC	<i>Static VAR compensator</i>
STATCOM	<i>Static synchronous compensator</i>
SEP	Sistemas elétricos de potência
AC	Corrente alternada
PI	Proporcional integral
DSTATCOM	Compensação estática de distribuição
SRR	<i>Slow reset regulator</i>
FACTS	<i>Flexible Alternate Current Transmission Systems</i>
ISVM	<i>Indirect Space Vector Modulation</i>
3VS	<i>Three-Vector-Scheme</i>
OLTC	<i>On-load tap changer</i>
TCSC	Compensadores série de tiristores controlados
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
GD	Geração distribuída
PSS	Estabilizador de sistema de potência
PID	Proporcional-integrador-diferencial
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
Barra PQ	Barramento de carga
Barra PV	Barramento de tensão e potência ativa gerada especificados
Barra <i>Swing</i>	Barramento de referência angular
DC	<i>Direct Current</i>
LT	Linha de transmissão

---

## CAPÍTULO 1: Introdução

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1] fiscaliza e regulamenta as ações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

De uma maneira geral, pode-se estabelecer que os objetivos básicos do SIN são:

- Gerar energia elétrica em quantidade suficiente e nos locais apropriados;
- Transmitir esta energia em grandes quantidades aos centros de carga atendendo a critérios de qualidade;
- Operar com o menor custo possível.

Devido ao fato que durante a sua operação deve existir um balanceamento instantâneo entre a geração e a carga, estudos e ações empreendidos pelo ONS na operação coordenada centralizada do SIN e na administração dos serviços de transmissão na Rede Básica (parte do sistema de transmissão que opera com tensões nominais iguais ou maiores que 230kV) podem ser agrupados em diferentes macroprocessos [2]:

- Ampliações e reforços na rede básica;
- Avaliação das condições futuras da operação;
- Avaliação de curto prazo da operação;
- Resultados da operação;
- Análise da carga de energia e demanda;
- Indicadores de desempenho do SIN;
- Histórico da operação;
- Integração de novas instalações ao SIN;
- Administração dos serviços de transmissão.

O Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica é realizado anualmente para um horizonte de três anos e estabelece as necessidades de expansão da Rede Básica para preservar a sua adequada operação com garantia de livre acesso. Por outro lado, com o estudo da Avaliação das Condições Futuras da Operação é possível estimar a oferta futura de energia e realizar o diagnóstico do desempenho do SIN em função dos recursos disponíveis de

---

geração e transmissão, previsão de carga e o cronograma para a entrada em operação de novos equipamentos.

Estes dois primeiros macroprocessos em conjunto com o terceiro, Avaliação de Curto Prazo da Operação, que analisa ações de controle voltadas à manutenção da segurança operacional elétrica, serão o foco deste trabalho dentro da área de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência.

De maneira mais específica, neste documento analisa-se a questão do suporte de potência reativa dos sistemas analisados. E tal preocupação está ligada com a eficiência, pois um melhor suporte de potência reativa está relacionado com um melhor nível de tensão e conseqüentemente exigirá uma menor corrente elétrica para atender a potência elétrica da carga. Menor corrente elétrica também significa menores perdas elétricas durante a transmissão de energia e um elevado fator de potência do sistema analisado.

A fim de justificar a proposta deste trabalho, a próxima seção é responsável por uma breve revisão bibliográfica dos temas abordados por este documento.

### **1.1 Revisão bibliográfica**

A revisão bibliográfica se baseia em busca de trabalhos disponíveis na literatura envolvendo temas relacionados ao suporte de potência reativa. Dispositivos que realizam este tipo de compensação, métodos de otimização para este fim, assim como questões relacionadas à eficiência computacional foram pesquisadas e estão separadas nas próximas subseções.

Adicionalmente, será dada ênfase à lógica *fuzzy* durante a revisão bibliográfica, pois esta foi usada como ferramenta do trabalho de tese.

#### *1.1.1 Adição de dispositivos*

SVC (*static VAR compensator*) e STATCOM (*static synchronous compensator*) têm sido utilizados como equipamentos de compensação de potência reativa nos últimos anos. A principal característica deles é que eles podem ser ajustados suavemente levando em consideração o perfil dinâmico inclusive. O STATCOM é utilizado principalmente em sistemas elétricos de potência (SEP) que utilizam corrente alternada (AC) e em indústrias metalúrgicas quando se deseja corrigir o fator de potência.

Em [3] é realizado um estudo de um modelo de STATCOM com a intenção de melhorar a operação da rede AC durante afundamentos de tensão desbalanceados. Por sua vez, Yao Xu e Fangxing [4] publicaram um trabalho onde o ganho proporcional integral (PI)

---

de um STATCOM é ajustável em função da mudança do ponto de operação do sistema.

Em [5] é feito um estudo sobre a utilização do STATCOM em conjunto com um sistema de produção de energia eólica. É mostrado que, quando inserido em um sistema de distribuição fraco sob condição de falta, o STATCOM previne grandes variações no nível de tensão dos barramentos do sistema por realizar uma compensação de reativos e, após a ocorrência e a eliminação desta contingência, ainda auxilia na recuperação do nível de tensão. O trabalho [6] utiliza um algoritmo de uma rede neural em uma compensação estática de distribuição (DSTATCOM) para mitigar problemas de qualidade de energia com a compensação de potência reativa, eliminação de harmônicos, balanceamento de cargas lineares e não lineares.

Muitos trabalhos têm analisado a ação de um STATCOM com diversos outros equipamentos. Por exemplo, em [7] é feita uma análise do seu comportamento em conjunto com um relé de perda de excitação de um gerador, enquanto que em [8] o seu desempenho é avaliado em conjunto com um gerador de indução autoexcitado. Um modelo de STATCOM chamado de *Hybrid Power Flow Controller* é proposto em [9] para atuar em conjunto com outros equipamentos e [10] analisa o efeito de um STATCOM inserido em um programa de um fluxo de potência ótimo.

Em [11] é proposta a utilização de geradores de indução distribuídos no sistema para mitigar faltas assimétricas no lugar de uma compensação centralizada de STATCOM. Verificou-se que cada gerador de indução injeta menos corrente que contribui para a corrente de curto-circuito do que a estação centralizada de STATCOM. Estes geradores de indução apresentam controle de sequência positiva e negativa de tensão.

Uma estratégia de controle chamada de SRR (*slow reset regulator*) para STATCOM é apresentada em [12]. A metodologia regula a potência reativa de acordo com o ponto de referência de tensão adotado, mantendo a estabilidade do sistema, além de minimizar as perdas associadas e maximizar a reserva de potência reativa em contingências.

Dentro da família de FACTS (*Flexible Alternate Current Transmission Systems*), da qual o STATCOM faz parte, encontram-se outras possibilidades para fornecimento de potência reativa para o sistema como, por exemplo, o SVC.

A característica de resposta dinâmica de um STATCOM é melhor que um SVC [13], pois com relação à mudança de impedância do sistema, é melhor adaptável e robusto. Em contrapartida, o custo é maior e por causa da limitação de potência da tecnologia de semicondutores, a capacidade do STATCOM é relativamente baixa e a faixa de ajuste da

---

potência reativa de saída é pequena. Embora apresente esta desvantagem em relação ao STATCOM, em [14] utilizou-se o SVC com dois tipos de controle, linear e não linear, para ajudar um sistema a se manter estável frente a um grande distúrbio como curtos-circuitos. Um projeto de SVC-MERS é proposto em [15], baseado no princípio de funcionamento de um SVC, com uma compensação de potência reativa utilizando chaveamento restaurador de energia magnética (MERS).

Sendo mais um projeto de FACTS com características predominantes de um SVC, a compensação de potência reativa em [16] é investigada quantitativamente por meio de uma matriz de conversão modulada por ISVM (*Indirect Space Vector Modulation*). Os resultados demonstraram que o algoritmo proposto por ISVM é útil quando também existe transferência de potência ativa e com energia armazenada, como um carregamento no eixo do motor. Para a pura compensação de potência reativa, os autores de [16] sugerem 3VS (*Three-Vector-Scheme*).

Ainda dentro do contexto da sua utilização em conjunto com outros equipamentos, as simulações de [17] demonstram que o SVC atua de maneira satisfatória em conjunto com OLTC (*on-load tap changer*) quando inserido em um sistema de distribuição com a geração de energia solar. Com várias estratégias de controle testadas, em [17] foi possível confirmar um melhor perfil de tensão do sistema e com alto desempenho computacional.

Os autores de [18] propõem um controle de SVC com filtros LC em geração distribuída baseado na teoria de potência instantânea, onde é relacionado a geração local e a geração externa para correção do nível de tensão do sistema elétrico com cargas lineares e não lineares.

Valores de sensibilidade entre a potência de um SVC e a margem de estabilidade de tensão são estudados em [19]. Estes valores permitiram corrigir qualquer violação da magnitude de tensão enquanto mantinha o sistema estável. Testes foram efetuados em sistemas com 6 e 118 barramentos com e sem este compensador de potência reativa. Como trabalho futuro, os autores de [19] pretendem agregar aspectos econômicos à metodologia proposta.

Técnicas que utilizam métodos de otimização para calcular a potência do equipamento compensador de potência reativa são muito utilizadas. Os autores de [20] utilizaram um Algoritmo Genético para calcular o tamanho e a localização ótima de um SVC em um sistema com 30 barramentos. Os resultados foram avaliados frente a contingências

---

severas de saídas de linhas de transmissão. Em situações sem o SVC, algumas barras violaram o limite máximo do nível de tensão, e com este equipamento, a situação foi normalizada.

Em [21] uma comparação entre o Algoritmo Genético e a Otimização do Enxame de Partículas em um fluxo de potência ótimo é realizada com SVC e compensadores série de tiristores controlados (TCSC). A função objetivo de custo de [21] não se mostrou atrativa em estudos de redução de perdas e melhoramento da distância entre o ponto operativo e máximo carregamento suportado pelo sistema.

Um estudo de compensação de potência reativa por meio de um algoritmo evolucionário multi objetivo de Pareto no sistema de potência paraguaio é apresentado em [22]. Os resultados indicaram que o desempenho do sistema não apresenta alta sensibilidade na compensação distribuída proposta, mas uma alta dependência em relação ao total de compensação requerida. Também em [22] é proposta, como trabalho futuro, a inclusão de uma função objetivo de custo de transmissão em conjunto com as que foram utilizadas no artigo.

El-Fergany e Zagazig abordaram a questão da determinação do montante de potência reativa e local para instalação capacitores shunts em sistemas de distribuição utilizando o algoritmo otimizado de busca cuckoo [23]. Tal algoritmo é baseado em sistemas de população assim como o algoritmo genético e o exame de partículas. Em [23] o método proposto permitiu que dois sistemas, com 69 e 118 barramentos, funcionassem com melhor fator de potência após a instalação dos capacitores shunts.

Di Pan e Feng Liang propuseram em [24] um sistema de compensação série de motores com ímãs permanentes a fim de estender a região de operação do sistema analisado. O modelo [24] fornece a compensação reativa necessária por meio da impedância equivalente de Thévenin vista de um de seus inversores, podendo, por meio do sistema de controle, fornecer ou absorver potência reativa conforme a necessidade. Em [25], por sua vez, um controle de tensão monofásico para geradores de indução é apresentado com a instalação de capacitores em série com a carga. Este controle [25] consegue resolver o problema da baixa regulação de tensão apresentada por este tipo de gerador.

Assim como os motores, existem outros equipamentos que necessitam de uma demanda muito grande de potência reativa para a sua correta operação. Em [26] é proposto um inversor trifásico em uma subestação de trem que substitui capacitores shunt tradicionais por meio de filtros ativos com lógica de controle proporcional integrador (PI). O trabalho [27], por sua vez, relata problemas de compensação de potência reativa considerando sistemas

---

com HVDC (*High Voltage Direct Current*).

Conceitos envolvendo a questão de compensação de potência reativa em um SEP devem ser sustentados pela área de estudo de Estabilidade de Tensão.

### *1.1.3 Estabilidade de Tensão*

Estabilidade de tensão será mais bem definida no Capítulo 2. A instabilidade de tensão, por sua vez, pode resultar em um fenômeno chamado de colapso de tensão. É um fenômeno essencialmente não linear que pode ser associado matematicamente com o ponto de bifurcação sela-nó por meio de equações algébricas [28]. Se um modelo algébrico-diferencial for empregado, além da bifurcação sela-nó, também a bifurcação de Hopf pode ser identificada. Neste caso, o sistema não perde o ponto de equilíbrio, mas fica sujeito a oscilações que, dependendo de sua natureza, podem levar o sistema à instabilidade. Por empregar um modelo algébrico, o foco de [28] é a bifurcação sela-nó.

Definindo margem de carga como a distância entre o ponto de operação atual e o ponto de colapso de tensão, a busca por esta margem de segurança tem sido interesse de muitos pesquisadores da área de Estabilidade de tensão nos últimos 20 anos. Em [29], os autores propuseram uma forma de bloquear a tensão de campo de máquinas geradoras a fim de se obter maior margem de carga para vários sistemas. O controle também resultou, após a sua atuação, em um melhor perfil de tensão dos barramentos envolvidos e, conseqüentemente, menores perdas ôhmicas para os sistemas analisados.

Em [30] a dinâmica da estabilidade de tensão do sistema de potência é introduzida e analisada. A análise proposta evita o problema da singularidade induzida infinita, que pode acontecer nas análises da matriz Jacobiana reduzida.

Em [31] os autores examinaram o efeito de cargas não lineares, assim como diferentes tamanhos de cargas de motores de indução no limite de estabilidade estrutural. Foi concluído no final do trabalho que em estudos de estabilidade estrutural, a modelagem de carga é um fator crucial e necessita de pesquisa constante.

Um método iterativo para computar os pontos singulares para qualquer valor de parâmetro dado é proposto em [32]. De acordo com [32], os pontos singulares são aqueles que satisfazem as equações algébricas, mas apresentam o vetor de campo não bem definido.

Uma precisa definição de estabilidade estática e conceitos básicos da teoria de bifurcação estática são usados em [33] para mostrar que esta definição inclui noções convencionais da estabilidade de regime permanente e colapso de tensão, mas também

---

fornece uma base para uma rigorosa análise. Bifurcações estáticas das equações de fluxo de potência em [33] são analisadas utilizando a redução de Liapunov-Schmidt e a expansão das séries de Taylor resultando na equação reduzida da bifurcação. É mostrado no final de [33] que bifurcações estáticas das equações de fluxo de potência estão associadas com instabilidade do tipo divergente ou perda de causalidade.

Muitos trabalhos têm relacionado a questão da geração distribuída (GD) com fontes renováveis para melhorar a estabilidade de tensão. Em [34] é discutido um modelo acoplado de tensão e frequência de GD em sistemas de transmissão e distribuição. Os autores de [35] analisam a questão da incerteza de geração das fontes renováveis e em [36] um método é utilizado para estimar o valor da capacidade de armazenamento de energia em períodos de escassez energética.

Com o aumento da penetração da energia eólica em sistemas de energia, é desejável que as turbinas eólicas tenham características semelhantes aos geradores síncronos no que se refere ao apoio de frequência para a rede através de métodos de resposta inercial. Em [37] é proposta uma estratégia para turbinas eólicas de velocidade variável para proporcionar um melhor desempenho do suporte de frequência temporário e superar problemas como a oscilação de frequências no sistema para diversas condições de velocidade de vento.

Outro ponto importante a ser abordado é a questão da eficiência computacional quando se trabalha com estabilidade de tensão. Um método muito eficiente que resolve problemas de estabilidade de tensão tem que ser robusto e confiável, além de não exigir alto desempenho computacional. Isto faz com que estudiosos venham a utilizar algoritmos evolucionários como o Algoritmo Genético, Programação Evolutiva, Estratégias Evolucionárias, Otimização do Enxame de Partículas e Evolução Diferencial para resolver problemas não lineares. Em [38] utilizou-se do método da Evolução Diferencial sendo validado através do método do Fluxo de Potência Convencional a fim de se obter o ponto de máximo carregamento do sistema.

Uma proposta de fluxo de potência otimizado é apresentada em [39] para a situação onde existe uma sobre excitação de fluxo de potência reativa na junção entre o conversor do rotor e da sua rede. Em [39] é debatido a relação do aumento de vida dos equipamentos em função da potência reativa no sistema.

Os autores de [40] propõem uma malha de captura de fase, onde o modelo proposto tenta identificar e quantificar a frequência de auto sincronização no sistema de

---

controle do conversor sob diferentes condições de impedância como o ilhamento de sistemas elétricos. Os resultados indicaram a capacidade de prever oscilações não lineares e identificar frequências instáveis.

Uma técnica de detecção de ilhamento com base no desvio do valor da frequência de operação é proposta em [41]. Este trabalho ressalta que a frequência de um sistema elétrico ilhado varia proporcionalmente em relação a corrente elétrica de referência injetada no sistema. Isto resulta na necessidade da detecção da condição de ilhamento não intencional, para que a unidade de geração distribuída seja interrompida. Os resultados [41] foram capazes de diferenciar condições de ilhamento real e não ilhamento de uma geração distribuída mantendo condições de estabilidade.

O aumento da complexidade de um sistema elétrico de potência motiva o desenvolvimento de um protocolo de controle de potência reativa que descrevem o comportamento correto do sistema e sua reação dinâmica nas mudanças internas de suas variáveis [42]. A formalização dos requerimentos em [42] é baseada em uma lógica específica de linguagem temporal e foram analisados os benefícios e desvantagens de arquiteturas de controle de potência reativa centralizadas e distribuídas.

O preço da energia elétrica deve refletir a localização e diferenciar a regulação de tensão e as reservas de potência reativa do sistema. Em [43] é proposto que o sistema elétrico de potência pode ser separado em áreas de controle de potência reativa cujo perfil de tensão de cada uma delas é controlado principalmente pelas fontes de potência reativa da sua área. [43] propõe uma metodologia para determinar as áreas de potência reativa baseado na sensibilidade linear, relação da tensão nos barramentos de carga e tensão nos barramentos de geração, para ajudar a identificar os consumidores que devem pagar pelo fornecimento de energia de todos os geradores integrados em sua área.

Em [44] é proposto um método de controle para minimizar as perdas elétricas de potência ativa e diminuir a quantidade de operações de chaveamento enquanto mantém o nível de tensão da rede dentro de valores aceitáveis. Para resolver problemas mistos de programação não linear inteira, a metodologia de [44] utiliza um método de programação quadrática sequencial de regiões. Os resultados demonstraram a possibilidade de calcular o plano de controle de potência reativa com antecedência e em tempo real.

