

**DIOGO BEDIN**

**CONTROLE SUPLEMENTAR DE  
EQUIPAMENTOS FACTS PARA  
MELHORIA DA ESTABILIDADE  
PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES  
DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**FLORIANÓPOLIS**

**2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE SUPLEMENTAR DE EQUIPAMENTOS  
FACTS PARA MELHORIA DA ESTABILIDADE PARA  
PEQUENAS PERTURBAÇÕES DE SISTEMAS DE  
POTÊNCIA**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**DIOGO BEDIN**

Florianópolis, Março de 2012



**CONTROLE SUPLEMENTAR DE EQUIPAMENTOS  
FACTS PARA MELHORIA DA ESTABILIDADE PARA  
PEQUENAS PERTURBAÇÕES DE SISTEMAS DE  
POTÊNCIA**

**DIOGO BEDIN**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de concentração Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.  
Orientador

---

Patrick Kuo Peng, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.  
Presidente

---

Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D.

---

Katia C. de Almeida, Ph.D

---

Walter Barra Junior, Dr.



*Aos amados pais Ariberto e Maria.*





## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio em todos os momentos da minha jornada estudantil e da minha vida.

À Maria Aline, pelo carinho e paciência ao me acompanhar durante a realização deste trabalho.

Ao professor Aguinaldo Silveira e Silva, pela perseverança ao longo da trajetória.

À todos os professores e colegas do LABSPOT, pela amizade e pelas produtivas discussões.



*"Uma meta, sem um plano para chegar lá,  
nada mais é do que um simples desejo"*  
*Antoine de Saint Exupéry*



Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **CONTROLE SUPLEMENTAR DE EQUIPAMENTOS FACTS PARA MELHORIA DA ESTABILIDADE PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**Diogo Bedin**

Março / 2012

Orientador: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D..

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Estabilidade para Pequenas Perturbações, Controle Robusto, Equipamentos FACTS.

Número de Páginas: 127

Condições de operação com elevados fluxos entre áreas podem reduzir o amortecimento de modos de oscilação inter-áreas. Um fator adicional à redução do amortecimento destes modos são as características de sistemas de potência modernos em que investimentos na expansão da rede são limitados, não acompanhando o aumento do carregamento, conduzindo a operação para a proximidade dos limites de segurança.

A solução convencional para elevação do amortecimento dos modos inter-áreas é a aplicação de sinais estabilizadores nos reguladores de tensão das máquinas síncronas das unidades geradoras do sistema, considerando como sinais de entrada, dentre outros, a velocidade angular do rotor do gerador ou a potência acelerante do gerador, ambos sinais locais. A baixa controlabilidade dos modos de oscilação inter-áreas a partir das unidades geradoras, ou até a baixa observabilidade destes modos nos sinais locais de entrada dos estabilizadores instalados nas máquinas síncronas, representam as principais dificuldades para elevar o amortecimento destes modos. A controlabilidade das unidades geradoras não pode ser aumentada por se tratarem de instalações fixas. Já para a observabilidade, utilizando métodos de medição fasorial sincronizada, pode-se obter um sinal remoto portador de informações melhores do que aquelas obtidas com o sinal local.

Os equipamentos FACTS desenvolvidos para controle de tensão e fluxo de potência também podem ser fontes de amortecimento para elevar as margens de segurança do sistema e permitir aumento do carregamento. Com

a flexibilidade de instalação dos equipamentos FACTS, pode-se determinar a instalação em local que proporcione elevada controlabilidade dos modos de oscilação de interesse e, através de medição fasorial, considerar na entrada do controlador qualquer sinal que apresente elevada observabilidade deste mesmo modo.

No Sistema Interligado Nacional os equipamentos FACTS são utilizados principalmente para controle de tensão e fluxo de potência. Neste trabalho são propostos sinais estabilizadores para os equipamentos FACTS já instalados no Sistema Interligado Nacional para prover amortecimento aos modos inter-áreas que apresentam amortecimento insatisfatório. Para o projeto dos sinais estabilizadores adicionais, aplicam-se técnicas de controle clássico e de controle robusto. Os desempenhos de amortecimento e robustez dos controladores clássicos e dos controladores robustos são comparados através da aplicação de contingências e avaliação do pseudo-espectro do sistema compensado.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **SUPPLEMENTARY CONTROL OF FACTS DEVICES TO INCREASE THE SMALL SIGNAL STABILITY OF POWER SYSTEMS**

**Diogo Bedin**

March / 2012

Advisor: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D..