Para resolver problemas imprecisos de compartilhamento de potência em sistemas microgrids, em [45] é proposto um sistema de compensação em várias unidades de geração distribuída de forma sincronizada por meio de um barramento de comunicação com banda

---

larga de frequência baixa para um controlador central de unidades geradoras que, por sua vez, enviam informações para os controladores locais de geração distribuída.

A crescente penetração de fontes renováveis e a crescente preocupação com estabilidade de tensão a longo termo motivaram os autores de [46] a desenvolverem um indicador para detectar instabilidade por meio de geradores de indução. Mais precisamente, foi proposto [46] um modelo de gerador de indução baseado em medições, onde é possível mudar seus parâmetros a tempo de se garantir pontos de operações estáveis.

A proposta de Tese pretende utilizar a lógica *fuzzy*. A revisão bibliográfica da utilização da lógica *fuzzy* em estudos de Estabilidade de Tensão e compensação de potência reativa é feita a seguir.

#### 1.1.4 Lógica *fuzzy*

Nos anos recentes, a lógica *fuzzy* emergiu como uma poderosa ferramenta e está sendo utilizada em várias aplicações dentro da área de sistemas de potência. A lógica *fuzzy* permite projetar um controle usando regras linguísticas sem a necessidade de conhecer o modelo matemático da planta. Isto torna o controle baseado em *fuzzy* muito atrativo em sistemas com parâmetros imprecisos. A regra linguística necessária para projetar o controle da lógica *fuzzy* pode ser obtida diretamente do operador que tem conhecimento suficiente da resposta do sistema sob várias condições de operação. O mecanismo de inferência utilizado neste controle é representado por uma tabela de decisão que consiste na regra linguística IF-THEN. É assumido que o modelo exato da planta não está disponível e é difícil extrair os parâmetros exatos da planta do sistema de potência. Assim, o procedimento do projeto não pode ser baseado em um modelo exato. Entretanto, a aproximação da lógica *fuzzy* faz o projeto ter possíveis controles sem conhecer o modelo matemático exato da planta.

Uma boa noção da utilização da lógica *fuzzy* em comparação com modelos fixos é mostrada em [47]. Neste trabalho, um estabilizador de sistema de potência (PSS) baseado na lógica *fuzzy* é comparado com outros dois PSS's de parâmetros fixos, mostrando que o controle *fuzzy* apresentou uma melhor resposta dinâmica em um sistema de potência multi-máquinas. Embora o foco do trabalho não seja na área de PSS, estabilizadores de sistemas de potência podem fornecer um controle complementar para o sistema de excitação conforme ilustrado em [48].

Os autores em [49] propuseram um trabalho onde uma rápida operação de controle baseada na lógica *fuzzy* é utilizada para determinar a compensação de potência

---

reativa requerida para diminuir ocorrências de instabilidade de tensão. Neste trabalho empregaram-se um índice de colapso de tensão e a sua taxa de variação como sinalizadores das regras de inferência em aplicações de tempo real.

Na mesma linha de pensamento de [47,48 e 49], em [50] um controle de excitação baseado na lógica *fuzzy* apresentou melhores características de amortecimento na oscilação do ângulo ao unir as características dos controles proporcional-integrador-diferencial (PID) e otimização linear. O método apresentado em [50] consegue melhorar a estabilidade dinâmica do sistema considerando o tanto que as variáveis de estado se distanciaram dos valores de referência.

Em [51] são propostos dois modelos de controle, que utilizam lógica *fuzzy* no controle da variação da velocidade angular síncrona, incorporados em um compensador estático de reativo. O primeiro modelo é baseado no chaveamento de um ganho no compensador, enquanto que o segundo modelo foca em um sinal na compensação da malha de controle proposta. Os resultados destes trabalhos demonstraram que tais modelos propostos são robustos em relação à variação de parâmetros e distúrbios no carregamento, pois utilizaram as vantagens do controle *fuzzy* em conjunto com um controle da variação da velocidade angular.

A questão da não linearidade de um sistema elétrico de potência e a busca por conhecer o comportamento de curvas QVs, uma ferramenta de análise que será definida no Capítulo 2, fez com que os autores em [52] propusessem a aplicação de um modelo *fuzzy* a fim de descrever uma curva QV. O algoritmo ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) extrapola pequenos trechos da curva QV real por meio de retas. Os resultados deste trabalho indicam que modelos *fuzzy* oferecem boas descrições quantitativas e qualitativas da curva QV real. Além disso, o trabalho [52] sugere que extrapolações por outros tipos de funções de uma curva QV são importantes nos estudos de estabilidade de tensão, pois se pode prever a compensação de potência reativa necessária para uma operação adequada.

Em [53], os autores propuseram um controlador de lógica *fuzzy* para operação ilhada entre a geração distribuída e sua carga. O controlador utilizou um processo de otimização baseado no método Simplex não linear de Nelder e Mead, que implica na avaliação da função objetivo para os diferentes conjuntos de parâmetros para as funções de pertinência. Vários cenários de testes [53] demonstraram que desempenho do sistema proposto tem um amortecimento melhor e um comportamento de resposta mais rápido se comparado com a resposta obtida utilizando um controlador PI com parâmetros fixos.

---

É apresentada em [54] uma combinação de aproximação multi-objetivo de lógica *fuzzy* com otimização por colônia de formigas para resolver problemas de reconfiguração de redes elétricas simultaneamente com a indicação do tamanho ótimo de *arrays* de células fotovoltaicas e compensadores estáticos em sistemas de distribuição. Os resultados de [54] indicaram redução de perdas elétricas e melhora do perfil do nível de tensão em barramentos de carga em um sistema teste e real.

Uma vez justificado por meio de trabalhos publicados a importância de se realizar uma compensação de potência reativa correta para que o sistema se mantenha estável, a próxima seção é responsável por apresentar a motivação e objetivos do Trabalho de Tese.

## **1.2 Motivação, objetivos e organização do trabalho**

Para a sua correta operação, um SEP necessita de um suporte suficiente de potência reativa a fim de manter o perfil de tensão em níveis aceitáveis. Problemas de estabilidade de tensão estão relacionados com o suporte de potência reativa e a utilização de ferramentas que indicam este suporte permite que o operador do SEP possa tomar ações de controle em tempo hábil.

A curva QV é considerada um indicativo de suporte de potência reativa dos geradores pertencentes ao sistema analisado. Além disso, é intuitivo afirmar que quando um sistema tem maiores margens de potência reativa na curva QV, a sua confiabilidade frente a um grande distúrbio deve ser maior quando o mesmo apresenta menores reservas de potência reativa. Isto pode ser verdade, mas assim como existem sistemas com fatores de potência indutivos e capacitivos, e dependendo do sistema analisado determinado tipo de fator de potência é melhor que o outro, a margem de potência reativa pode apresentar valores positivos e negativos e não se sabe qual tipo de margem deixa o SEP melhor condicionado em termos de Estabilidade de Tensão. Sendo assim, seria interessante criar uma metodologia de trabalho que permitisse ao sistema obter uma melhor margem de potência reativa nas curvas QV das suas máquinas mantendo-se a estabilidade dinâmica do sistema. Tais assuntos serão abordados no Capítulo 3, onde é apresentada a relação entre o comportamento dinâmico e o tipo de margem da curva QV, Capítulo 4, onde é proposta uma metodologia baseada na lógica *fuzzy* com finalidade de migrar o sistema para o melhor tipo de margem da curva QV, e Capítulo 5, onde os testes com a lógica *fuzzy* são efetuados.

Em resumo, os objetivos deste documento são:

- 
- Estudar o tipo de margem da curva QV mais apropriada para a operação de um SEP (Capítulo 3);
  - Uma vez conhecido o melhor tipo de margem para a operação de um SEP, estabelecer uma metodologia que permita que o sistema migre entre os tipos de margens da curva QV (Capítulos 4);
  - Testar a metodologia considerando o efeito do tipo de margem da curva QV no que se refere à Estabilidade de Tensão Dinâmica (Capítulo 5).

Por fim, as considerações finais do documento são apresentadas no Capítulo 6, assim como as informações dos sistemas-testes utilizados, que estão contidas nos Anexos.

---

## CAPÍTULO 2: Conceitos básicos

Este capítulo se destina a apresentar conceitos de fluxo de potência e estabilidade de tensão de sistemas de elétricos de potência. Duas ferramentas de análise dentro da área de estudo de estabilidade de tensão, as curvas PV e QV, serão também descritas rapidamente, assim como a modelagem dinâmica de geradores e reguladores.

### 2.1 Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos de Potência

Para que um estudo de estabilidade de sistema ocorra, faz-se necessário conhecer os valores iniciais das variáveis de estado envolvidas no processo. O estudo de fluxo de potência é responsável por fornecer tais informações.

O cálculo de fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado de operação desta rede dada a sua topologia e certa condição de geração e carga. Objetiva-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 erro de potência ativa e reativa injetadas são dadas por:

$$\Delta P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) - (P_{gerado} - P_{carga}) \quad (2.1)$$

$$\Delta Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{k=1 \neq i}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) - (Q_{gerado} - Q_{carga}) \quad (2.2)$$

onde  $V_i$  e  $\theta_i$  são o módulo e ângulo do fasor de tensão da barra  $i$ , enquanto que  $G_{ik}$  e  $B_{ik}$  correspondem às partes reais e imaginárias da matriz de admitância, respectivamente, entre os barramentos  $i$  e  $k$ . Considerando que os valores da carga são previamente conhecidos, em cada barramento existem 4 variáveis de estado para serem determinadas para cada 2 equações de potência injetada ( $P_i$  e  $Q_i$ ). A fim de se deixar o sistema determinado, é usual classificar as barras do sistema, 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 magnitude e ângulo da tensão. Barras de geração podem ser classificadas como PV, pois as potências ativas geradas e os seus módulos de tensão são pré-definidos. Além disso, é

necessário designar um gerador como referência angular onde o seu fasor de nível de tensão é especificado.

Este trabalho utiliza o método de Newton-Raphson como ferramenta de solução iterativa do fluxo de potência. A aplicação deste método pode ser entendida a partir da analogia mostrada na Tabela 2.1. A solução iterativa permite conhecer as tensões e os ângulos em todas as barras. Depois de convergido, calculam-se as potências ativa e reativa dos barramentos do sistema, além da potência ativa e reativa gerada na barra classificada como referência angular e as potências reativas dos barramentos PVs.

Tabela 2.1 Analogia matemática-física

<b>Matemático</b>	<b>Físico</b>
$f(x)=0$	$\sum \Delta P=0$ $\sum \Delta Q=0$
$X$ (variável de estado)	$V$ e $\theta$ (variáveis de estado)
$f(x) \rightarrow$ 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.

### 2.1.1 Limitações do injeções de potência

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

Entretanto, a barra de referência angular 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.

---

Por outro lado, quando uma barra PV atinge o seu limite de geração de potência reativa, esta barra não controlará mais o nível de tensão da sua barra terminal e passará a gerar ou consumir o valor limite atingido. Para a formulação do fluxo de potência é como se esta barra de geração com limite violado se tornasse um barramento do tipo PQ. Sob o ponto de vista prático, quando uma máquina perde o controle do seu nível de tensão terminal, o seu regulador de tensão deixa de atuar, pois atinge o limite da sua corrente de campo e como consequência, a tensão de campo da máquina torna-se constante durante este período.

Diversas outras limitações do fluxo de potência podem ser agregadas ao caso de estudo, como por exemplo, limites máximos e mínimos de nível de tensão nos barramentos, valores de tap's disponíveis em determinado transformador, valores limites de redespacho de potência ativa, entre outras diversas funções existentes. Quanto mais fatores limitantes forem agregados ao caso de estudo de fluxo de potência, maior exigência computacional será requerida para a sua resolução e, dependendo da limitação imposta, o ponto operativo pode não ser encontrado.

### *2.1.2 Tipos de variáveis em uma análise de fluxo de potência*

De uma maneira geral, existem três tipos de variáveis que interferem no resultado final de um fluxo de potência: variáveis não controláveis ou de perturbação, variáveis de controle ou independentes e as variáveis de estado ou dependentes.

As variáveis de perturbação são variáveis que estão fora do controle, como as cargas ativas e reativas do sistema, visto que elas são determinadas pelo consumidor. As variáveis de controle, por sua vez, são aquelas que estão especificadas em cada barramento. Por fim, as variáveis de estado são aquelas que devem ser calculadas em cada barramento.

Maiores informações sobre a modelagem de fluxo potência estão indicadas em [55]. Com a devida caracterização do cálculo de um fluxo de potência, a próxima seção caracteriza os estudos de Estabilidade de Tensão.

## **2.2 Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**

De acordo com [56], Estabilidade de tensão refere-se à habilidade de um sistema de potência de manter as tensões em regime permanente de todas as barras depois de ser submetido a um distúrbio em uma dada condição operativa inicial. A instabilidade [57], por outro lado, resulta em uma forma progressiva de queda ou aumento das tensões em algumas barras. Um possível acontecimento de instabilidade de tensão é a perda da carga em uma área

---

ou o desligamento de uma linha de transmissão ou de outros elementos pela proteção levando a uma cascata de desligamentos. A perda de sincronismo de alguns geradores pode resultar em desligamentos quando o limite das correntes de campo das máquinas é violado. Por outro lado, a queda progressiva das tensões das barras pode ser associada com a instabilidade angular.

O colapso de tensão [58] é um processo no qual uma sequência de eventos acompanhando a instabilidade de tensão resulta em um *blackout* ou níveis baixos de tensão em uma parcela significativa de um sistema de potência. Uma operação estável de regime permanente em um baixo nível de tensão pode continuar depois que uma mudança no tap de um transformador atinja o seu limite de estímulo, com ou sem intenção de desligar determinada carga. Cargas remanescentes tendem a ser sensíveis ao nível de tensão, e a demanda conectada na tensão nominal não é encontrada.

Cargas restauradas [59] aumentam o estresse em redes de alta tensão pelo aumento do consumo de potência reativa e causam maiores reduções no nível de tensão. Uma situação crítica de instabilidade de tensão ocorre quando cargas dinâmicas tentam restaurar o consumo de potência através da capacidade de transmissão da rede e dos geradores conectados.

Um fato importante para a instabilidade de tensão é a queda de tensão que ocorre quando o fluxo de potência ativa e reativa é transmitido em linhas de transmissão altamente indutivas; pois este tipo de linha tem um menor limite de capacidade de transmissão de potência e, conseqüentemente, fará com que o sistema tenha um baixo suporte do nível de tensão devido às perdas de potência reativa. A transferência de potência e o suporte de tensão são fortemente limitados também quando alguns geradores atingem a corrente de campo ou da armadura em sobrecarga. Outra grande ameaça à estabilidade de tensão ocorre quando um distúrbio aumenta a demanda de potência reativa através da capacidade sustentável das fontes de potência reativa disponíveis [60].

Enquanto a forma mais comum de instabilidade de tensão é a queda progressiva de tensões nas barras, o risco de instabilidade por sobretensão também existe. É causado pelo comportamento capacitivo da rede assim como por um limite de subexcitação de geradores prevenindo compensadores síncronos de absorver o excesso de potência reativa.

Problemas de estabilidade de tensão também podem ser sentidos nos terminais dos links de um sistema de HVDC [61] usado tanto para grandes distâncias ou aplicações

---

back-to-back. São usualmente associados com links HVDC conectados em sistemas AC fracos e podem ocorrer tanto na estação retificador como inversora e são associados com características de carga reativas desfavoráveis nos conversores. A estratégia do controle do link com HVDC tem uma influência significativa para tais problemas, desde que a potência ativa e reativa na conexão AC/DC seja determinada pelos controles. Se o carregamento resultante na transmissão AC estressa além da sua capacidade, instabilidade de tensão ocorre. Tal fenômeno é relativamente rápido, sendo uma fração de tempo de um segundo ou menos. Recentes desenvolvimentos tecnológicos no HVDC têm aumentado os limites da operação estável de um link com HVDC em áreas fracas quando comparadas com os limites de conversores comutáveis de linha.

Uma forma do problema de estabilidade de tensão que resulta em uma incontrolável sobretensão é a sobre-excitação das máquinas síncronas, pois uma máquina síncrona sobreexcitada fornece potência reativa para o sistema e, se este valor de potência fornecido não for controlado, problemas de isolamento em equipamentos podem ser encontrados.

É usual classificar a estabilidade de tensão nas seguintes subcategorias [56]:

- Estabilidade de tensão para um grande distúrbio refere-se à habilidade do sistema de manter as tensões em regime permanente depois de um grande distúrbio como um curto-circuito, perda de geração ou contingências no sistema. Esta habilidade é determinada pelo sistema e pelas características das cargas e a interação dos controles discretos e contínuos e da proteção. Requer o exame de uma resposta não linear do sistema de potência em um período de tempo suficiente para capturar o desempenho e as interações com tais dispositivos, como motores, LTC's subcarregados e limitadores da corrente de campo. O período de estudo pode ser estendido desde poucos segundos a dezenas de minutos.

- Estabilidade de tensão para um pequeno distúrbio refere-se à habilidade do sistema de manter em regime permanente as tensões quando sujeitas a uma pequena perturbação como uma mudança incremental de carga no carregamento do sistema. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características da carga, controles contínuos e controles discretos para um dado instante de tempo. Com apropriadas considerações, as equações do sistema podem ser linearizadas para análise permitindo o cálculo da valiosa informação de sensibilidade, útil para identificar fatores influenciadores na estabilidade. Esta linearização, contudo, não consideram os efeitos não lineares como os controles de mudança

---

de taps. Sendo assim, uma combinação da análise linear e não linear é utilizada de maneira complementar.

Assim como a o estudo de estabilidade angular do rotor, a estabilidade de tensão pode ser um fenômeno de curto ou longo termo a serem definidas a seguir:

- Estabilidade de tensão de curto termo envolve dinâmicas de componentes de carga de rápida ação, tais como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores de HVDC. Requer uma solução de um apropriado sistema de equações diferenciais. Dinâmicas do modelo de cargas e curtos circuitos próximos das barras são importantes.

- Estabilidade de tensão de longo termo envolve a ação lenta de equipamentos tais como transformadores com LTC`s, cargas controladas termostaticamente e limitadores de corrente de geradores. O período de estudo de interesse pode se estender a vários minutos e as simulações de longo termo são requeridas para analisar o desempenho dinâmico do sistema. Estabilidade é usualmente determinada como resultado da falha de um equipamento em vez da severidade de um distúrbio inicial. Instabilidade é devido à perda do equilíbrio de longo termo, ponto de operação de regime permanente sendo um distúrbio pequeno instável ou a falta de atração frente a um equilíbrio pós distúrbio estável. Em muitos casos, análise estática pode ser utilizada para estimar margem de estabilidade, identificar fatores que influenciam a estabilidade e exibir uma ampla gama de condições para o sistema. Quando o tempo de atuação dos controles é importante, este estudo deve ser complementado pela simulação quase dinâmica no domínio do tempo.