Area of Concentration: Power Systems.

Keywords: Small Signal Stability, Robust Control, FACTS Devices.

Number of pages: 127

Conditions of operation with high power flow between areas can reduce the oscillation damping of inter-area modes. An additional factor that reduce the damping of these modes are the modern characteristics of power systems in which investments in the grid expansion are limited, do not follow the increasing load, leading to the operation close to the security limits.

The conventional solution to increase the damping of inter-area modes is the use of stabilizing signals. These signals are applied to the voltage regulators of the synchronous machine at generating units and are derived from the angular velocity of the generator, the accelerating power of the generator, among others. The low controllability of the inter-areas oscillation modes from the generating units, or low observability of these modes at the usually local input signals of the stabilizers installed in synchronous machines, are the major difficulties to increase the damping of these modes. The problem of controllability of the generating units can not be solved since the machines are fixed. For the observability, using phasor measurement, a remote signal can be obtained with better information content on the mode of interest than that obtained with the local signal.

The FACTS devices developed for power flow and voltage control can also be sources of damping to increase the security margins of the system and allow increasing load. Due to the FACTS installation flexibility, one can determine the installation location to provide high controllability of the oscillation modes of interest and through phasor measurement, the controller can use the input signal that provides high observability of the same mode.

In the Brazilian National Interconnected System FACTS devices are mainly used for voltage and power flow control. This work propose stabi-

zing controls for FACTS devices already installed in the National Interconnected System to provide additional damp to poorly damped inter-area modes. For the design of the additional stabilizers signals design classic and robust control techniques are applied. The damping and robustness of the classical and robust controllers are compared by the application of contingencies and evaluation of the pseudo-spectrum of the controlled system.



## SUMÁRIO

Introdução .....	1
1.1 SIN, Oscilações Pouco Amortecidas e FACTS .....	1
Oscilações inter-áreas .....	3
2.1 Introdução .....	3
2.2 Estabilidade para Pequenas Perturbações .....	3
2.3 Oscilações inter-áreas .....	4
2.4 Amortecimento dos Modos Inter-Áreas .....	5
2.5 Conclusão .....	6
Equipamentos FACTS .....	9
3.1 Introdução .....	9
3.2 Surgimento dos equipamentos FACTS .....	9
3.3 Equipamentos FACTS da primeira geração .....	10
3.3.1 TCR - Thyristor Controlled Reactor .....	11
3.3.2 TSC - Thyristor Switched Capacitor .....	12
3.3.3 SVC - Static VAR Compensator .....	12
3.3.4 TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor .....	15
3.3.5 TCPS - Thyristor Controlled Phase Shifter .....	16
3.4 Equipamentos FACTS da segunda geração .....	17
3.4.1 Evolução da Eletrônica de Potência e o VSC .....	17
3.4.2 STATCOM - Static Compensator .....	19
3.4.3 SSSC - Static Synchronous Series Compensator .....	20
3.4.4 UPFC - Unified Power Flow Controller .....	21
3.5 Recentes avanços no Brasil e no mundo .....	22
3.6 Conclusão .....	23
Projeto de Controladores do Sistema de Potência .....	25
4.1 Introdução .....	25
4.2 Estrutura de controladores para sistemas de potência .....	25
4.2.1 Controle descentralizado .....	25
4.2.1.1 Projeto Não Coordenado .....	26
4.2.1.2 Projeto Coordenado .....	27
4.2.2 Controle quase descentralizado .....	27
4.2.2.1 PMU - <i>Phasor Measurements Units</i> .....	28
4.2.3 Controle Centralizado .....	29