A distinção entre a estabilidade angular e a de tensão é baseada no conjunto específico de forças opostas que se sustentam em um desbalanço e a variável principal do sistema na qual a instabilidade conseqüente está aparente. Em muitos casos, é difícil a distinção entre elas para um determinado distúrbio [62]. Em [63] é apresentado um índice de limite de estabilidade de tensão em regime permanente onde conceitos de estabilidade angular são também considerados.

Conforme indicado nos parágrafos anteriores, o estudo de estabilidade de tensão está ligado à observação da habilidade do sistema em manter um perfil de tensões adequado em todos os seus barramentos, tanto em condições normais, como em situações de distúrbio. As curvas PV e QV são ferramentas que auxiliam esta tarefa e a simplicidade no cálculo envolvido para obtê-las em um SEP foram determinantes para serem escolhidas como

---

ferramentas de análise. Como os próximos capítulos abordarão a relação do tipo de curva QV e a sua estabilidade dinâmica de pontos contidos em uma região de operação indicada pela curva PV, as próximas seções descreverão sucintamente estas curvas.

### 2.2.1 Curva PV

A curva PV descreve o comportamento da tensão de um determinado barramento em função do aumento de sua carga, conforme ilustrado pela Figura 2.1. Esta curva pode ser obtida pelo Método da Continuação e indica a carga máxima a ser fornecida. A distância entre um ponto operacional atual e a carga máxima é chamada de margem de carga. O ponto de máximo carregamento, sob certas condições, está associado a uma bifurcação sela-nó. O Método da Continuação, utilizado para traçar esta curva, baseia-se em duas etapas: passo predictor e passo corretor. O passo predictor define a direção para o aumento de carga e geração do SEP, enquanto o passo corretor considera o passo predictor como uma estimativa inicial em um fluxo de potência convencional. A referência [58] apresenta os conceitos básicos dessa metodologia.

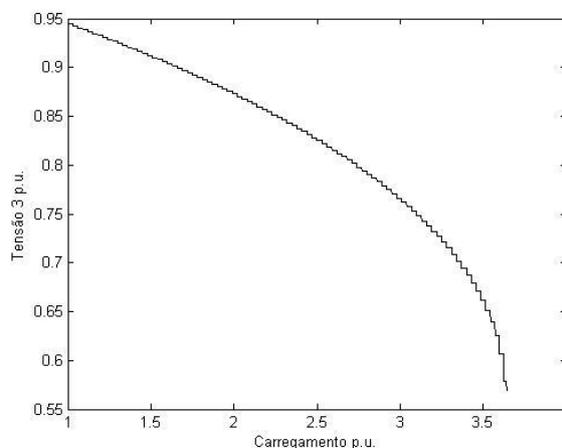


Figura 2.1 Curva PV

### 2.2.2 Curva QV

A Figura 2.2 ilustra o formato da curva QV, onde é representada em uma análise estática a relação entre a potência reativa gerada de um determinado gerador em função da magnitude da tensão em seu barramento. Para se obter esta relação, faz-se necessário a não imposição de limites de geração de potência reativa no gerador analisado devido ao fato de

---

que, uma vez atingido o limite de geração de potência reativa, perde-se o controle do nível de tensão da barra terminal do gerador.

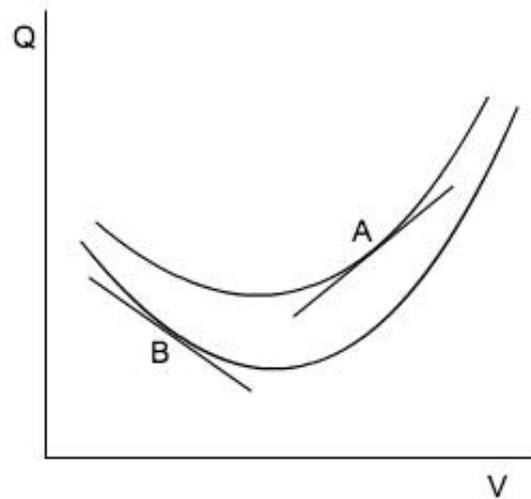


Figura 2.2 Representação de uma curva QV genérica

Na Figura 2.2 existem duas regiões de estabilidade: uma estável e outra instável. A região estável caracteriza-se pelo aumento de tensão quando também existe uma elevação da potência reativa gerada (ponto A), enquanto que na região instável tem-se o efeito contrário com o aumento de tensão (ponto B).

A margem de potência reativa da curva QV está indicada na Figura 2.3. Esta margem é muito importante, pois indica o quão forte é aquele gerador em termos de suprimento de potência reativa para o sistema.

É assumido que uma curva QV com o formato apresentado na Figura 2.3 tem uma margem positiva de potência reativa, enquanto na Figura 2.4 tem-se uma margem negativa de potência reativa. O significado desta convenção tem uma importância nos testes que serão analisados nos próximos capítulos.

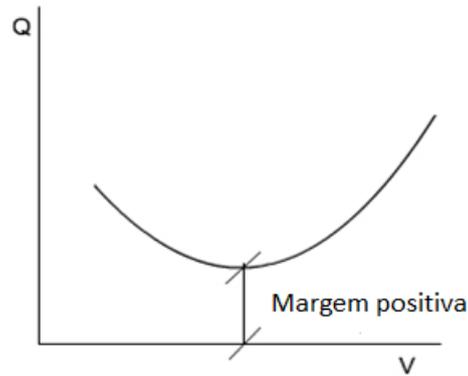


Figura 2.3 Curva QV com margem positiva de potência reativa

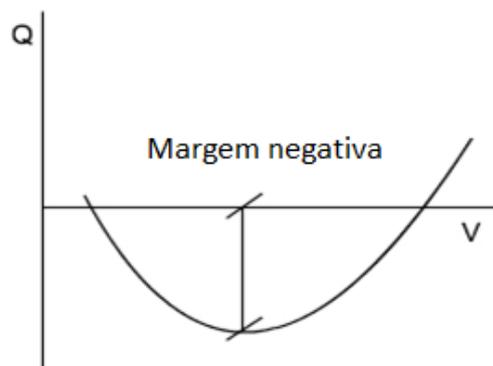


Figura 2.4 Curva QV com margem negativa de potência reativa

### 2.2.3 Relação entre as curvas PV e QV

A curva QV é um indicativo da capacidade daquele gerador em fornecer potência reativa para o sistema, caso não sejam impostas condições de limites de geração de potência reativa. Por exemplo, suponha que se deseja obter a curva QV do gerador 1 em um sistema com “x” geradores. Nesta situação, apenas o gerador 1 não apresenta limites de geração de potência reativa durante o cálculo da sua curva QV, enquanto para os demais geradores estes limites são mantidos.

Sendo assim, é importante sempre verificar se determinado ponto de carregamento da curva QV está dentro da margem de carga determinada pela curva PV que leva em consideração normalmente este limite. Outros detalhes interessantes da relação entre as curvas PV e QV estão contidos no trabalho de Isabella de Freitas em [64]. Tito em [65] mostra a importância da curva QV na análise de contingências, além de descrever uma forma de obter curvas QV’s para barras de carga.

Os próximos capítulos buscarão uma forma de demonstrar que existe uma relação entre o comportamento da curva QV, margem positiva e negativa, e as simulações dinâmicas de grandes distúrbios. Simulações dinâmicas exigem o conhecimento de modelos dinâmicos de geradores e seus reguladores e, por isso, conceitos inerentes sobre este tema serão tratados a seguir.

### 2.3 Modelagem dinâmica de geradores e seus reguladores

Com a devida caracterização dos conceitos e alguns métodos de análise dentro da área de estabilidade de tensão de sistemas elétricos, essa seção apresenta o modelo dinâmico das máquinas e os respectivos controles utilizados neste trabalho.

Em uma simulação dinâmica, a máquina síncrona atuando como gerador é um elemento classificado como ativo dentro de um SEP por ser uma fonte de energia. Dessa maneira, ela influi diretamente nas condições de estabilidade do sistema a ser analisado, pois cada gerador possui uma dinâmica associada ao seu modelo e é também equipado com controladores como reguladores de tensão e velocidade, por exemplos.

Nas simulações dinâmicas que serão apresentadas no próximo capítulo, utilizou-se a versão acadêmica dos programas ANAREDE e ANATEM. O cálculo de fluxo de potência será realizado pelo programa ANAREDE, enquanto que contingências dinâmicas serão executadas pelo programa ANATEM.

O modelo de gerador, regulador de tensão e regulador de velocidade utilizados [66] estão representados pelas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente. Maiores explicações sobre estes modelos e os dados de seus parâmetros são encontrados no Anexo A deste documento.

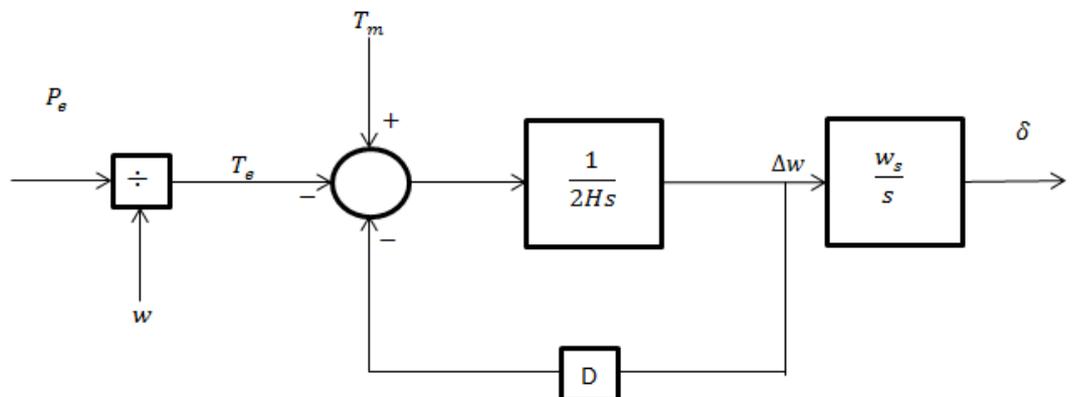


Figura 2.5 Modelo de gerador utilizado

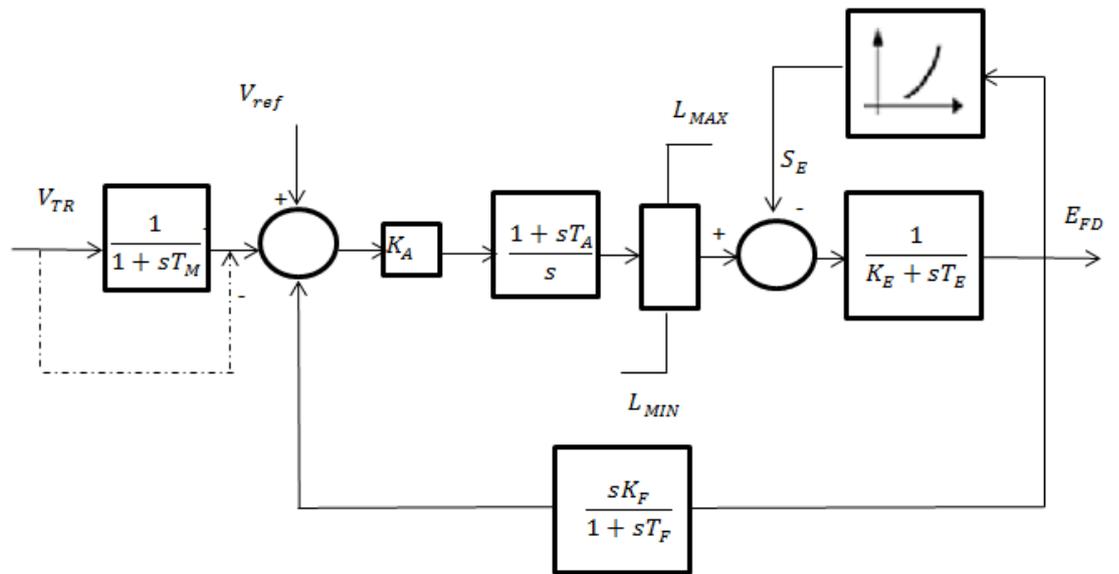


Figura 2.6 Modelo de regulador de tensão utilizado

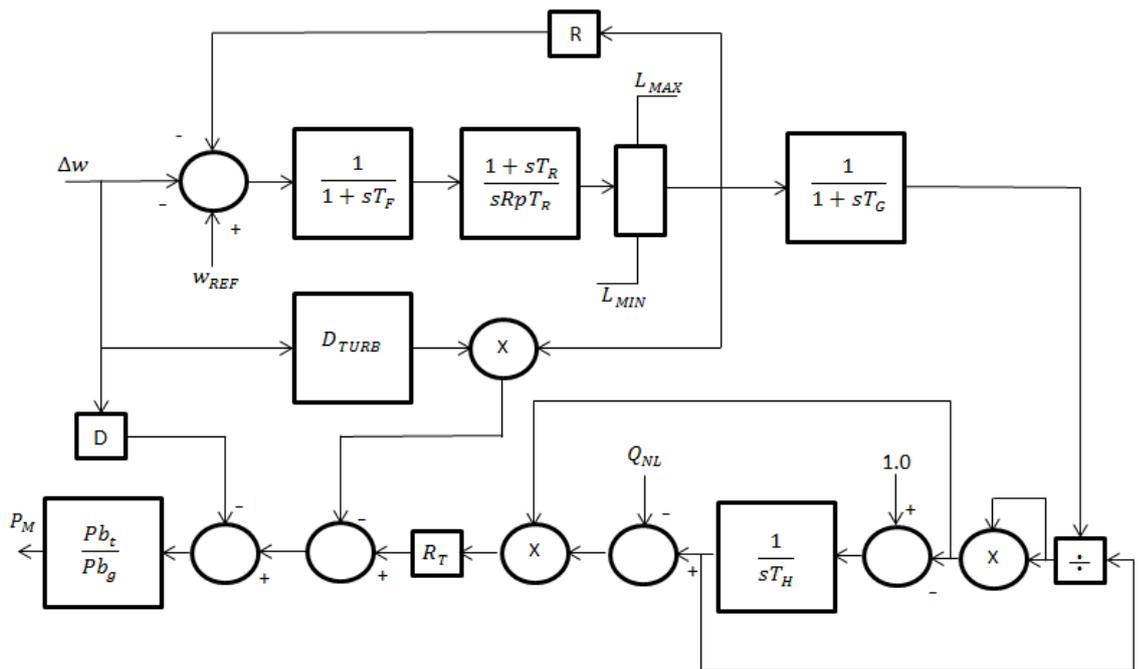


Figura 2.7 Modelo de regulador de velocidade utilizado

## 2.4 Hipóteses e considerações finais do capítulo 2

Conforme visto no presente capítulo, a curva QV pode apresentar duas margens de potência reativa: positiva e negativa. Em [67] é apresentado um trabalho sobre o gerenciamento de potência reativa de reserva baseado no método de decomposição de Benders. Entretanto, em nenhum momento é citado em [67] o quanto é benéfico para um

---

sistema operar com margem positiva ou negativa na curva QV. Este ponto também não é discutido em [68] e [69]. Os autores de [70] introduziram a questão da possibilidade de deslocar o ponto operativo das curvas QV's, fazendo com que o sistema migre do ponto B para o ponto A indicados na Figura 2.2 sem alterar o tipo de margem da curva QV (positiva ou negativa). Esta possibilidade de alterar o ponto operativo dentro da curva QV mostrou-se válida e como forma de complementar o estudo desenvolvido em [70], buscar-se-á neste trabalho uma forma de alterar o tipo de margem da curva QV quando este tipo de margem estiver associada a uma condição operativa não desejável.

Todas estas considerações anteriores permitem enunciar as hipóteses do trabalho de Tese:

- Qual é a relação entre o tipo de margem da curva QV e o seu comportamento dinâmico em um SEP?
- Uma simulação dinâmica instável pode ser evitada baseada no conhecimento prévio do tipo de margem da curva QV? Se sim, como propor ações de controle para evitar instabilidades dinâmicas em um SEP?

A fim de responder estas hipóteses, o Capítulo 3 focará na questão de qual margem de potência reativa da curva QV é mais benéfica quando o sistema é submetido a um distúrbio. Como este conhecimento prévio, uma metodologia para alterar o tipo de margem da curva QV é proposta no Capítulo 4 e avaliada no Capítulo 5.

---

### CAPÍTULO 3: Testes de compensação de potência reativa

A curva QV é obtida ao variar a tensão terminal de um determinado gerador sem considerar que esta máquina tenha limite de geração de potência reativa. Gráficos de curvas QV's ilustram a relação entre o valor da potência reativa gerada em função do nível de tensão de seu barramento.

As Tabelas 3.1 a 3.5 indicam os valores de margem da curva QV real para diversos sistemas e cargas supridas. Para a obtenção destes resultados, o passo da curva QV obedeceu a seguinte equação:

$$V_{barramento} = V_{barramento} - 0,05 \quad (3.1)$$

onde  $V_{barramento}$  é a tensão terminal do gerador para a qual se deseja traçar a curva QV e o valor igual a 0,05 foi escolhido arbitrariamente.

Nas Tabelas 3.1 a 3.5, a alteração da carga suprida é realizada mantendo-se o mesmo fator de potência. Adicionalmente, também se considerou que a potência ativa gerada se alterou na mesma proporção que o carregamento do sistema. Por exemplo, na Tabela 3.1, quando se localiza a linha com fator de carga igual 1,1 é o mesmo dizer que as parcelas ativas e reativas de todas as cargas foram multiplicadas pelo fator 1,1, assim como todas as potências ativas geradas no sistema em relação ao caso base, que corresponde a um fator de carga igual a 1,0.

Na Tabela 3.1 observa-se que, com o aumento do fator de carga, a margem de potência reativa mostrada na curva QV diminui. Isto é esperado, pois este aumento de carregamento faz com que as máquinas do sistema fiquem mais próximas dos seus limites operativos.

Outro detalhe indicado na Tabela 3.4 é com relação à marcação “X”. Esta indicação significa que não foi possível calcular a margem de potência reativa daquele gerador por motivos de convergência do fluxo de potência.

Os dados dos sistemas com 5, 9, 14 e 30 barramentos são mostrados no Anexo B. Para o sistema Sul-Sudeste, os dados podem ser obtidos em [71].