4.2.4	Controle multi-níveis ou hierárquico . . . . .	30
4.3	Modelagem do controle . . . . .	30
4.3.1	Redução de Ordem de Sistemas . . . . .	32
4.3.2	Modelagem de atrasos na transmissão dos sinais . . . . .	34
4.4	Métodos de Projeto de Controladores . . . . .	36
4.4.1	Posicionamento de pólos . . . . .	37
4.4.1.1	Implementação do método de posicionamento de pólos no Matlab . . . . .	41
4.4.2	Projeto por Otimização de Parâmetros . . . . .	42
4.4.2.1	Medida de Robustez de Sistemas Controlados . . . . .	43
4.4.2.2	Índices de Desempenho . . . . .	44
4.4.2.2.1	Estabilização . . . . .	44
4.4.2.2.2	Abscissa espectral . . . . .	45
4.4.2.2.3	Abscissa pseudo-espectral . . . . .	46
4.4.2.2.4	Norma $H_\infty$ . . . . .	46
4.4.2.2.5	Raio de Estabilidade . . . . .	49
4.4.2.3	Método de otimização . . . . .	49
4.4.2.4	<b>HIFOO</b> ( <i>H-Infinity Fixed Order Optimization</i> ) . . . . .	50
4.5	Conclusão . . . . .	50
Aplicação dos Métodos de Controle ao SIN . . . . .		53
5.1	Introdução . . . . .	53
5.2	Sistema Interligado Nacional . . . . .	53
5.3	Definição dos Locais para Aplicação da Malha de Controle Secundário . . . . .	57
5.4	Considerações para o projeto através de posicionamento de pólos . . . . .	60
5.5	Considerações para o projeto de controle robusto através de otimização de índices de desempenho . . . . .	61
5.5.1	Utilização do HIFOO para o projeto de controle robusto . . . . .	61
5.5.2	Determinação das Matrizes de Peso para a Otimização da Norma $H_\infty$ . . . . .	63
5.6	Redução de ordem do SIN para representação no Matlab . . . . .	64
5.7	Análise de robustez . . . . .	67
5.7.1	Contingências para a Análise de Robustez . . . . .	67
5.7.2	Análise de robustez através do pseudo-espectro . . . . .	68
5.8	Conclusão . . . . .	74





## LISTA DE FIGURAS

3.1	Linha de transmissão entre duas barras . . . . .	10
3.2	TCR - <i>Thyristor Controlled Reactor</i> . . . . .	11
3.3	TSC - <i>Thyristor-Switched Capacitor</i> . . . . .	12
3.4	SVC - <i>Static Var Compensator</i> . . . . .	13
3.5	Malhas de controle de um SVC . . . . .	14
3.6	TCSC - <i>Thyristor-Controlled Serie Capacitor</i> . . . . .	15
3.7	Malhas de controle de um TCSC . . . . .	16
3.8	Circuito básico de um VSC - <i>Voltage Source Converter</i> . . .	18
3.9	STATCOM - <i>Static Compensator</i> . . . . .	19
3.10	SSSC - <i>Static Synchronous Series Compensator</i> . . . . .	21
3.11	UPFC - <i>Unified Power Flow Controller</i> . . . . .	22
4.1	Resposta no tempo a um degrau em $t=0$ com atraso de 300ms	35
4.2	Sistema realimentado. . . . .	37
4.3	Caminho para traçado do diagrama de Nyquist. . . . .	38
4.4	Sistema realimentado . . . . .	39
4.5	Diagrama de fase de um bloco de avanço de fase. . . . .	41
4.6	Distância da instabilidade . . . . .	44
4.7	Pseudo espectro de uma matriz normal e de uma matriz não normal. . . . .	46
4.8	Sistema realimentado. . . . .	47
5.1	<i>Mode-Shapes</i> do modo inter-áreas N-S. . . . .	55
5.2	<i>Mode-shapes</i> dos modos inter-áreas após alteração dos PSS. . . . .	56
5.3	Representação de entradas e saídas do Sinal Adicional a ser projetado. . . . .	65
5.4	Malhas de controle de um SVC . . . . .	65
5.5	Comparação entre sistema completo e sistema reduzido com 196 estados para o SVC em São Luis II. . . . .	66
5.6	Localização das contingências para o modo N-S. . . . .	68
5.7	Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C1 . . . . .	71
5.8	Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C2 . . . . .	72
5.9	Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C3 . . . . .	73
6.1	Resposta do caso base à contingência n <sup>o</sup> 01. . . . .	75
6.2	Comparação entre sistema completo e sistema reduzido para o SVC em São Luis II. . . . .	77