Tabela 3.1 Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barramentos

Fator de carga	Margem da curva QV	
	Gerador 1	Gerador 2
1,0	-0,7179	-0,3932
1,1	-0,6934	-0,3162
1,2	-0,6650	-0,2344
1,3	-0,6318	-0,1376
1,4	-0,5924	-0,0259
1,5	-0,5445	+0,1004

Tabela 3.2 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 9 barramentos

Fator de carga	Margem da curva QV		
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
1,0	-0,3767	-0,4163	-0,7149
1,1	-0,1353	-0,2309	-0,5504
1,2	-0,0402	-0,0241	-0,3576
1,3	+0,2582	+0,201	-0,1350
1,4	+0,5705	+0,4403	+0,1179
1,5	+0,8866	+0,6985	+0,4026

Tabela 3.3 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 14 barramentos

Fator de carga	Margem da curva QV				
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 6	Gerador 8
1,0	-0,4399	-4,728	-1,3774	-0,9179	-0,6440
1,1	-0,2727	-4,4085	-1,2707	-0,8397	-0,6066
1,2	-0,0724	-3,9899	-1,1533	-0,7539	-0,5647
1,3	+0,1569	-3,4726	-1,0228	-0,6600	-0,5168
1,4	+0,2605	-2,8831	-0,8747	-0,5570	-0,4603
1,5	+0,5269	-2,2828	-0,7004	-0,4408	-0,3904
1,6	+0,8436	-1,7621	-0,5009	-0,3067	-0,2944
1,7	+1,2398	-0,9532	-0,2474	-0,1557	-0,1579
1,8	+1,8044	-0,1101	+0,0644	+0,0221	+0,0287

Tabela 3.4 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema com 30 barramentos

Fator de carga	Margem da curva QV					
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 5	Gerador 8	Gerador 11	Gerador 13
1,0	+0,0523	-3,7722	-1,0532	-1,1309	-0,4566	-0,4767
1,1	+0,3883	-3,0637	-0,8745	-0,8725	-0,3998	-0,4073
1,2	+0,7894	-2,2355	-0,6514	-0,5557	-0,3228	-0,3150
1,3	+1,3088	-1,2907	-0,3458	-0,1932	-0,1918	-0,1701
1,4	+2,0853	-0,2317	+0,0925	+0,2238	+0,0648	+0,0302
1,5	X	+0,9441	+0,6964	+0,7022	+0,4692	+0,4317

Tabela 3.5 Relação da curva QV com o fator de carga, sistema sul sudeste com 65 barramentos

Fator de carga	Margem da curva QV				
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Gerador 17	Gerador 18
1,0	-12,0242	-6,4706	-4,2672	-8,8692	-5,0360
1,1	-9,3322	-0,4477	+1,5133	-7,8095	-4,9010
Fator de carga	Margem da curva QV				
	Gerador 19	Gerador 20	Gerador 26	Gerador 29	Gerador 30
1,0	-7,7612	-10,7178	-13,2307	-4,7159	-6,4515
1,1	-7,4803	-9,6889	-4,9695	+4,2100	-0,6220
Fator de carga	Margem da curva QV				
	Gerador 31	Gerador 43	Gerador 44	Gerador 45	Gerador 46
1,0	-8,7695	-4,3866	-5,1955	-2,3685	-8,6080
1,1	+2,5514	+2,9662	+1,2833	-0,7666	-0,2221

A Tabela 3.6 mostra os valores de margem de carga dos sistemas analisados utilizando o Método da Continuação. É fácil perceber que a margem positiva de potência reativa, indicadas nas Tabelas de 3.1 a 3.5, tende a ser detectada quando o sistema está próximo do ponto de colapso de tensão.

Tabela 3.6 Margens da curva PV para diferentes sistemas elétricos de potência

Sistema Elétrico de Potência	Margem da curva PV
5 barramentos	2,5910
9 barramentos	1,5560
14 barramentos	1,9110
30 barramentos	1,4940
Sul sudeste	1,1200

Além disso, é observado que um aumento do carregamento do sistema resulta em uma diminuição da margem de potência reativa ao ponto de, para determinado ponto de

---

operação, a margem tornar-se positiva. Esta característica permitiu que uma metodologia de trabalho fosse criada a fim de se investigar a hipótese:

1. Localizar um ponto de operação do sistema elétrico para o qual a margem de potência reativa da curva QV apresenta um valor positivo;
2. Submeter este ponto com margem positiva a um distúrbio não linear. O distúrbio escolhido é a retirada de uma linha de transmissão devido a sua simplicidade. Apenas uma linha de transmissão será retirada em cada simulação;
3. Caso o sistema com margem positiva de potência reativa na curva QV apresente instabilidade dinâmica, ações corretivas serão efetuadas com o objetivo de que a instabilidade dinâmica seja suportada pelo sistema;
4. Traçar a curva QV considerando a inclusão das ações corretivas e verificar qual tipo de margem na curva QV o sistema apresentará.

Tal metodologia de trabalho apresentada acima será testada para os mesmos sistemas mencionados no presente capítulo.

#### 4.1 Sistema com 5 barramentos

O sistema com 5 barramentos apresenta margem positiva de potência reativa da curva QV para o fator de carga igual a 1,5. O comportamento dinâmico quando simulado nos programas ANAREDE e ANATEM para esta condição operativa está indicado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem positiva de potência reativa para o sistema com 5 barramentos.

Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico
1-3	Estável
2-4	Atingiu o número máximo de iterações
3-4 circuito 1	Estável
3-4 circuito 2	Estável
3-5 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações
3-5 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações

Como ações corretivas, as tensões terminais de todos os geradores foram elevadas simultaneamente. Os resultados das ações corretivas estão contidos na Tabela 3.8. Para que o leitor interprete corretamente o que está indicado na Tabela 3.8, segue uma explicação: a linha que indica tensão igual a 1,07 significa os valores das tensões terminais de todos geradores do

sistema. Além disso, a indicação “erro numérico” tem a mesma interpretação que o número máximo de iterações foi atingido no programa ANATEM.

Tabela 3.8 Comportamento dinâmico no sistema com 5 barramentos considerando ações corretivas.

Tensão	Retirada de linha de transmissão					
	LT 1-3	LT 2-4	LT 3-4 circuito 1	LT 3-4 circuito 2	3-5 circuito 1	3-5 circuito 2
1,03	Estável	Erro numérico	Estável	Estável	Estável	Estável
1,04	Estável	Erro numérico	Estável	Estável	Estável	Estável
1,05	Estável	Erro numérico	Estável	Estável	Estável	Estável
1,06	Estável	Erro numérico	Estável	Estável	Estável	Estável
1,07	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
1,08	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável	Estável

Os resultados da Tabela 3.8 demonstraram que a simples mudança da tensão de referência dos geradores foi suficiente para que o sistema suportasse a retirada de linhas de transmissão. Respeitando a metodologia de trabalho proposta no presente Capítulo, a Tabela 3.9 apresenta a margem de potência reativa quando os geradores têm a tensão de referência alterada para o valor de 1,07 [p.u.]. O sistema com as ações corretivas apresentou margem negativa para o carregamento igual a 1,5.

Tabela 3.9 Relação da curva QV com fator de carga, sistema com 5 barramentos com ações corretivas

Fator de carga	Margem da curva QV	
	Gerador 1	Gerador 2
1,0	-0,8034	-0,5125
1,1	-0,7816	-0,4362
1,2	-0,7566	-0,3668
1,3	-0,7277	-0,2822
1,4	-0,6943	-0,1824
<b>1,5</b>	<b>-0,6549</b>	<b>-0,0677</b>

#### 4.2 Sistema com 9 barramentos

O sistema com 9 barramentos apresentou margem positiva de potência reativa para o fator de carga igual a 1,4. Os resultados da simulação dinâmica para esta condição operativa estão indicados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 9 barramentos.

Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico
4-5	Estável com grandes irregularidades
5-7	Atingiu o número máximo de iterações
7-8	Estável com grandes irregularidades
8-9	Estável com grandes irregularidades
9-6	Instável
6-4	Estável com pequenas irregularidades
1-4	Estável com grandes irregularidades
2-7	Estável com grandes irregularidades
3-9	Estável com grandes irregularidades

Na Tabela 3.10 onde existe a marcação “estável com grandes irregularidades” significa que o sistema suportou o distúrbio dinâmico, mas apresentou irregularidades em relação ao nível de tensão ou limite de geração de potência reativa no software ANATEM. Por exemplo, na simulação de saída de linha de transmissão entre as barras 4 e 5, a tensão terminal da Barra 5 atingiu o valor de  $V_5 = 0,432 [p. u.]$  e gerações de potência reativa dos geradores 2 e 3 foram  $Q_{g2} = 259 [MVar]$  e  $Q_{g3} = 70,83 [MVar]$ , violando os limites das máquinas que são iguais a  $Q_{2\ máx} = 84 [MVar]$ ,  $Q_{3\ máx} = 56 [MVar]$  e  $Q_{g\ mín} = -\|Q_{g\ máx}\|$ . Como são situações que requerem uma alta compensação de potência reativa para que os limites operativos não sejam violados, estes distúrbios não serão estudados no presente documento.

Por outro lado, as saídas das linhas de transmissão entre as barras 9-6 e 6-4 são casos que podem ser trabalhados. A saída da linha entre os barramentos 9-6 apresentou instabilidade dinâmica, enquanto o distúrbio envolvendo as barras 6-4 apresentou estabilidade dinâmica, mas com baixo nível de tensão na barra 6,  $V_6 = 0,786 [p. u.]$ , e violação de limite de geração de potência reativa na máquina 3,  $Q_{g3} = 84,59 [MVar]$ .

As ações corretivas para estas simulações estão indicadas na Tabela 3.11, onde duas situações foram muito benéficas para o sistema: os casos 9 e 10. No caso 10, instalou-se um capacitor na barra 7 porque é um barramento localizado próximo da máquina 2 que

apresentou limite de geração de potência reativa violado durante a simulação dinâmica de saída de LT 9-6. Este valor de capacitor representa 14,90% do valor total de carga reativa atendida pelo sistema. Por fim, os valores da curva QV contidos na Tabela 3.12, quando também considerados as ações corretivas, apresentaram margens negativas de potência reativa na curva QV se comparadas com os valores da Tabela 3.2. Tal fato já levanta a suspeita que um sistema com margem mais negativa de potência reativa na curva QV se comporta de maneira mais satisfatória que o mesmo com margem positiva.

Tabela 3.11 Comportamento dinâmico no sistema com 9 barramentos considerando ações corretivas

Tensão	Retirada de linha de transmissão		Observações
	Saída LT 9-6	Saída LT 6-4	
1,01 (caso 1)	Instável	$V_6 = 0,806[p. u.]$	Todas as gerações dentro dos limites operativos na Saída da LT 6-4.
1,02 (caso 2)	Instável	$V_6 = 0,824[p. u.]$ $Q_{g2} = 67,38[MVAr]$ $Q_{g3} = 76,65[MVAr]$	Excedeu o limite operativo o gerador 3 na saída da LT 6-4.
1,03 (caso 3)	Estável $Q_{g2} = 141,44[MVAr]$ $Q_{g3} = 55,78[MVAr]$	$V_6 = 0,84[p. u.]$ $Q_{g2} = 64,72[MVAr]$ $Q_{g3} = 73,04[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,04 (caso 4)	Estável $Q_{g2} = 133,87[MVAr]$ $Q_{g3} = 53,84[MVAr]$	$V_6 = 0,86[p. u.]$ $Q_{g2} = 62,09[MVAr]$ $Q_{g3} = 69,59[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,05 (caso 5)	Estável $Q_{g2} = 130,41[MVAr]$ $Q_{g3} = 51,47[MVAr]$	$V_6 = 0,88[p. u.]$ $Q_{g2} = 59,59[MVAr]$ $Q_{g3} = 66,32[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,06 (caso 6)	Estável $Q_{g2} = 122,41[MVAr]$ $Q_{g3} = 48,27[MVAr]$	$V_6 = 0,89[p. u.]$ $Q_{g2} = 57,12[MVAr]$ $Q_{g3} = 63,17[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,07 (caso 7)	Estável $Q_{g2} = 116,26[MVAr]$ $Q_{g3} = 46,14[MVAr]$	$V_6 = 0,912[p. u.]$ $Q_{g2} = 54,76[MVAr]$ $Q_{g3} = 60,16[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,08 (caso 8)	Estável $Q_{g2} = 112,58[MVAr]$ $Q_{g3} = 43,76[MVAr]$	$V_6 = 0,927[p. u.]$ $Q_{g2} = 52,39[MVAr]$ $Q_{g3} = 57,27[MVAr]$	Ambas as simulações excederam os limites operativos das máquinas geradoras
1,09 (caso 9)	Estável $Q_{g2} = 108,31[MVAr]$ $Q_{g3} = 40,92[MVAr]$	$V_6 = 0,9429[p. u.]$ $Q_{g2} = 50,11[MVAr]$ $Q_{g3} = 54,47[MVAr]$	Na simulação de saída de LT 6-4, todas as máquinas operaram dentro dos seus limites operativos. A simulação de saída de LT 9-6 excedeu em 24 [MVAr] o limite de geração da máquina 2.
1,09 com shunt (caso 10)	Estável $Q_{g2} = 83,62[MVAr]$ $Q_{g3} = 35,07[MVAr]$	X	Instalou um capacitor de $b_{shunt 7} = 24 [MVAr]$ na barra 7 durante a simulação da saída de LT 9-6. Todos os limites operativos das máquinas foram respeitados na saída da LT 9-6.

Tabela 3.12 Relação da curva QV com fator de carga igual 1,4, sistema com 9 barramentos com ações corretivas

Gerador	Margem da curva QV	
	Caso 9	Caso 10
1	+0,1669	-0,0598
2	-0,0121	-0,2085
3	-0,3575	-0,5449

---

### 4.3 Sistema com 14 barramentos

O sistema com 14 barramentos apresentou margem positiva de potência reativa quando o fator de carga apresentou o valor de 1,8. O comportamento dinâmico para este tipo de margem está indicado na Tabela 3.13, onde apenas simulação envolvendo a linha de transmissão entre as barras 6 e 5 apresentou instabilidade dinâmica.

Seguindo o mesmo padrão dos testes anteriores, as primeiras ações corretivas foram a elevação da tensão terminal das máquinas geradoras do sistema. Os resultados estão contidos na Tabela 3.14 e indicam que a simples alteração da tensão terminal permite que o sistema suporte o distúrbio dinâmico. Infelizmente esta característica dinamicamente estável está acompanhada com grandes violações dos limites de geração de potência reativa e isto torna inviável qualquer compensação reativa. Uma alta compensação não permite continuar a investigação da segunda hipótese com o sistema de 14 barras.

Tabela 3.13 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 14 barramentos.

Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico
1-2	Estável
1-5	Estável
2-3	Estável
2-4	Estável
2-5	Estável
3-4	Estável
4-5	Estável
7-4	Estável
9-4	Estável
6-5	<b>Instável</b>
6-11	Estável
6-12	Estável
6-13	Estável
7-8	Estável
7-9	Estável
9-10	Estável
9-14	Estável
10-11	Estável
12-13	Estável
13-14	Estável

Tabela 3.14 Comportamento dinâmico no sistema com 14 barramentos considerando ações corretivas.

Tensões	Saída LT 6-5
$V_1 = 1,07[p. u.]$ $V_2 = 1,05[p. u.]$ $V_3 = 1,02[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Instável
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,06[p. u.]$ $V_3 = 1,03[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,07[p. u.]$ $V_3 = 1,04[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,08[p. u.]$ $V_3 = 1,05[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,08[p. u.]$ $V_3 = 1,06[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,08[p. u.]$ $V_3 = 1,07[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades
$V_1 = 1,08[p. u.]$ $V_2 = 1,08[p. u.]$ $V_3 = 1,08[p. u.]$ $V_6 = 1,08[p. u.]$ $V_8 = 1,09[p. u.]$	Estável com grandes irregularidades

#### 4.4 Sistema com 30 barramentos

Pela Tabela 3.15, durante a simulação dinâmica nos programas ANAREDE e ANATEM, percebeu-se a ocorrência de uma instabilidade dinâmica quando a linha de transmissão entre as barras 1 e 2 foi retirada. O resultado “Ybus mal condicionada”, Tabela 3.15, encontrado na saída da linha entre os barramentos 25 e 26, deve-se ao fato que ocorreu um isolamento da barra 26 no sistema. Os testes foram efetuados para fator de carga igual a 1,4 , pois apresenta margem positiva de reativos na curva QV.

Tabela 3.15 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa de potência reativa para o sistema com 30 barramentos.

Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico	Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico
1-2	<b>Instável</b>	10-22	Estável
1-3	Estável	12-13	Estável
2-4	Estável	12-14	Estável
2-5	Estável	12-15	Estável

2-6	Estável	12-16	Estável
3-4	Estável	14-15	Estável
4-6	Estável	15-18	Estável
4-12	Estável	15-23	Estável
5-7	Estável	16-17	Estável
6-7	Estável	18-19	Estável
6-8	Estável	19-20	Estável
6-9	Estável	21-22	Estável
6-10	Estável	22-24	Estável
6-28	Estável	23-24	Estável
8-28	Estável	24-25	Estável
9-10	Estável	25-26	<b>Ybus mal condicionada</b>
9-11	Estável	25-27	Estável
10-17	Estável	27-29	Estável
10-20	Estável	27-30	Estável
10-21	Estável	28-27	Estável
29-30	Estável		

Como ações corretivas as tensões terminais dos geradores no sistema com 30 barramentos foram elevadas gradativamente respeitando o passo de 0,01 [p.u.] de tensão obedecendo ao limite máximo de tensão igual a 1,08 [p.u.]. Não foi obtida nenhuma estabilidade dinâmica durante a saída da linha de transmissão entre os barramentos 1 e 2 com estas ações corretivas e isto faz com que a metodologia de trabalho para provar a hipótese não seja aplicada no sistema com 30 barramentos. Este tipo de situação não é uma falha da metodologia e sim apenas uma situação onde a metodologia não pode ser aplicada.

#### 4.5 Sistema sul sudeste com 65 barramentos

Um aumento de 10% no carregamento faz com que o sistema sul sudeste apresente margem positiva de potência reativa na curva QV. Os resultados das simulações dinâmicas estão indicados na Tabela 3.16, onde linhas próximas dos geradores com margem negativa de potência reativa na curva QV são consideradas.

Tabela 3.16 Comportamento dinâmico considerando o sistema com margem negativa para o sistema sul sudeste.