6.3	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controlador $K1$ , à contingência nº 01. . . .	80
6.4	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controlador $K1$ , à contingência nº 02. . . . .	81
6.5	<i>Mode-shapes</i> dos modos instáveis para o sistema com controlador $K1$ com atraso na recepção do sinal de entrada. . . .	82
6.6	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, considerando atraso na entrada do controlador $K1$ , à contingência nº 01. . . . .	84
6.7	Susceptância shunt do SVC em São Luis II. Resposta do sistema, com controlador $K1$ , à contingência nº 01. . . . .	85
6.8	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controlador $K3$ , à contingência nº 01. . . .	86
6.9	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controlador $K3$ , à contingência nº 02. . . . .	87
6.10	Susceptância shunt do SVC em São Luis II. Resposta do sistema, com controlador $K3$ , à contingência nº 01. . . . .	87
6.11	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores $K3$ e $K4$ , à contingência nº 01.	90
6.12	Resposta do sistema, com controladores $K3$ e $K4$ , à contingência nº 03. . . . .	91
6.13	Resposta do sistema, com controladores $K3$ e $K4$ , à contingência nº 04. . . . .	92
6.14	Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador $K3$ .	93
6.15	Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador $K4$ .	94
6.16	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores $K3$ e $K4$ , à contingência nº 02. . . . .	95
6.17	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores $K5$ , $K6$ , $K7$ e $K8$ , à contingência nº 01. . . . .	98
6.18	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores $K5$ , $K6$ , $K7$ e $K8$ , à contingência nº 02. . . . .	99
6.19	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema com controladores $K6$ e $K7$ , à contingência nº 01.	99

6.20	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema com controladores $K6$ e $K7$ , à contingência nº 01. . . . .	100
6.21	Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador $K6$ .	101
6.22	Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador $K7$ .	102
6.23	Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores $K3$ , $K4$ e $K7$ , à contingência nº 01. . . . .	105
6.24	Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores $K3$ , $K4$ e $K7$ , à contingência nº 02. . . . .	106
6.25	Resposta do sistema, com controladores $K3$ , $K4$ e $K7$ , à contingência nº 03. . . . .	107
6.26	Comparação entre sistema completo e sistema reduzido para o SVC em Barro Alto. . . . .	113





## LISTA DE TABELAS

4.1	Atraso associado à diferentes meios físicos de transmissão de sinais. . . . .	34
4.2	Representações do atraso através de aproximações de Padé de baixa ordem . . . . .	35
4.3	Código do Matlab para o projeto de controladores por posicionamento de pólos. . . . .	42
5.1	Dimensão do Sistema Interligado Nacional. . . . .	54
5.2	Modo de Oscilação N-S. . . . .	54
5.3	Máquinas em que os ganhos dos PSS foram alterados. . . . .	55
5.4	Modos de Oscilação com ganho dos PSS's alterados. . . . .	56
5.5	Fatores de controlabilidade do modo N-S referente à variável Susceptância Shunt das barras onde estão instalados os SVC do SIN. . . . .	58
5.6	Fatores de observabilidade do modo N-S considerando-se a frequência e o fluxo de potência ativa como variáveis observadas. . . . .	59
5.7	Resíduos referentes às funções de transferência avaliadas. . . . .	60
5.8	Código do Matlab para inclusão do atraso na entrada do controlador. . . . .	62
5.9	Código do Matlab para o projeto de controladores robustos por otimização de índices de desempenho. . . . .	63
5.10	Contingências aplicadas ao SIN para verificação de robustez dos controladores. . . . .	68
5.11	Controladores para o sistema Máquina Barra Infinita. . . . .	70
6.1	Autovalores do caso base. . . . .	76
6.2	Autovalores do sistema com controlador K1 . . . . .	78
6.3	Autovalores do sistema com controlador K1 considerando atraso na obtenção do sinal remoto. . . . .	82
6.4	Fatores de participação do modo instável considerando atraso de 200ms na entrada do controlador K1. . . . .	83
6.5	Fatores de participação do modo instável considerando atraso de 300ms na entrada do controlador K1. . . . .	83
6.6	Autovalores do sistema com controlador K3 em São Luis II considerando atraso de 300ms no projeto. . . . .	84
6.7	Autovalores do sistema com controlador K4 em São Luis II considerando atraso de 300ms. . . . .	88