Saída de LT entre as barras	Comportamento dinâmico
10-7 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações
10-7 circuito 2	Atingiu o número máximo de iterações
39-10 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações
39-10 circuito 2	Atingiu o número máximo de iterações

33-47 circuito 1	Atingiu o número máximo de iterações
33-47 circuito 2	Atingiu o número máximo de iterações
38-47	Atingiu o número máximo de iterações
38-61	Atingiu o número máximo de iterações
56-57	Atingiu o número máximo de iterações
57-59	Atingiu o número máximo de iterações
57-61	Atingiu o número máximo de iterações
59-51	Atingiu o número máximo de iterações

As ações corretivas mantiveram o mesmo padrão dos testes anteriores onde as tensões dos geradores foram elevadas gradativamente por passos de 0,01 [p.u.] de tensão. Os resultados das simulações dinâmicas estão representados na Tabela 3.17.

Por meio da Tabela 3.17, o caso 4 apresentou mais resultados com estabilidade dinâmica. Entretanto, apenas as simulações referentes aos circuitos LT10-7, LT33-47 e LT 57-59 apresentaram resultados sem problemas de sobretensão ou alguma violação de limites operativos das máquinas geradoras. As saídas das LT's 39-10, circuitos 1 e 2, e LT 38-61 apresentaram resultados estáveis, porém, com grande oscilação eletromecânica de seus geradores.

Assim como ocorreram nos sistemas com 5 e 9 barramentos, a simples mudança da tensão das máquinas geradoras permitiu que o sistema suportasse o distúrbio dinâmico. A Tabela 3.18 indica que estas alterações permitiram que o sistema Sul-Sudeste apresentasse margem negativa de reativos na curva QV.

Tabela 3.17 Comportamento dinâmico no sistema sul sudeste considerando as ações corretivas

Tensões	Comportamento dinâmico estável
$V_1 = 1,01[p. u.]; V_2 = 1,02[p. u.]; V_3 = 1,01[p. u.]$ $V_{17} = 1,01[p. u.]; V_{18} = 1,03[p. u.]; V_{19} = 1,02[p. u.]$ $V_{20} = 1,02[p. u.]; V_{26} = 1,03[p. u.]; V_{29} = 1,04[p. u.]$ $V_{30} = 1,04[p. u.]; V_{31} = 1,04[p. u.]; V_{43} = 1,05[p. u.]$ $V_{44} = 1,04[p. u.]; V_{45} = 1,04[p. u.]; V_{46} = 1,04[p. u.]$ (Caso 1)	LT 33-47 circuito 1; LT 33-47 circuito 2; LT 57-59
$V_1 = 1,02[p. u.]; V_2 = 1,03[p. u.]; V_3 = 1,02[p. u.]$ $V_{17} = 1,02[p. u.]; V_{18} = 1,04[p. u.]; V_{19} = 1,03[p. u.]$ $V_{20} = 1,03[p. u.]; V_{26} = 1,04[p. u.]; V_{29} = 1,05[p. u.]$ $V_{30} = 1,05[p. u.]; V_{31} = 1,05[p. u.]; V_{43} = 1,06[p. u.]$ $V_{44} = 1,05[p. u.]; V_{45} = 1,05[p. u.]; V_{46} = 1,05[p. u.]$ (Caso 2)	LT 10-7 circuito 1; LT 10-7 circuito 2; LT 33-47 circuito 1; LT 33-47 circuito 2; LT 57-59
$V_1 = 1,03[p. u.]; V_2 = 1,04[p. u.]; V_3 = 1,03[p. u.]$ $V_{17} = 1,03[p. u.]; V_{18} = 1,05[p. u.]; V_{19} = 1,04[p. u.]$	LT 10-7 circuito 1; LT 10-7 circuito 2;

$V_{20} = 1,04[p. u.]; V_{26} = 1,05[p. u.]; V_{29} = 1,06[p. u.]$ $V_{30} = 1,06[p. u.]; V_{31} = 1,06[p. u.]; V_{43} = 1,07[p. u.]$ $V_{44} = 1,06[p. u.]; V_{45} = 1,06[p. u.]; V_{46} = 1,06[p. u.]$ (Caso 3)	LT 33-47 circuito 1; LT 33-47 circuito 2; LT 38-61; LT 57-59
$V_1 = 1,04[p. u.]; V_2 = 1,05[p. u.]; V_3 = 1,04[p. u.]$ $V_{17} = 1,04[p. u.]; V_{18} = 1,06[p. u.]; V_{19} = 1,05[p. u.]$ $V_{20} = 1,05[p. u.]; V_{26} = 1,06[p. u.]; V_{29} = 1,07[p. u.]$ $V_{30} = 1,07[p. u.]; V_{31} = 1,07[p. u.]; V_{43} = 1,08[p. u.]$ $V_{44} = 1,07[p. u.]; V_{45} = 1,07[p. u.]; V_{46} = 1,07[p. u.]$ (Caso 4)	LT 10-7 circuitos 1 e 2; LT 39-10 circuitos 1 e 2; LT 33-47 circuitos 1 e 2; LT 38-61; LT 57-59;

Tabela 3.18 Relação da curva QV com fator de carga igual 1,1, sistema com Sul-Sudeste com ações corretivas

Gerador	Margem da curva QV	Gerador	Margem da curva QV
1	-12,7274	29	-3,5104
2	-6,1718	30	-5,8708
3	-3,7049	31	-7,6724
17	-9,3312	43	-3,8464
18	-5,424	44	-4,4776
19	-8,3128	45	-2,374
20	-11,4056	46	-8,2154
26	-13,2723		

Com os resultados das Tabelas anteriores, pode-se agora responder às questões levantadas pela hipótese: o sistema elétrico de potência tem maiores chances de suportar um distúrbio dinâmico se apresentar margens mais negativas de potência reativa na curva QV.

Os resultados apresentados no presente capítulo motivam a criação de um algoritmo que permita a mudança de margem da curva QV. E tal motivação é a preocupação do próximo capítulo.

---

## **CAPÍTULO 4: Proposta de mudança da margem da curva QV utilizando lógica *fuzzy***

O capítulo anterior demonstrou que é possível obter estabilidade dinâmica com a mudança do tipo de margem de potência reativa da curva QV. Mais especificamente, foi notado que um sistema se comporta dinamicamente melhor quando os seus geradores apresentam margens negativas na curva QV e que para um mesmo conjunto de cargas a serem supridas, um sistema pode apresentar margens positivas e negativas da curva QV.

Entretanto, o processo não está padronizado, pois a busca da estabilidade apresentada no capítulo anterior está baseada no aumento gradativo do nível de tensão das barras geradoras. Sem dúvidas, o operador do sistema elétrico necessita de algo que seja mais rápido, e este é o objetivo do presente capítulo.

Escolheu-se a lógica *fuzzy* para realizar esta migração entre os tipos de margens da curva QV. Um breve estudo da sua utilização na literatura foi realizado no Capítulo 1, onde foi demonstrada a sua eficiência em redespachos de potência reativa em sistemas elétricos de potência. Isto torna esta ferramenta atraente e útil para o contexto de análise.

A metodologia apresentada nas seções seguintes monitora e altera a margem de potência reativa da curva QV com a ajuda da lógica *fuzzy*.

### **4.1 Conceitos básicos sobre lógica *fuzzy***

A idéia básica por trás da lógica *fuzzy* em sistemas de controle é integrar o conhecimento de um agente humano na concepção de um processo de controle cuja relação entre a entrada e saída é descrita por um conjunto de regras *fuzzy* (por exemplo, as regras IF-THEN) envolvendo variáveis linguísticas, ao invés de um modelo dinâmico complicado. Em relação às técnicas convencionais de controle, o controle de lógica *fuzzy* é melhor utilizado em processos complexos e mal definidos que podem ser controlados por um agente humano qualificado sem muito conhecimento de sua dinâmica interna.

Uma arquitetura típica do controle de lógica *fuzzy* é retratada na Figura 4.1 composta por quatro blocos principais: fuzzificador, máquina de inferência, defuzzificador e planta do processo. A fuzzificação transforma os dados medidos em valores linguísticos adequados. A base de regras *fuzzy* armazena o conhecimento empírico do funcionamento do processo de especialistas. O motor de inferência é o núcleo do controlador *fuzzy*, uma vez que

---

pode emular tomada de decisão humana para alcançar uma estratégia de controle desejado. O bloco defuzzificador transforma a decisão da máquina de inferência em uma ação de controle não *fuzzy* para ser utilizada na planta do processo.

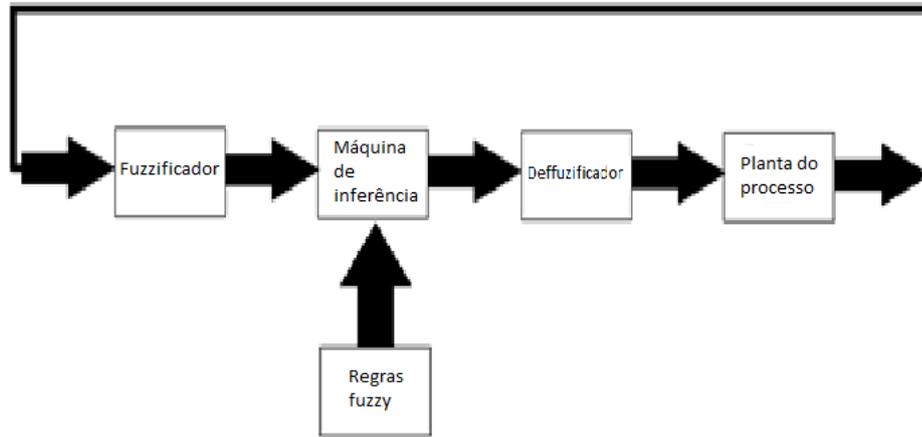


Figura 4.1 Blocos principais que compõem a lógica *fuzzy*

#### **4.2 Metodologia para aumentar a margem de potência reativa.**

A metodologia é considerada no contexto de operação de sistemas elétricos de potência. Desta forma, não se pretende inserir novos equipamentos nos sistemas analisados e apenas utilizar o que está disponível respeitando sempre os limites operativos.

A ideia é monitorar a margem de potência reativa e tomar medidas para mantê-la negativa, uma vez que a margem de potência reativa positiva pode produzir instabilidade dinâmica. A lógica *fuzzy* é utilizada para realizar redespachos de potência reativa de um conjunto de geradores, conforme indicados nas seguintes subseções.

##### *4.2.1 Testes preliminares*

Os testes preliminares têm como objetivo estudar o comportamento da margem da curva QV para um conjunto de geradores. O redespacho de potência reativa deve acontecer para um conjunto de geradores, pois caso seja efetuado o redespacho em apenas uma máquina, o operador do sistema estaria apenas “caminhando em cima da própria curva QV da máquina”, o que não satisfaz o desejo de mudança do tipo de margem da curva QV.

Os testes preliminares se baseiam nos seguintes passos:

1. Todos os geradores com margem positiva de potência reativa da curva QV se tornam barramentos do tipo PQ;

---

2. Após o passo 1, um pequeno aumento positivo na geração de energia reativa (0,1 pu) é aplicado aos geradores com margem positiva. O fluxo de potência é executado a fim de se calcular os níveis de tensão desses novos "barramentos PQ's". Em seguida, a margem de potência reativa da curva QV é calculada novamente;

3. Após o passo 1, uma pequena diminuição na geração de energia reativa (0,1 pu) é aplicada aos geradores com margem positiva. O fluxo de potência é executado a fim de se calcular os níveis de tensão desses novos "barramentos PQ's". Em seguida, a margem de potência reativa da curva QV é calculada novamente.

O capítulo anterior excluiu os sistemas com 14 e 30 barramentos, pois os mesmos necessitavam de uma alta compensação de potência reativa para que os respectivos geradores pertencentes a estes sistemas pudessem trabalhar dentro dos limites operativos.

Desta forma, os testes preliminares da presente seção são executados apenas para os sistemas com 5 e 9 barramentos e o sistema brasileiro real. Estes testes mostraram que o redespacho positivo de potência reativa gera margens negativas de potência reativa na curva QV para os sistemas com 5 e 9 barramentos, enquanto uma margem negativa é alcançada quando o redespacho é negativo para o sistema brasileiro real.

Uma investigação mais aprofundada demonstrou que um aumento da margem negativa de potência reativa no sistema de 5 barramentos exigiu um aumento do nível de tensão no barramento 2 e uma diminuição da potência reativa gerada na barra 1. Por outro lado, um aumento da margem negativa de potência reativa no sistema com 9 barras resulta em um aumento da potência reativa gerada nas máquinas 2 e 3 e uma absorção de potência reativa no gerador 1. Finalmente, para o sistema real brasileiro, uma margem negativa é alcançada quando os geradores com margem positiva reduzem a sua geração de potência reativa e outros geradores com margem negativa aumentam a sua geração de energia reativa.

Estes resultados mostram que cada sistema se comporta de maneira diferente no que diz respeito à potência reativa e controle do nível de tensão. Isto impõe uma complexidade que deve ser considerada no problema aqui estudado, de modo que as regras *fuzzy* propostas devem levar isso em consideração. A próxima seção descreve a lógica *fuzzy* utilizada para realizar o redespacho de potência reativa.

---

#### 4.2.2 Redespacho de potência reativa por lógica fuzzy

A subseção anterior indicou se um conjunto de geradores deve tomar um redespacho positivo ou negativo de potência reativa a fim de se tornar a sua margem de potência reativa da curva QV mais negativa.

Esta subseção calcula, usando lógica *fuzzy*, o módulo de potência reativa que será utilizado no redespacho. Os passos são descritos a seguir:

1. Um grupo de geradores é escolhido para realizar o redespacho de potência reativa de acordo com a sensibilidade entre o nível de tensão e a potência reativa injetada. Os geradores selecionados são os que têm uma margem de potência reativa positiva e localizadas na região estável da curva QV. A sensibilidade entre o nível de tensão e a potência reativa injetada é descrita pelo vetor tangente. Um vetor tangente de um barramento com valor positivo significa que o gerador analisado encontra-se na região estável da curva QV. Uma relação negativa, por sua vez, indica que o gerador analisado pertence à região instável da curva QV.

2. A lógica *fuzzy* é usada para calcular o redespacho de potência reativa e apresenta como variáveis de entrada o vetor tangente  $\Delta V_i / \Delta Q_i$  e a margem de potência reativa na curva QV;

3. Os geradores selecionados se tornam barramentos do tipo PQ e valores de redespacho de potência reativa são considerados, a fim de obter o nível de tensão correspondente;

4. Para este ponto de funcionamento, os novos valores de margem QV são calculados;

5. Em seguida, a simulação dinâmica é realizada, de modo a avaliar a estabilidade dinâmica do sistema sob os efeitos das ações de controle mencionadas.

Os passos acima podem ser repetidos mais uma vez, a fim de melhorar as condições de operação do sistema analisado. O processo termina quando se atinge os limites de tensão ou a margem da curva QV torna-se negativa para os geradores selecionados.

Caso o sistema apresente apenas dois geradores, os passos 1, 2 e 3 são aplicados a máquina que não é referência angular do sistema. Como a metodologia deve atuar em um conjunto de máquinas a fim de se obter a margem do tipo negativa na curva QV, para o caso com apenas dois geradores, o gerador swing receberá o mesmo nível de tensão calculado nos

passos de 1 a 3. Os passos restantes, 4 e 5, são executados normalmente assim como a repetição do processo quando possível. Esta exceção permite a aplicação da metodologia em sistemas com apenas dois geradores.

As regras de lógica *fuzzy* estão definidas na Tabela 4.1 e a representação de variáveis de entrada e de saída são mostradas nas Figuras 4.2 a 4.4.

Tabela 4.1 Regras *fuzzy*

Regras	Valores de entrada <i>fuzzy</i>		Saída <i>fuzzy</i>
	Vetor tangente	Margem da curva QV	Redespacho de potência reativa
1	Pequeno	Pequena	Médio
2	Pequeno	Médio	Grande
3	Pequeno	Grande	Grande
4	Médio	Pequena	Pequeno
5	Médio	Médio	Médio
6	Médio	Grande	Médio
7	Grande	Pequena	Pequeno
8	Grande	Médio	Médio
9	Grande	Grande	Médio

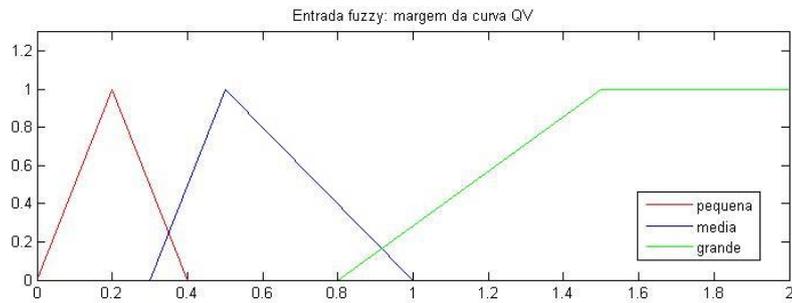


Figura 4.2 Entrada da lógica *fuzzy* como margem da curva QV

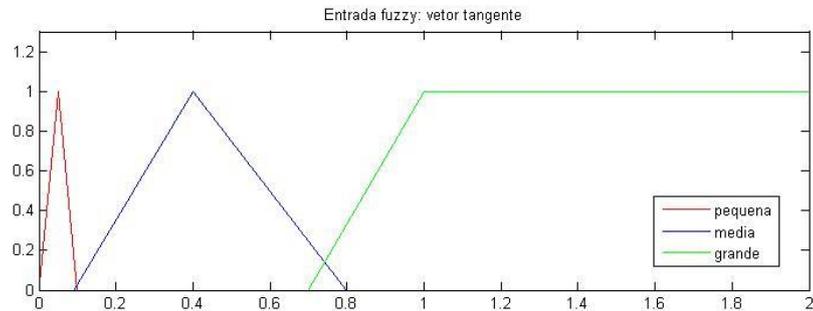


Figura 4.3 Entrada da lógica *fuzzy* como vetor tangente

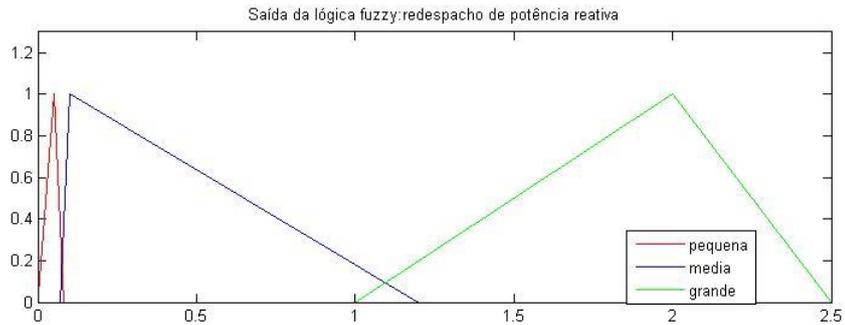


Figura 4.4 Saída da lógica *fuzzy* como redespacho de potência reativa

As regras *fuzzy* foram criadas baseadas em observações dos valores dos vetores tangentes na condição com margem positiva e o quanto de potência reativa é necessário para que ocorra a mudança da margem de potência reativa da curva QV.