6.8	Autovalores do sistema com controlador projetado através do posicionamento de par de pólos com diferentes requisitos de amortecimento e considerando atraso de $300ms$ na obtenção de sinais remotos. . . . .	96
6.9	Comparação do modo N-S com controladores $K3$ , $K4$ e $K7$ . . . . .	103
6.10	Comparação do modo N-NE com controlador $K3$ , $K4$ e $K7$ . . . . .	104
6.11	Comparação da perturbação $\varepsilon$ admissível com controladores $K3$ , $K4$ e $K7$ . . . . .	104
6.12	Fator de Controlabilidade dos SVC do SIN para o modo N-NE. . . . .	108
6.13	Fatores de Observabilidade do modo N-NE para frequência e fluxo de potência ativa. . . . .	109
6.14	Resíduos das funções de transferência de interesse para o modo de oscilação N-NE. . . . .	110

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 SIN, Oscilações Pouco Amortecidas e FACTS

A reestruturação da indústria de energia elétrica separando geração, transmissão e distribuição introduziu novos paradigmas na operação e planejamento do sistema de potência. Um dos objetivos da reestruturação foi possibilitar a interconexão entre sistemas vizinhos que podem então compartilhar e diversificar sua capacidade de geração reduzindo a necessidade de investimento em geração.

Com o modelo vertical, projetado, construído e operado por monopólios, usualmente instituições públicas, o sistema era mais robusto nas respostas aos distúrbios ocorridos e a operação era facilmente prevista. A geração e transmissão cresciam em conjunto com a carga evitando sobrecargas e os programas de manutenção eram mais integrados.

A fragmentação da estrutura vertical e integrada em múltiplas companhias de geração, transmissão e distribuição representa um risco para a segurança e confiabilidade do sistema interligado (MANSOUR, 2000). Como consequência há um crescente interesse nos estudos sobre a segurança na operação do sistema de potência.

No contexto de desregulamentação e preocupação com a estabilidade do sistema está a indústria da eletricidade que tem o consumo de energia com crescimento substancial e a expansão da geração e da transmissão severamente limitadas pelos recursos disponíveis e as restrições ambientais. Como consequência, algumas linhas de transmissão sofrem com carregamento elevado e a estabilidade do sistema torna-se um fator limitante da transmissão de energia.

Como a transferência de potência pode ser feita através de uma grande área geográfica o tamanho do sistema em análise aumenta. Com o aumento no tamanho do sistema, da transferência de energia entre áreas e do carregamento do sistema, os fenômenos dinâmicos tem aumento significativo principalmente na incidência de oscilações inter-áreas (VITTAL, 2000). Isto exige modelagens e avaliações mais rigorosas do sistema de potência, aumentando as solicitações dos programas de simulações de fluxo de potência e simulações no domínio do tempo.

A exemplo do que ocorre no Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, o problema de estabilidade se torna importante quando longas linhas de transmissão são utilizadas para suprir centros metropolitanos de carga a

partir de uma fonte de energia distante, normalmente hidrelétrica, no caso brasileiro.

Uma possível solução é aumentar a controlabilidade do sistema através de dispositivos controláveis na rede. Equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) desenvolvidos inicialmente para controle de tensão e de fluxo de potência, podem ser uma alternativa para controlar os fluxos em linhas com carregamento pesado, reduzir as perdas por transmissão, melhorar a estabilidade da rede, reduzir os custos de produção e cumprir requerimentos contratuais, tudo isso através do controle do fluxo de potência na rede (ABIDO, 2009).

Para atingir melhor controle no fluxo de potência através das linhas de transmissão sem violar as margens de estabilidade do sistema, aplicações da tecnologia FACTS tem obtido maior relevância nas soluções perseguidas pelos pesquisadores e pela indústria.