Os vetores tangentes apresentaram valores com ordens de grandeza diferentes para os sistemas com 5 e 9 barramentos e o sistema sul sudeste, quando é encontrada a margem positiva de potência reativa na curva QV, conforme está indicado na Tabela 4.2. A Tabela 4.2 também permite concluir que estes sistemas estão localizados na região estável da curva QV, pois apresentaram valores positivos.

Tabela 4.2 Vetores tangentes para diversos sistemas quando é encontrada a margem negativa de potência reativa

Sistema com 5 barramentos	
Gerador	Vetor Tangente
#2	0.3379
Sistema com 9 barramentos	
Gerador	Vetor Tangente
#2	0.9815
#3	0.8910
Sistema sul sudeste	
Gerador	Vetor Tangente
#3	0.0475
#31	0.0123
#43	0.0181
#44	0.0223

---

Como se pretende realizar redespachos de potência reativa por meio da lógica *fuzzy*, os testes preliminares desempenharam um papel importante secundário que é o de indicar o quão sensível é aquele grupo de geradores frente à potência reativa despachada.

Além disso, uma observação complementar foi extraída a partir do Capítulo 3, onde é possível detectar o valor da potência reativa gerada quando as máquinas estavam operando com margens positivas e negativas.

Todas estas observações e análises de valores ajudaram a construir as funções de pertinências indicadas pelas Figuras 4.2 a 4.4.

---

## CAPÍTULO 5: Resultados da proposta de mudança da margem da curva QV utilizando lógica *fuzzy*

Este capítulo tem como objetivo testar a metodologia proposta no Capítulo 4 para os sistemas com 5 e 9 barramentos, e o sistema Sul-Sudeste brasileiro. Para os demais sistemas, a proposta de trabalho não será utilizada devido a exigência de uma alta compensação de potência reativa, conforme indicado no Capítulo 3.

### 5.1 Sistema com 5 barramentos

Para o sistema com 5 barramentos, o fator de carga que produz uma margem positiva de potência reativa na curva QV é igual a 1,5 . Para este fator de carga, o vetor tangente  $\Delta V_2/\Delta Q_2$  e a margem de potência reativa da curva QV na máquina 2 são iguais a 0,3379 e +0,1004 [p.u.], respectivamente. A lógica *fuzzy*, quando utilizada para estes valores, obtém um redespacho de potência reativa no valor de 0,0429 [p.u.]. Isto eleva o nível de tensão do barramento 2 para o valor de 1,0395 [p.u.]. A tensão do barramento 1 também é alterada para 1,0395 [p.u.], porque este sistema tem apenas duas máquinas geradoras.

Estas alterações resultaram na nova margem de potência reativa da curva QV e resposta dinâmica apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 Margem da curva QV, sistema com 5 barramentos, primeira aplicação da metodologia

Fator de carga [p.u.]	Margem da curva QV [p.u.]	
	Gerador 1	Gerador 2
1.5	-0.5815	+0.0413

Tabela 5.2 Resposta dinâmica, sistema com 5 barramentos, primeira aplicação da metodologia

Retirada de linha de transmissão entre os barramentos	Comportamento dinâmico
1-3	Estável
2-4	Sem ponto de operação

3-4 circuito 1	Estável
3-4 circuito 2	Estável
3-5 circuito 1	Estável
3-5 circuito 2	Estável

Note-se que, em comparação com a Tabela 3.7, uma margem mais negativa de potência reativa resultou em uma melhor resposta dinâmica quando contingências são consideradas. O termo “sem ponto de operação” contido na Tabela 5.1 significa que a simulação dinâmica resultou um ponto de operação instável. Além disso, a Tabela 5.1 demonstra que a margem QV do gerador de 2 ainda é positiva, o que resulta em uma segunda aplicação da metodologia.

A segunda aplicação desta metodologia resultou em um valor de redespacho de 0,0483 [p.u.] que somado ao valor anterior de 0,0429 [p.u.] resultou em níveis de tensão para geradores 1 e 2 iguais 1,0549 [p.u.]. Os resultados para a segunda aplicação da metodologia no sistema com 5 barramentos estão indicados nas Tabelas 5.3 e 5.4, onde é constatada uma margem de potência reativa mais negativa em relação a primeira aplicação da metodologia. Além disso, as Figuras 5.1 e 5.2 ilustram, para a contingência entre as barras 1 e 3, o perfil de tensão dinâmico quando se efetua a primeira e segunda aplicação da metodologia, respectivamente. Comparando estas duas figuras, é fácil observar um melhor perfil de tensão quando a segunda metodologia é aplicada. Esta melhora também foi observada para as demais contingências indicadas nas Tabelas 5.2 e 5.4.

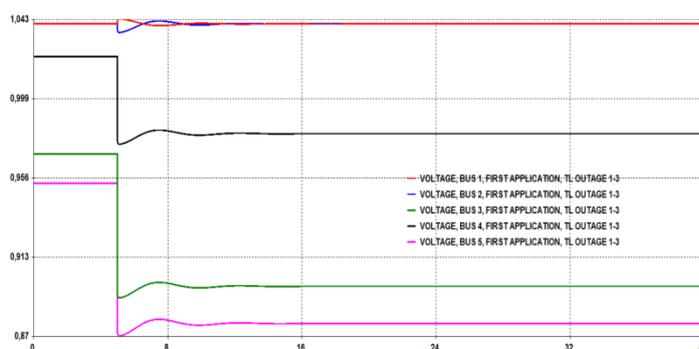


Figura 5-1 Nível de tensão no sistema com 5 barramentos depois da primeira aplicação da metodologia considerando a contingência entre as barras 1 e 3

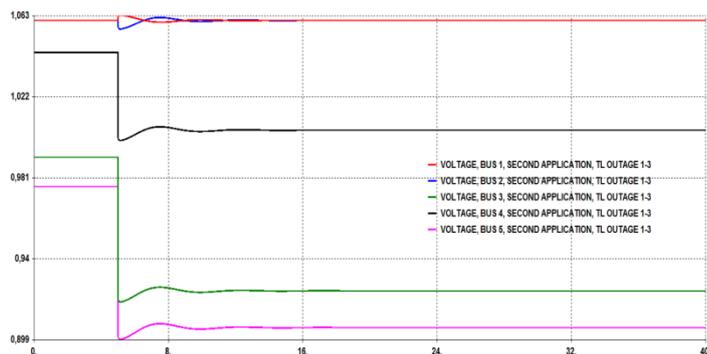


Figura 5.2 Nível de tensão no sistema com 5 barramentos depois da segunda aplicação da metodologia considerando a contingência entre as barras 1 e 3

Tabela 5.3 Margem da curva QV, sistema com 5 barramentos, segunda aplicação da metodologia

Fator de carga	Margem da curva QV [p.u.]	
	Gerador 1	Gerador 2
1,5	-0,6182	-0,0302

Tabela 5.4 Resposta dinâmica, sistema com 5 barramentos, segunda aplicação da metodologia

Retirada de linha de transmissão entre os barramentos	Comportamento dinâmico
1-3	Estável
2-4	Sem ponto de operação
3-4 circuito 1	Estável
3-4 circuito 2	Estável
3-5 circuito 1	Estável
3-5 circuito 2	Estável

## 6.2 Sistema com 9 barramentos

O sistema com 9 barramentos apresentou margem positiva de potência reativa na curva QV para o fator de carga igual a 1,4. O redespacho, calculado por meio da lógica *fuzzy*, resultou nos valores de 0,4820 [p.u.] e 0,0432 [p.u.], respectivamente, para os geradores 2 e 3. O redespacho calculado para a máquina 2 produziu uma geração de potência que viola o seu limite de geração, então a máquina é fixada a gerar no seu valor limite. As tensões obtidas por meio do redespacho valem 1,1198 [p.u.] e 1,0994 [p.u.], respectivamente, para as máquinas 2

e 3. As margens de potência reativa para estes novos valores de tensão são mostradas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Margem da curva QV, sistema com 9 barramentos, primeira aplicação da metodologia

Fator de carga	Margem da curva QV [p.u.]		
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
1,4	+0,0735	+0,4393	+0,1179

A simulação dinâmica considerando a retirada da linha de transmissão entre barramentos 6 e 4 para a condição apresentada na Tabela 5.5 é estável dinamicamente. No entanto, a máquina 2, após a simulação dinâmica, está gerando 3 MVAR acima do seu limite de potência reativa, o que deve ser corrigido.

Como as margens contidas na Tabela 5.5 ainda são positivas e existe violação de limite de geração de potência reativa, a metodologia deve ser aplicada novamente para o sistema. A segunda aplicação da lógica *fuzzy* resultou em um redespacho de potência reativa igual a 0,0434 [p.u.] para a máquina 3 e tensão de valores iguais a 1,1335 p.u. e 1,1178 p.u., respectivamente, para os barramentos 2 e 3. Os novos valores da margem de QV para a segunda aplicação da metodologia são apresentados na Tabela 5.6, onde todos os geradores estão operando dentro dos seus limites quando há uma saída de linha de transmissão entre os barramentos 6 e 4.

Embora os geradores estejam operando dentro dos seus limites de geração de potência reativa, o sistema com 9 barramentos apresentou um alto nível de tensão que não é aceitável para operação em sistemas elétricos reais. Esta crítica permite concluir que a metodologia baseada em lógica *fuzzy* consegue resolver os problemas dinâmicos, mas apresenta como deficiência a exigência de um maior nível de tensão para se obter margem negativa na curva QV.

Tabela 5.6 Margem da curva QV, sistema com 9 barramentos, segunda aplicação da metodologia

Fator de carga	Margem da curva QV [p.u.]		
	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3

1.4	-0,0260	+0,4423	+0,1198
-----	---------	---------	---------

Após a metodologia baseada em lógica *fuzzy* ser testada em dois sistemas pequenos, de modo que os resultados possam ser facilmente visualizados, ela foi aplicada a um sistema real, onde condições operacionais reais são consideradas.

### 6.3 Sistema real brasileiro

O sistema real empregado apresenta 65 barramentos e 96 linhas de transmissão. Os resultados, após a aplicação da metodologia baseada em lógica *fuzzy*, estão apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.9 e nas Figuras 5.3 e 5.4. Nas Figuras 5.3 e 5.4, para a mesma contingência, as linhas contínuas representam o comportamento dinâmico com a aplicação da metodologia e as linhas tracejadas representam o comportamento dinâmico sem a aplicação da metodologia. Observe a existência da instabilidade dinâmica (linhas tracejadas), onde o programa interrompe a simulação precocemente.

Tabela 5.7 Margem da curva QV, sistema real brasileiro após a aplicação da metodologia

Fator de carga	Margem da curva QV [p.u.]				
	Gerador 3	Gerador 29	Gerador 31	Gerador 43	Gerador 44
1,1	-0,5007	-2,7707	-4,6835	-1,1157	-2,1574

Tabela 5.8 Níveis de tensão, sistema real brasileiro após a aplicação da metodologia

Nível de tensão [p.u.]	Gerador 3	Gerador 29	Gerador 31	Gerador 43	Gerador 44
	1,0796	1,0300*	1,0485	1,1000	1,0699

\*observação: sem mudança após aplicação da metodologia porque o gerador 29 é barramento swing.

Tabela 5.9 Resposta dinâmica após aplicação da metodologia, sistema real brasileiro

Retirada de linha de transmissão entre os barramentos	Comportamento dinâmico
10-7 circuito 1	Estável

10-7 circuito 2	Estável
33-47 circuito 1	Estável
33-47 circuito 2	Estável
57-59	Estável

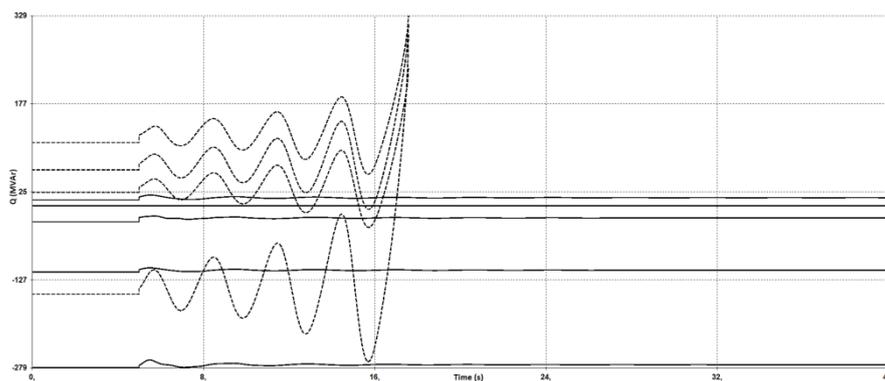


Figura 5.3 Potência reativa gerada das máquinas selecionadas para ambos os tipos de margem na curva QV considerando a contingência 33-47 circuito 1.

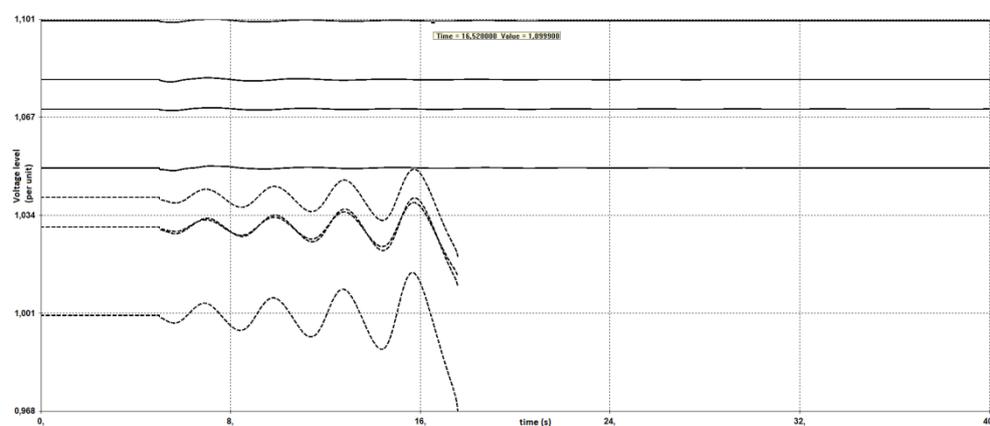


Figura 5.4 Tensões terminais das máquinas selecionadas para ambos os tipos de margens considerando a contingência 33-47 circuito 1.

A Tabela 5.6 indica que os geradores que anteriormente tinham margens positivas em curvas QV obtiveram, após a aplicação da metodologia, margens negativas. Como nos sistemas de teste anteriores, uma margem mais negativa de potência reativa na curva QV significa melhores resultados dinâmicos. Na Tabela 5.8, algumas contingências anteriormente indicadas no Capítulo 3 como pontos operativos inexistentes tornaram-se pontos de operação factíveis após a aplicação da metodologia. As outras contingências não apresentados na

---

Tabela 5.9 apresentaram respostas dinâmicas classificadas como "nenhum ponto operacional" ou "estável com grande oscilação de potência reativa".

As Figuras 5.3 e 5.4 comparam o comportamento dinâmico do sistema para ambos os tipos de margens considerando a retirada da linha de transmissão entre os barramentos 33-47 circuito 1. É observada a ocorrência de instabilidade quando a margem da curva QV é positiva. Curvas semelhantes podem ser obtidas para as outras contingências indicadas na Tabela 5.9.

Uma investigação mais profunda foi conduzida e concluiu-se novamente que uma margem mais negativa em uma curva QV está associada com um aumento no nível de tensão de funcionamento dos geradores selecionados. Como os limites de tensão de operação são respeitados em todas as simulações, a limitação do nível de tensão também significa uma limitação do método proposto.

As outras contingências que não estão listadas na Tabela 5.8 podem ser resolvidas se for permitido o aumento dos limites de tensão de operação das máquinas selecionadas ou por meio da instalação de equipamentos fornecedores de potência reativa no sistema. Também pode ser considerado, como medida para solucionar esta limitação, a utilização da metodologia com outras medidas de controle já propostas na literatura.

Por fim, os resultados apresentados indicam um deslocamento do ponto operativo da curva QV em um contexto diferente daquele apresentado em [70]. Apenas para recordar, em [70] é proposta a mudança do ponto operativo mantendo-se o mesmo tipo de margem da curva QV, positiva ou negativa, e o trabalho de Tese aqui apresentado pretendeu mudar o tipo de margem. Um trabalho futuro, como exemplo, segue a sugestão de analisar sistemas com margens positivas da curva QV e que também estejam na região instável de operação (ponto B da Figura 2.2). Tal situação usaria a metodologia desenvolvida em [70] em um primeiro momento para levar o sistema para a região estável da curva QV (ponto A da Figura 2.2) com a margem positiva e em seguida a técnica *fuzzy* apresentada neste trabalho de tese para se evitar contingências dinâmicas que levem à instabilidade.

---

## CAPÍTULO 6: Considerações finais

O suporte de potência reativa de um gerador em SEP pode ser indicado pela margem de potência reativa da curva QV. Esta margem apresenta valores positivos ou negativos e qual tipo de margem é mais benéfica para um sistema na iminência da ocorrência de um distúrbio dinâmico foi questionado.

Assim, durante o desenvolvimento do trabalho, foram levantadas duas hipóteses, que são novamente reescritas a seguir:

- Qual é a relação entre o tipo de margem da curva QV e o seu comportamento dinâmico em um SEP?
- Uma simulação dinâmica instável pode ser evitada baseada no conhecimento prévio do tipo de margem da curva QV? Se sim, como propor ações de controle para evitar instabilidades dinâmicas em um SEP?

A primeira hipótese questionou qual o melhor tipo de margem para um sistema elétrico operar na ocorrência de uma contingência dinâmica. As Tabelas 3.1 a 3.5 demonstraram que à medida que um sistema aumenta a sua carga elétrica, a sua margem de potência reativa da curva QV diminui ao ponto de se tornar positiva. Como questões de instabilidade de tensão estão relacionadas com o aumento da potência suprida do sistema, e conseqüentemente, com o suporte de potência reativa das máquinas elétricas, é intuitivo afirmar que uma menor margem na curva QV poderia fornecer um indicativo de maior proximidade de instabilidade.