Busca-se, nesta dissertação, explorar os equipamentos FACTS instalados no SIN para controle de tensão e de fluxo de potência projetando, para estes equipamentos, um sistema de controle complementar de forma a aumentar a estabilidade do sistema introduzindo torque de amortecimento às oscilações inter-áreas dominantes. Para o projeto destes controladores suplementares será explorado o uso de sinais locais e remotos e diferentes métodos de controle. Serão apresentados e aplicados para o projeto do controlador métodos de controle ótimos e robustos e métodos de avaliação e comparação da robustez dos controladores propostos.

A estrutura da dissertação é descrita a seguir. No Capítulo 2 é apresentado o problema de oscilações pouco amortecidas juntamente com os conceitos de estabilidade e as soluções para elevar o amortecimento dos modos de oscilação pouco amortecidos, bem como para elevar a segurança do sistema de potência. No Capítulo 3 são apresentados os diferentes tipos de equipamentos FACTS. No Capítulo 4 é descrita a representação de sistemas de potência e de controladores. Também são apresentados os índices de robustez a serem otimizados durante o projeto de controladores ótimos e o método de projeto de um controlador a partir dos conceitos de controle clássico. Seguindo, no Capítulo 5, estudam-se os detalhes de como aplicar os métodos de controle ao SIN e no Capítulo 6 são apresentados os resultados da aplicação destes métodos ao SIN. Finalizando, no Capítulo 7, são apresentados os comentários sobre os resultados obtidos e as possibilidades de trabalhos futuros.

## 2 OSCILAÇÕES INTER-ÁREAS

### 2.1 Introdução

O crescimento do carregamento dos sistemas de potência em ritmo superior aos investimentos em transmissão e geração agravam problemas recorrentes em sistemas de potência. Dentre estes problemas está a redução de robustez do sistema traduzida em oscilações pouco amortecidas, principalmente oscilações inter-áreas.

Neste capítulo definem-se os conceitos de estabilidade para pequenas perturbações e segurança do sistema. Apontam-se as alternativas para elevar o amortecimento do sistema e como estas alternativas serão tratadas ao longo deste trabalho.

### 2.2 Estabilidade para Pequenas Perturbações

As respostas do sistema às perturbações podem ser divididas em dois grupos: as transitórias e as sob pequenas perturbações. Quando a trajetória do sistema perturbado permanece na vizinhança de um ponto de equilíbrio as perturbações são consideradas pequenas e as equações do sistema podem ser linearizadas. Do contrário estaremos lidando com transitórios do sistema de potência (VITTAL, 2000).

Pequenas perturbações ocorrem constantemente em sistemas de potência devido a pequenas variações na carga ou na geração. Instabilidade devido a estas pequenas perturbações pode apresentar-se de duas maneiras: crescimento constante do ângulo do rotor devido à falta de torque de sincronização ou na forma de oscilações com amplitude crescente devido a falta de torque de amortecimento.

Os principais tipos de modos de oscilação encontrados em sistemas de potência são (VITTAL, 2000),(KUNDUR, 1994),(BORGES, 2009):

- **Modos locais:** estão associados à oscilação de uma máquina, ou de um grupo de máquinas fisicamente próximas, oscilando contra o resto do sistema de potência;
- **Modos inter-áreas:** associados à oscilação de um grupo de máquinas de uma região contra um grupo de máquinas de uma região próxima, normalmente interligada através de linhas de transmissão ditas fracas;
- **Modos do controle:** estão associados às unidades geradores e outros

controladores como sistemas de excitação, reguladores de tensão, equipamentos FACTS dentre outros;

- **Modos intra planta:** são caracterizados pela oscilação dos geradores de uma mesma usina uns contra os outros
- **Modos torcionais:** associados aos elementos giratórios do eixo de turbo-geradores oscilando com frequências distintas.

Estuda-se neste trabalho a estabilidade a pequenos sinais. O foco será elevar o torque de amortecimento dos modos inter-áreas.