Com esta visão, o Capítulo 3 analisou o comportamento de vários sistemas para ambos os tipos de margens da curva QV. Todas as análises foram iniciadas com a condição de margem negativa da curva QV, aumento da carga elétrica a ser suprida e monitoramento do tipo de margem da curva QV. Logo em seguida, geradores com margem positiva na curva QV foram submetidos a uma contingência simples como a saída de linhas de transmissão próximas. Os resultados demonstraram que instabilidade dinâmica está associada com a margem positiva da curva QV, pois ao longo do Capítulo 3 “pequenos ajustes” como a variação da tensão terminal das máquinas geradoras permitiram que geradores, antes com margem positiva, obtivessem uma margem negativa e estabilidade dinâmica, mantendo-se a mesma carga suprida.

---

Ainda com relação ao Capítulo 3, foi possível afirmar que sistemas elétricos devem operar de maneira preventiva com margem negativa em seus geradores, pois a iminência de ocorrência de um curto circuito nas linhas de transmissão próximas a este gerador pode levar a instabilidade dinâmica se a margem positiva da curva QV for mantida. Entretanto, no Capítulo 3 não é apresentado um método otimizado a fim de mudar o tipo de margem da curva QV e isto é a principal questão da segunda hipótese.

Sendo assim, o Capítulo 4 apresentou um método padronizado de mudança de tipo de margem baseado na lógica *fuzzy*. A lógica *fuzzy* é bem atrativa quando se trabalha com sistemas com dinâmicas complicadas e onde já se existe um conhecimento prévio da resposta requerida. As dinâmicas são complicadas pois a mudança do tipo de margem da curva QV não é algo simples e exige a atuação de um grupo de máquinas. Além disso, cada sistema se comporta de maneira única quando a relação redespacho de potência reativa e a sua influência na margem de potência reativa da curva QV é objetivo de busca (testes preliminares do Capítulo 4). Toda esta complexidade está representada pela lógica *fuzzy* proposta no Capítulo 4.

Os resultados da proposta *fuzzy* de mudança de margem da curva QV são apresentados no Capítulo 5. Alguns sistemas que exigiam uma alta compensação de potência reativa para se obter a margem negativa, indicados no Capítulo 3, não foram testados com a lógica *fuzzy* proposta, pois deseja-se obter uma margem negativa com os próprios recursos do sistema analisado. E isto é uma vantagem clara da proposta apresentada: levar o sistema para uma condição mais favorável de operação sem custo adicional como a instalação de novos equipamentos.

Os resultados do Capítulo 5 demonstraram a eficácia do método proposto e também demonstraram as suas limitações, pois foi visualizado que uma margem mais negativa de potência reativa da curva QV está associada com maior nível de tensão. A metodologia permitiu, por exemplo, que o sistema com 9 barramentos obtivesse estabilidade dinâmica quando a margem negativa da máquina 1 fosse obtida, mas também resultou em níveis de tensão inaceitáveis. Tal resultado permite declarar que em sistemas onde não existe uma distância razoável entre o nível operativo de tensão e o seu nível máximo de tensão permitido, a metodologia perde muito a sua eficácia. Nos sistemas com 5 barramentos e o sistema sul sudeste, a metodologia funcionou bem e obteve resultados satisfatórios.

---

Como o trabalho pretendeu-se alterar o tipo de margem utilizando os próprios recursos do sistema analisado, não é descartado como trabalho futuro analisar o comportamento da metodologia com outras propostas já publicadas na literatura. Muitos sistemas que exigiam uma alta compensação de potência reativa foram descartados nos testes do Capítulo 5, mas poderiam ser analisados caso outras ações de controle fossem implementadas em conjunto com a lógica *fuzzy*.

Por fim, vale destacar que a proposta *fuzzy* apresentada além de não exigir a instalação de novos equipamentos no SEP, também é fácil de ser implementada, pois exige que o operador do SEP apenas faça a coordenação correta no ajuste dos reguladores de tensão dos geradores presentes para evitar a ocorrência de margens positivas na curva QV.

---

## ANEXO A-Descrição dos modelos de geradores e reguladores utilizados

Esta seção descreverá os modelos dinâmicos retirados de [66] que foram utilizados no software ANATEM.

A associação dos modelos dinâmicos é feita por meio da função DMAQ no código do cartão de entrada para o programa ANATEM. Abaixo segue um exemplo de como é realizado para o sistema com 30 barramentos:

```
( ASSOCIAÇÃO DE MAQUINAS COM MODELOS
```

```
(=====
```

```
DMAQ
```

```
( Nb) Gr (P) (Q) Und ( Mg ) ( Mt )u( Mv )u( Me )u(Xvd)(Nbc)
```

```
1 10 2 21 22
```

```
2 10 2 21 22
```

```
5 10 2 21 22
```

```
8 10 2 21 22
```

```
11 10 2 21 22
```

```
13 10 2 21 22
```

```
999999
```

```
(
```

```
(=====
```

A indicação acima afirma que todos os geradores estão associados com o modelo de gerador, regulador de tensão e regulador de velocidade de números 2,21 e 22, respectivamente. Maiores detalhes estão contidos no Manual do programa [66].

### A.1 Modelo dinâmico de gerador

No software ANATEM, modelos de geradores predefinidos são habilitados por meio da função DMDG e escolhe-se o tipo empregado através da opção MDXX. Este trabalho escolheu-se utilizar o seguinte código para todas as máquinas rotativas:

```
( MODELOS DE GERADOR COM POLOS SALIENTES
```

```
(=====
```

```
DMDG MD02
```

```
(
```

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd) (L''d)(Ll )(T'd) (T''d)(T''q)
```

0002 0001 272. 260. 36. 26. 12. 8.5 0.03 0.9

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0002 3.84 5200.

(

999999

Para uma melhor visualização, as Figuras A.1 a A.3 ilustram os diagramas de oscilação eletromecânica, de equações de eixo em quadratura e de eixo direto para este modelo escolhido.

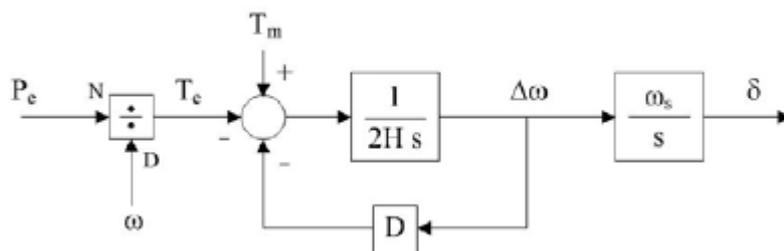


Figura A.1 Diagrama para a equação de oscilação eletromecânica

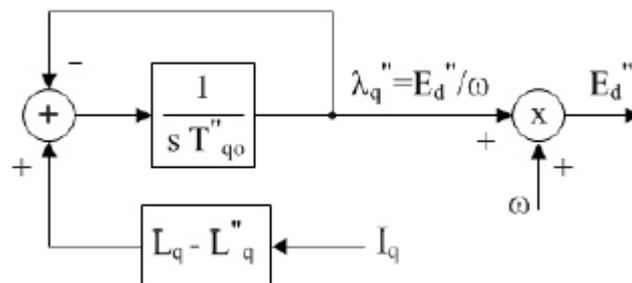


Figura A.2 Diagrama para as equações de eixo em quadratura



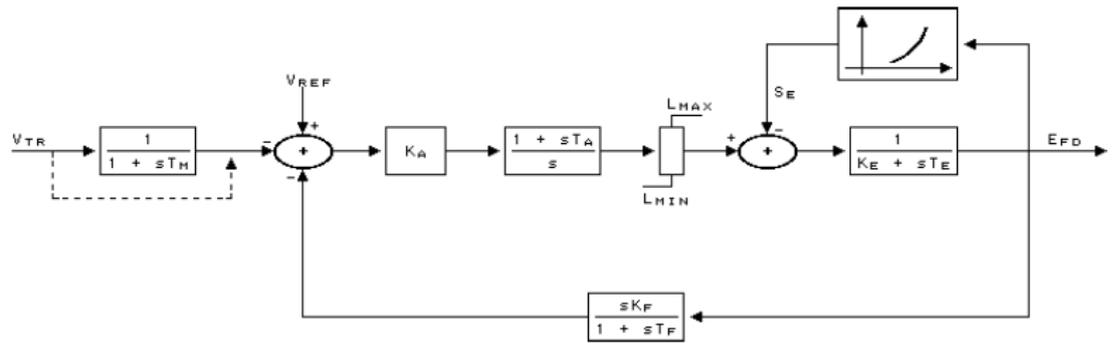


Figura A.4 Modelo predefinido de regulador de tensão

Diferentemente do modelo dinâmico da máquina síncrona, este modelo de regulador de tensão não está associado nenhuma curva de saturação, pois o campo (CS) do código acima não foi preenchido.

### A.3 Modelo dinâmico de regulador de velocidade

A Figura A.5 representa esquematicamente o modelo de regulador de velocidade.

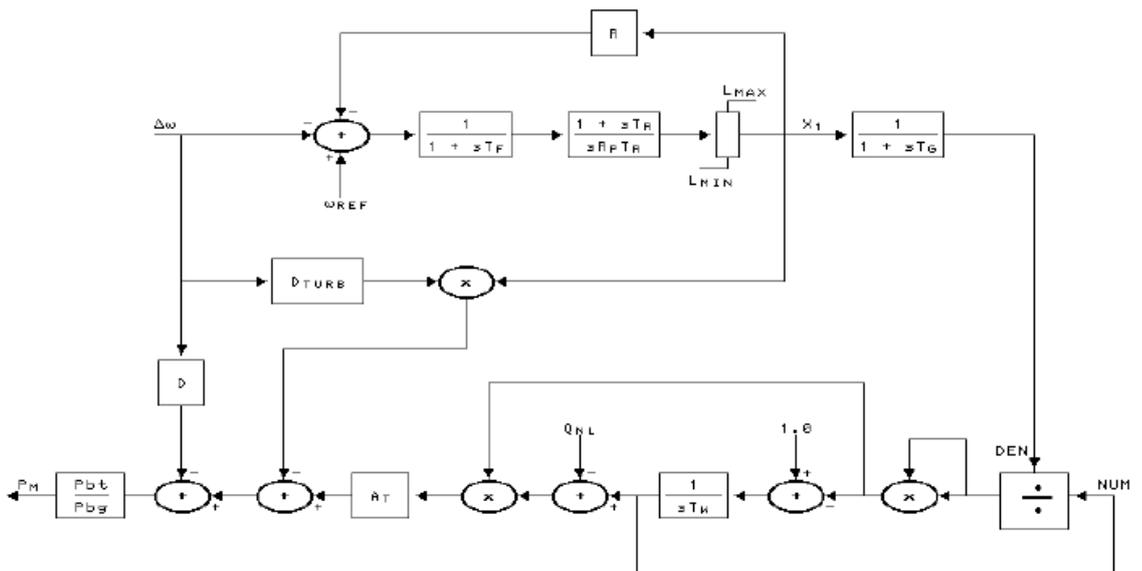


Figura A.5 Modelo predefinido de regulador de velocidade

Os seus dados estão contidos no seguinte código de execução:

DRGV MD01

(No) (R)(Rp)(At)(Qnl)(Tw)(Tr)(Tf)(Tg)(Lmn)(Lmx)(Dtb)(D)(Pbg)(Pbt)

0022 0.050.3811.0810.15 1.5 7.0 0.05 0.5 0.00.9840.352 1.0 465.465.

999999

Conforme se pode observar, este modelo de regulador de velocidade apresenta o número 22, o mesmo número utilizado dentro do campo (Mv) da função DMAQ.

## ANEXO B-Dados dos sistemas testes

Neste documento, a margem negativa de potência reativa da curva QV foi obtida quando se alteraram os valores de potência ativa, carga ativa e carga reativa do sistema utilizando as equações de B.1 a B.3, onde  $\lambda$  é o fator de carga.

$$P_{gerado} = P_{gerado} \times \lambda \quad (B.1)$$

$$P_{carga} = P_{carga} \times \lambda \quad (B.2)$$

$$Q_{gerado} = Q_{gerado} \times \lambda \quad (B.3)$$

Os dados dos sistemas simulados estão contidos nas Tabelas de B.1 a B.10. Todos os dados indicados correspondem ao fator de carga ( $\lambda$ ) unitário e estão em valores por unidade.

Tabela B.1 Dados de barramentos, sistema com 5 barramentos, fator de carga unitário.

Número do barramento	Tipo de barramento	Tensão terminal p.u.	Potência ativa gerada p.u.	Carga ativa p.u.	Limites de geração de potência reativa p.u.
1	Referência angular	1.0170∠0°	X	0.0	Sem limites
2	PV	1.0250∠3.66°	0.9	0.0	Sem limites
3	PQ	1.0060∠-3.40°	0.0	0.0	X
4	PQ	1.0140∠0.18°	0.0	0.0	X
5	PQ	1.00∠-9.50°	0.0	1.2	X

Tabela B.2 Dados de linhas de transmissão, sistema com 5 barramentos, fator de carga unitário.

Conexão entre os barramentos	Resistência p.u.	Reatância p.u.	Susceptância shunt total p.u.	Tap (1:t)	Barramento do tap
1-3	0.001	0.20	0.0	X	X
2-4	0.001	0.07	0.0	X	X
3-4	0.001	0.14	0.0	1.02	4
3-4	0.001	0.14	0.0	0.9	4

3-5	0.001	0.18	0.0	X	X
3-5	0.001	0.18	0.0	X	X

Tabela B.3 Dados de barramentos, sistema com 9 barramentos, fator de carga unitário.

Número do barramento	Tipo de barramento	Tensão terminal p.u.	Potência ativa gerada p.u.	Carga ativa p.u.	Carga reativa p.u.	Limites de geração de potência reativa máximo p.u.	Limites de geração de potência reativa mínimo p.u.
1	Referência angular	1,00∠0°	2,2275	0	0	1,08	-1,08
2	PV	1,00∠0°	1,728	0	0	0,84	-0,84
3	PV	1,00∠0°	1,152	0	0	0,56	-0,56
4	PQ	1,00∠0°	0	0	0	0	X
5	PQ	1,00∠0°	0	1,25	0,5	0	X
6	PQ	1,00∠0°	0	0,9	0,3	0	X
7	PQ	1,00∠0°	0	0	0	0	X
8	PQ	1,00∠0°	0	1	0,35	0	X
9	PQ	1,00∠0°	0	0	0	0	X

Tabela B.4 Dados de linhas de transmissão, sistema com 9 barramentos, fator de carga unitário.

Conexão entre os barramentos	Resistência p.u.	Reatância p.u.	Susceptância shunt total p.u.	Tap (1:t)	Barramento do tap
4-5	0,01	0,085	0,176	X	X
5-7	0,032	0,161	0,306	X	X
7-8	0,0085	0,072	0,149	X	X
8-9	0,0119	0,1008	0,209	X	X
9-6	0,039	0,17	0,358	X	X

6-4	0,017	0,092	0,158	X	X
1-4	0	0,0576	0	1,0	4
2-7	0	0,0625	0	1,0	7
3-9	0	0,0586	0	1,0	9

Tabela B.5 Dados de barramentos, sistema com 14 barramentos, fator de carga unitário.

Número do barramento	Tipo de barramento	Módulo do fasor de tensão terminal p.u.	Ângulo do fasor de tensão terminal graus	Potência ativa gerada p.u.	Carga ativa p.u.	Carga reativa p.u.	Limites de geração de potência reativa máximo p.u.	Limites de geração de potência reativa mínimo p.u.
1	Referência angular	1,06	0	2,324	0	0	X	X
2	PV	1,045	-5	1,66	0,217	0,127	0,5	-0,4
3	PV	1,01	-13	0	0,942	0,19	0,4	-999
4	PQ	1,019	-10	0	0,478	-0,039	X	X
5	PQ	1,02	-9	0	0,076	0,016		X
6	PV	1,07	-14	0	0,112	0,075	0,24	-0,06
7	PQ	1,062	-13	0	0	0	X	X
8	PV	1,09	-13	0	0	0	0,24	-0,06
9	PQ	1,0563	-15	0	0,295	0,166	X	X
10	PQ	1,0503	-15	0	0,09	0,058	X	X
11	PQ	1,0571	-15	0	0,035	0,018	X	X
12	PQ	1,0552	-15	0	0,061	0,016	X	X
13	PQ	1,0504	-15	0	0,135	0,058	X	X
14	PQ	1,0358	-16	0	0,149	0,05	X	X

Tabela B.6 Dados de linhas de transmissão, sistema com 14 barramentos, fator de carga unitário.

Conexão entre os barramentos		Resistência p.u.	Reatância p.u.	Susceptância shunt total p.u.	Tap (1:t)	Barramento do tap
1	2	0,0193	0,0591	0,0066	X	X
1	5	0,054	0,223	0,0061	X	X
2	3	0,0469	0,1979	0,00548	X	X
2	4	0,0581	0,1763	0,00467	X	X
2	5	0,0569	0,1738	0,00425	X	X
3	4	0,067	0,171	0,00433	X	X
4	5	0,0133	0,0421	0,0016	X	X
7	4	0,00	0,2091	0	0,978	4
9	4	0,00	0,5561	0	0,969	4
6	5	0,00	0,252	0	0,932	5
6	11	0,0949	0,1989	0	X	X
6	12	0,1229	0,2558	0	X	X
6	13	0,0661	0,1302	0	X	X
7	8	0	0,1761	0	X	X
7	9	0	0,11	0	X	X
9	10	0,0318	0,0845	0	X	X
9	14	0,1271	0,2703	0	X	X
10	11	0,082	0,192	0	X	X
12	13	0,2209	0,1998	0	X	X
13	14	0,1709	0,348	0	X	X

Tabela B.7 Dados de barramentos, sistema com 30 barramentos, fator de carga unitário.

Número do barramento	Tipo de barramento	Módulo do fasor de tensão terminal p.u.	Ângulo do fasor de tensão terminal graus	Potência ativa gerada p.u.	Carga ativa p.u.	Carga reativa p.u.	Limites de geração de potência reativa máximo p.u.	Limites de geração de potência reativa mínimo p.u.
1	Referência angular	1,06	0	2,602	0	0	X	X
2	PV	1,043	-5,5084	0,4	0,217	0,127	0,5	-0,4
3	PQ	1,0183	-7,9792	0	0,024	0,012	X	X
4	PQ	1,0089	-9,6338	0	0,076	0,016	X	X
5	PV	1,01	-14,4186	0	0,942	0,19	0,4	-0,4
6	PQ	1,0074	-11,3461	0	0	0	X	X
7	PQ	1,0007	-13,1363	0	0,228	0,109	X	X
8	PV	1,01	-12,1468	0	0,3	0,3	0,4	-0,1
9	PQ	1,0378	-14,3514	0	0	0	X	X
10	PQ	1,0197	-15,9564	0	0,058	0,02	X	X
11	PV	1,082	-14,3514	0	0	0	0,24	-0,06
12	PQ	1,049	-15,4903	0	0,112	0,075	X	X
13	PV	1,071	-15,4903	0	0	0	0,24	-0,06
14	PQ	1,0315	-16,3769	0	0,062	0,016	X	X
15	PQ	1,0246	-16,3946	0	0,082	0,025	X	X
16	PQ	1,0293	-15,9574	0	0,035	0,018	X	X
17	PQ	1,0171	-16,1689	0	0,09	0,058	X	X
18	PQ	1,0105	-16,9591	0	0,032	0,009	X	X
19	PQ	1,0053	-17,0978	0	0,095	0,034	X	X
20	PQ	1,0081	-16,8706	0	0,022	0,007	X	X

21	PQ	1,0071	-16,4078	0	0,175	0,112	X	X
22	PQ	1,0077	-16,3884	0	0	0	X	X
23	PQ	1,0089	-16,6856	0	0,032	0,016	X	X
24	PQ	0,9965	-16,7186	0	0,087	0,067	X	X
25	PQ	1	-16,4318	0	0	0	X	X
26	PQ	0,982	-16,8665	0	0,035	0,023	X	X
27	PQ	1,0109	-15,979	0	0	0	X	X
28	PQ	1,0035	-11,9764	0	0	0	X	X
29	PQ	0,9908	-17,2399	0	0,024	0,009	X	X
30	PQ	0,9791	-18,1457	0	0,106	0,019	X	X

Tabela B.8 Dados de linhas de transmissão, sistema com 30 barramentos, fator de carga unitário.

Conexão entre os barramentos		Resistência p.u.	Reatância p.u.	Susceptância shunt total p.u.	Tap (1:t)	Barramento do tap
1	2	0,0192	0,0575	0,0264	X	X
1	3	0,0452	0,1852	0,0204	X	X
2	4	0,057	0,1737	0,0184	X	X
3	4	0,0132	0,0379	0,0042	X	X
2	5	0,0472	0,1983	0,0209	X	X
2	6	0,0581	0,1763	0,0187	X	X
4	6	0,0119	0,0414	0,0045	X	X
5	7	0,046	0,116	0,0102	X	X
6	7	0,0267	0,082	0,0085	X	X
6	8	0,012	0,042	0,0045	X	X
6	9	0	0,208	0	0,978	9
6	10	0	0,556	0	0,969	10
9	11	0	0,208	0	X	X
9	10	0	0,11	0	X	X
4	12	0	0,256	0	0,932	12

12	13	0	0,14	0	X	X
12	14	0,1231	0,2559	0	X	X
12	15	0,0662	0,1304	0	X	X
12	16	0,0945	0,1987	0	X	X
14	15	0,221	0,1997	0	X	X
16	17	0,0824	0,1923	0	X	X
15	18	0,1073	0,2185	0	X	X
18	19	0,0639	0,1292	0	X	X
19	20	0,034	0,068	0	X	X
10	20	0,0936	0,209	0	X	X
10	17	0,0324	0,0845	0	X	X
10	21	0,0348	0,0749	0	X	X
10	22	0,0727	0,1499	0	X	X
21	22	0,0116	0,0236	0	X	X
15	23	0,1	0,202	0	X	X
22	24	0,115	0,179	0	X	X
23	24	0,132	0,27	0	X	X
24	25	0,1885	0,3292	0	X	X
25	26	0,2544	0,38	0	X	X
25	27	0,1093	0,2087	0	X	X
28	27	0	0,396	0	0,968	27
27	29	0,2198	0,4153	0	X	X
27	30	0,3202	0,6027	0	X	X
29	30	0,2399	0,4533	0	X	X
8	28	0,0636	0,2	0,0214	X	X
6	28	0,0169	0,0599	0,0065	X	X

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]BRASIL. **Decreto-Lei nº2335**, de 6 de outubro de 1997. Diário oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 7 out. 1997.

[2]<<http://www.ons.org.br/atuacao/index.aspx>>. Acesso em: 8 de novembro de 2013.

[3]MIGUEL CASTILHA, JAUME MIRET, ANTONIO CAMACHO, JOSÉ MATAS, LUIS GARCIA DE VICUÑA. **Voltage support control strategies for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.61, N°2, fevereiro 2014.

[4]YAO XU, FANGXING LI. **Adaptive PI control of statcom for voltage regulation**. IEEE Transactions, fevereiro 2014.

[5]SHAHZAD AHSAN, ANWAR SHAHZAD SIDDIQUI, SHAGUFT KHAN. **Reactive power compensation for integration of wind power in a distribution network**. IEEE Transactions, 2012.

[6]SABHA RAJ ARYA, BHIM SINGH. **Neural network based conductance estimation control algorithm for shunt compensation**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, N°1, fevereiro 2014.

[7]MOHAMED ELSAMAHY, SHERIF OMAR FARIED, TARLOCHAN SIDHU. **Impact of midpoint STACOM on generator loss of excitation protection**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, N°2, abril 2014.

[8]BHIM SINGH, S.S. MURTHY, RAJA SEKHARA REDDY CHILIP. **STATCOM-based controller for a three-phase SEIG feeding single-phase loads**. IEEE Transactions on Energy Conversion, 29 de janeiro de 2014.

[9]GARIMA AGGRWARD, LINI MATHEW, S CHATTERJI. **Matlab/Simulink based simulation of an hybrid power flow controller**. 2014 Fourth Internation Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, 23 de fevereiro de 2014.

[10]BEHZAD KAZEMTABRIZI, ENRIQUE ACHA, **An advanced STATCOM model for power flow using newton's method**. IEEE Transactions on Power

---

Systems, Vol. 29, N°2, março de 2014.

[11]NADEEEM JALANI, MARTHA MOLINAS. **Asymmetrical fault ride through as ancillary servisse by constant power loads in grid-connected wind farm.** IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, N°3, março de 2015.

[12]XIAOKANG XU. MARTIN BISHOP, MICHAEL J.S.EDMONDS, DONNA G.OIKARINEN. **A new control strategy for distributed static compensators considering transmission reactive flow constrains.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.30, N°4, 9 de janeiro de 2015.

[13]R.M.M. PEREIRA, C.M.M FERREIRA, F.P.M. BARBOSA. **Comparative study of STATCOM and SVC performance on dynamic voltage collapse of an electric power system with wind generation.** IEEE Latin American Transactions, Vol.12, N°2, março de 2014.

[14]MAHDI ASHABANI, YASSER ABDEL-RADY I. MOHAMED. **Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.29, N°2, março de 2014.

[15]DAISUKE SHIOJIMA MIAO-MIAO CHENG, TAKANORI ISOBE, RIJUICHI SHIMADA. **Control and design principle of SVC-MERS-a new reactive compensator with line frequency switching and small capacitor.** Energy Conversion Congress and Exposition, 15-20 de setembro de 2012.

[16]NATHALIE HOLSMARK, MARTA MOLINAS. **Reactive power compensation capability of matrix converter-based FACTS device.** 2011 IEEE Trondheim PowerTech, 19-23 de junho de 2011.

[17]NOVALIO DARATHA, BISWARUP. **Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.29, N°1, janeiro de 2014.

[18]ANDRES OVALLE, GUSTAVO RAMOS, SEDDIK BACHA, AHMAD HABLY, AXEL RUMEAU. **Decentralized controlo f voltage source converters in microgrid based on the application of instantaneous power theory.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.62, N°2, fevereiro de 2015.

[19]OMAR A.URQUIDEZ, LE XIE. **Singular value sensitivity based optimal**

---

**control of embedded VSC-HVDC for steady-state voltage stability enhancement.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PP, N°99, 28 de janeiro de 2015.

[20]SHISHIR DIXIT, LAXMI SRIVASTAVA, GANGA AGNIHOTRI. **Optimal placement of SVC for minimizing power loss and improving voltage profile using GA.** Internacional Conference on Issues and Challenges in Intelligente Computing Techniques, 7-8 de fevereiro de 2014.

[21]M.SAILAJA KUMARI, G. PRIYANKA, M.SYDULU. **Comparison of genetic algorithms and particle swarm optimization for optimal power flow including FACTS devices.**Power Tech 2007, 1-5 de julho de 2007.

[22]JOSE VALLEJOS, UBALDO FERNÁNDEZ, RODRIGO RAMOS. **Multiobjective reactive power compensation applied to a Paraguayan power system.** Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006, 15-18 de agosto de 2006.

[23]ATTIA A. EL-FELGANY, ALMOATAZ Y.ABDELAZIZ. **Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm.** Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol.8, fevereiro de 2014.

[24]DI PAN, FENG LIANG. **Extension of the operating region of an IPM motor utilizing series compensation.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.50, janeiro/fevereiro de 2014.

[25]M.FAISAL KHAN, M.RIZWAN KHAN. **Voltage control of single-phase two winding self excited induction generator for isolated loads.** 2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 23-25 de janeiro de 2014.

[26]ROSANNA THOMAS, NARAYANAPPA, THANUSHKODI. **Reactive power compensation in electrical traction using active impedance concepts.** 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), março de 2013.

[27]HANGUANG DAI, YUHONG WANG, XINGYUAN LI, HONGQIANG DENG, ZHIQIANG MING. **Characteristic analysis of reactive power compensation device at HVDC converter station.** 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 27-29 de março de 2012.

---

[28]LUIS FERANDO MELLO, ANTONIO CARLOS ZAMBRONI DE SOUZA, GERSON HIROSHI YOSHINARI JR., CAMILA VASCONCELOS SCHNEIDER. **Voltage collapse in power systems: dynamical studies from a static formulation.** Mathematical Problems in Engineering, Vol.26, artigo número 91367, DOI 10.1155/MPE/2006/91367, Hindawi Publishing Corporation.

[29]R.S.MOURA, D.MARUJO, A.C.Z.SOUZA, B.I.L. LOPES. **Blocking reactive power generation as a voltage control measure.** 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 10-13 de junho de 2013.

[30]GARNG M.HUANG, LIANG ZHAO, XUEFENG SONG. **A new bifurcation analysis for power system dynamic voltage stability studies.** 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, DOI: 10.1109/PESW.2002.985133, 2002.

[31]M.A.PAI, PETER W.SAUER, BERNARD C.LESIEUTRE. **Static and dynamics nonlinear loads and structural stability in power systems.** Proceedings of the IEEE, Vol.83, novembro de 1995.

[32]SAFFT AYASUN, CHIKA O.NWANKPA, HARRY G.KWANTY. **Computation of singular and singularity induced bifurcation points of differential-algebraic power system model.** IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol.51, agosto de 2004.

[33]HARRY G.KWATNY, ARUN K.PASRIJA, LEON Y.BAHAR. **Static bifurcations in electric power networks:loss of steady-state stability and voltage collapse.**IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.33, outubro de 1986.

[34]MASOUD HONARRVAR NAZARI, MARYA ILIC. **Dynamic modeling and control of distribution energy systems: comparison with transmission power systems.** IET Generation Transmission Distribution, Vol.8, N°1, 2014.

[35]ADRIANO BATISTA ALMEIDA, ELAINE VALENÇA DE LORENCI, RAFAEL CORADI LEME, ANTONIO CARLOS ZAMBRONI DE SOUZA, BENEDITO ISAIAS LIMA LOPES, KOWOK LO. **Probabilistic voltage stability assessmente considering renewable sources with help of PV and QV curves.** IET Renewable Power Generation, Vol.7, 2013.

[36]RAMTEEN SIOSHANSI, SEYED HOSSEIN MADAENI, PAUL DENHOLM. **A dynamic programming approach to estimate the capacity value of energy**

---

**storage.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.29, N°1, janeiro de 2014.

[37]LU MIAO WEN, HAILIAN XIE, CHENGYAN YUE, WEI-JEN LEE. **Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, N°4, 21 de janeiro de 2015.

[38]C.MUTHAMIL SELVI, K.GNANAMBAL. **Power system voltage stability analysis using differential evolution.** Proceedings of National Conference on Innovations in Emerging Technology-2011, 17 e 18 de fevereiro de 2011.

[39]DAO ZHOU, FREDE BLAABJERG, MOGENS LAU, MICHAEL TONNES. **Optimized reactive power flow of DFIG power converters for better reliability performance considering grid codes.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.62, N°3, março de 2015.

[40]DONG DONG, BO WEN, DUSHAN BOROYEVICH, PAOLO MATTAVELLI, YAOSUO XUE. **Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, N°1, janeiro de 2015.

[41]PANKAJ GUPTA, R.S.BHATIA, D.K.JAIN. **Average absolute frequency deviation value based active islanding detection technique.** IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, N°1, janeiro de 2015.

[42]HUAN XU, UFUK TOPCU, RICHARD M.MURRAY. **Specification and synthesis of reactive protocols for aircraft electric power distribution.** IEEE Transactions on Control of Network Systems, Vol.2, N°2, 6 de fevereiro de 2015.

[43]J.H.TOVAR, G.GUTIÉRREZ, R.A.SOLERA. **Linear sensitivities to define reactive power áreas for voltage control and reactive power servisse in electricity markets.** IEEE Latin America Transactions, Vol.13, N°1, janeiro de 2015.

[44]WANXING SHENG, KE-YAN LIU, SHENG CHENG, XIAOLI MENG, WEI DAI. **A trust region SQP method for coordinated voltage control in smart distribution grid.** IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, N°99, 21 de janeiro de 2015.

[45]JINWEI HE, YUN WEI LI, FREDE BLAABJER. **An enhanced island microdrig reactive power, imbalance power, and harmonic power sharing scheme.** IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.30, N°6, junho de 2015.

---

[46]JIAN-HONG LIU, CHIA-CHI CHU. **Long-term voltage instability detections of multiple fixed-speed induction generators in distribution networks using synchrophasors.** IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, N°4, 30 de dezembro de 2014.

[47]T.HUSSEIN, A.L. ELSHAFEI, A.BAHGAT. **Design of a hierarchical fuzzy logic PSS for a multi-machine power system.** 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, 27-29 de julho de 2007.

[48]LARSON E.V., SWANN D.E. **Applying power system stabilizer: part I,II and III.** IEEE Transactions on Power Apparatus and System, N°6, junho de 1981.

[49]JAMES A.MOMOH, WENJIE ZHENG, KEISHA D'ARNAUD. **Fuzzy logic control application to enhance voltage stability of electric power systems.**15<sup>th</sup> International Conference on Intelligent System to Power Systems, 8-12 de novembro de 2009.

[50]HENGXU ZHANG, CHUNYI WANG, NING ZHANG, JIAN ZUO, DAWEI FAN. **New fuzzy excitation controller design based on coordination of voltage regulation and dynamic stability.**2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 de junho de 2007.

[51]CHIN-MING HONG, HUAN-WEN TZENG, SHUN-YUAN WANG, CHI-WU HUANG. **Design of static reactive power compensator using fuzzy sliding mode control.** 33<sup>rd</sup> Conference on Decision and Control of Proceedings, dezembro de 2014.

[52]SHU-CHEN WANG, CHI-JUI WU, PEI-HWA HUANG. **Analysis of power system QV curve by fuzzy modeling.** 2009 ICROS-SICE International Joint Conference, 18-21 de agosto de 2009.

[53]HANY M.HASANIEN, MAHMOUD MATAR. **A fuzzy logic controller for autonomous operation of a voltage source converter-based distributed generation system.** IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, N°1, janeiro de 2015.

[54]HAJAR BAGHERI TOLABI, MOHD HASAN ALI, M.RIZWAN. **Simultaneous reconfiguration, optimal placement od DSTATCOM, and photovoltaic array in a distribution system based on fuzzy-ACO approach.** IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.6, N°1, janeiro de 2015.

[55]CLÁUDIO FERREIRA. **Redes lineares em sistemas elétricos de potência.** 1<sup>a</sup> Edição, Editora Canalenergia, 2005.

---

[56]PRABHA KUNDUR, JOHN PASERBA, VENKAT AJJARAPU, GORAN ANDERSON, ANJAN BOSE, CLAUDIO CANIZARES, NIKOS HATZARAYRIOU, DAVID HILL, ALEX STANKOV, CARSON TAYLOR, THIERRY VAN CUTSEM, VIJAY VITTAL. **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, N°2, maio de 2004.

[57]M.JOHNSON, M.VAZIRI, S.VADHVA. **Understanding slow voltage instability**. 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, 8-10 de agosto de 2012.

[58]A.C. ZAMBRONI DE SOUZA, V.H.QUINTANA. **Identification of voltage collapse margins in power systems**. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 14-17 de setembro de 1993.

[59]CHARALAMBOS LAMBROU, PANAGIOTIS MANDAUDIDIS, COSTAS VOURNAS. **Local voltage instability monitoring and protection in the presence of self-restoring loads and two-level LTC's**. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 24-29 de julho de 2011.

[60]SAAD M. ALGHUWAINEM. **Transient and islanding performance of grid-connected induction generator feeding induction motor and resistive loads**. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 15-18 de maio de 2011.

[61]W.KUEHN. **Real-time method to prevent voltage collapse and power instability of HVDC systems**. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 11-13 de outubro de 2010.

[62]PRABHA KUNDUR. **Power system stability and control**. ISBN-10:007035958X, ISBN-13:978-0070359581, 1994.

[63]M.H.HAQUE. **Determination of steady-state voltage stability limit using PQ-curve**. DOI: 10.1109/MPER.2002.4312118, 2012.

[64]ISABELLA DE FREITAS BORGES DE PAIVA. **Comportamento da curva QV nas barras da região crítica de um sistema elétrico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

[65]PABLO GUIMARÃES, UBALDO FERNANDEZ, TITO OCARIZ, FRITZ W. MOHN, A.C.ZAMBRONI DE SOUZA. **QV and PV curves as a planning tool of**

---

**analysis.** 2011 4 th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 6-9 de julho de 2011.

[66]CEPEL-CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do usuário-programa ANATEM, análise de transitórios eletromecânicos, versão 10.04.06.** 2014.

[67]O.ALIZADEH MOUSAVI, M.BORORG, A.AHMADI-KHATIR, R. CHERKAOUI. **Reactive power reserve management: preventive countermeasure for improving voltage stability margin.** 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 22-26 de julho de 2012.

[68] A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, F.W. MOHN, I. F. BORGES, T. OCARIZ, “Using PV and QV curves with the meaning of static contingency screening and planning”, Electric Power Systems Research, 2011, 81, pp. 1491-1498.

[69]F.W.MOHN, A.C.Z. DE SOUZA. **Tracing PV and QV curves with help of a CRIC continuation method.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, N°3, 2006.

[70]D. MARUJO, A. C. ZAMBRONI DE SOUZA, B. I. LIMA LOPES, MARCOS SANTOS, K. L. LO. **On Control Actions Effects by Using QV Curves.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, 2014.

[71]<<http://www.sistemas-teste.com.br>>. Acesso em: 21 de março de 2016.