### 2.3 Oscilações inter-áreas

Oscilações inter-áreas são objeto de estudo em todos os continentes. O problema tomou proporção global quando houve a desverticalização do setor elétrico em várias partes do mundo.

Apesar de mesmo antes da desverticalização do sistema elétrico alguns países já conviverem com a interconexão de áreas distantes e com os problemas causados por esta conexão, com a desverticalização cresceram as interligações entre sistemas e as exigências de intercâmbio entre as áreas conectadas. A interconexão de grandes sistemas elétricos de potência, separados por grandes distâncias geográficas provoca, principalmente, o surgimento de oscilações inter-áreas.

A interconexão com uma área vizinha proporciona diversificação no fornecimento de energia e a consequência é a redução de investimentos em geração em ambas as áreas. Isto exige um esforço elevado do sistema de transmissão que conecta uma área à outra. Por questões de segurança, o crescente fluxo entre os sistemas é limitado. Com o aumento do intercâmbio o amortecimento dos modos inter-áreas se torna menor. Elevar ainda mais o fluxo entre os subsistemas pode tornar o sistema instável. O amortecimento destas oscilações é pré-requisito para uma operação segura dos sistemas de potências. Por este motivo estas oscilações são o objeto de estudo deste trabalho.

A dificuldade em analisar e melhorar o amortecimento destas oscilações está no fato delas serem influenciadas por variáveis globais. Sua análise requer uma representação detalhada dos sistemas interconectados (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998). Modelos dos sistemas de excitação e das cargas devem ser especialmente precisos, isto porque o carregamento do sistema, e

suas características, tem elevado efeito sobre a estabilidade dos modos inter-áreas (KUNDUR, 1994).

A característica predominante do modo inter-áreas é a baixa frequência de oscilação, na ordem de  $0,1\text{Hz}$  a  $0,7\text{Hz}$  (KUNDUR, 1994). Estas oscilações manifestam-se nos ângulos dos rotores de conjuntos de máquinas pertencentes a diferentes áreas que oscilam entre si.

Uma vez excitadas por pequenas perturbações no sistema, estas oscilações persistem por um longo período de tempo. A falta de amortecimento dos modos eletromecânicos inter-área pode provocar separação do sistema, *blackouts* inesperados e, dependendo do nível de estresse do sistema, pode provocar danos físicos aos equipamentos.

Para evitar problemas de operação do sistema, até mesmo danos aos equipamentos da rede elétrica, busca-se elevar o amortecimento das oscilações inter-áreas.

## 2.4 Amortecimento dos Modos Inter-Áreas

Os modos de oscilação inter-áreas dominantes, normalmente com baixa frequência de oscilação, limitam a transferência de potência entre regiões. Estas oscilações normalmente são pouco amortecidas e tem seu amortecimento ainda mais reduzido pelo aumento do intercâmbio entre redes elétricas. Estas oscilações provocam sub-utilização de linhas de transmissão, portanto são indesejadas.

Para elevar o amortecimento das oscilações inter-áreas conectadas através de uma linha CA pode-se instalar em paralelo um link DC entre as áreas. A conexão entre duas áreas somente por um link DC evita o aparecimento de oscilações inter-áreas devido a natureza assíncrona de linhas DC. Este é um dos motivos para o crescimento do uso de linhas de transmissão em corrente contínua (PADIYAR, 2007).

Uma solução mais simples para elevar o amortecimento de oscilações inter-áreas de subsistemas conectados por linhas de transmissão em corrente alternada é o projeto de estabilizadores de sistemas de potência (PSS - Power System Stabilizer) para os reguladores de tensão de unidades geradoras síncronas.

Durante anos de operação tem-se presenciado a limitação dos PSS em amortecer somente modos locais ao invés de modos de oscilação inter-áreas (ABIDO, 2009). A ineficácia se dá devido à falta de flexibilidade em sua instalação e falta de observabilidade do modo inter-áreas no sinal usado como entrada do PSS (XIE et al., 2004). Para elevar a observabilidade do modo de

interesse propõe-se a substituição da entrada do controlador por um sinal remoto (WU; WANG; LI, 2008). Esta alternativa trouxe considerável melhoria no desempenho do PSS frente ao amortecimento de modos inter-áreas.

A consideração de sinais remotos como entrada de PSS introduz, dentre outros, o problema de confiabilidade do link de comunicação. Caso haja perda de comunicação o sistema pode tornar-se instável. Este problema pode ser resolvido com a adoção de um esquema de controle hierárquico (KAMWA; GRONDIN; HEBERT, 2001), (DOTTA; SILVA; DECKER, 2007), onde além do sinal remoto, considera-se o sinal local com entrada do controlador. Sendo assim, em caso de falha de comunicação o controlador com o sinal de entrada local garantiria desempenho mínimo ao sistema para que a estabilidade seja mantida.

Mais recentemente, os dispositivos FACTS também têm sido considerados para elevar o amortecimento de oscilações inter-áreas (RAMÍREZ et al., 2002). Nas primeiras aplicações de equipamentos FACTS o amortecimento apresentado, normalmente inexpressivo, devia-se a um efeito secundário do controle de tensão e fluxo de potência, onde equipamentos FACTS são requisitados pelo sistema de potência para controlar o fluxo de potência de modo que a utilização das linhas de transmissão se aproximem de seus limites térmicos. Porém, assim como o PSS, pode-se projetar um sinal adicional para os equipamentos FACTS com função de amortecer os modos inter-áreas e melhorar a estabilidade do sistema para pequenos sinais.

Na maioria das aplicações, a função dos dispositivos FACTS está limitada a elevar a estabilidade de tensão ou controle de fluxo de potência. Porém, a inclusão de um sinal adicional neste local pode garantir melhor amortecimento do modo inter-áreas de interesse. A consideração e correta escolha de um sinal remoto na entrada do controlador pode melhorar o desempenho do sinal adicional no amortecimento das oscilações inter-áreas (FARSANGI; SONG; LEE, 2004).

## 2.5 Conclusão

Este capítulo aborda as oscilações inter-áreas de baixa frequência com baixo amortecimento ou até mesmo amortecimento negativo e indica quais as possíveis soluções para o problema de amortecimento.

Atualmente, as alternativas discutidas com maior frequência para mitigar as oscilações de modos inter-áreas são a configuração de um PSS para os reguladores de tensão das máquinas síncronas ou a consideração de um sinal adicional no controle de dispositivos FACTS. Em ambos os casos, para



garantir o melhor desempenho, deve-se obter o sinal de entrada do controlador de um local remoto que apresente elevada observabilidade do modo de oscilação de interesse.

Nos capítulos seguintes serão detalhados os tipos de equipamentos FACTS e os métodos de projeto de controladores que serão usados com o objetivo de melhorar o amortecimento dos modos inter-áreas.



### 3 EQUIPAMENTOS FACTS

#### 3.1 Introdução

Equipamentos FACTS podem ser utilizados para aumentar o amortecimento de oscilações pouco amortecidas. Para tanto é preciso conhecer os equipamentos e determinar qual equipamento FACTS é adequado para cada situação.

Este capítulo apresenta o histórico e as motivações para o surgimento dos FACTS e nas seções 3.3 e 3.4 estão representados os principais equipamentos pertencentes, respectivamente, à primeira e à segunda geração. Na seção 3.5 é apresentada uma breve perspectiva da utilização dos dispositivos FACTS no Brasil e no mundo.

#### 3.2 Surgimento dos equipamentos FACTS

No final da década de 80, o instituto EPRI formulou a filosofia de uso dos equipamentos FACTS, na qual, vários controladores baseados em eletrônica de potência regulavam o fluxo de potência a tensão do sistema de transmissão e reduziam distúrbios dinâmicos (ABIDO, 2009).

Entretanto, alguns controladores baseados em eletrônica de potência, hoje caracterizados como equipamentos FACTS, foram utilizados antes mesmo da introdução do conceito FACTS pela comunidade técnica. O SVC (*Static VAR Compensator*) foi demonstrado e comercializado em Nebraska em 1974 pela GE e pela Westinghouse em Minnesota em 1975. Em 1984 a Siemens apresentou na Califórnia o primeiro Controlador Série instalado no sistema de potência (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

O principal objetivo dos dispositivos FACTS era aumentar a utilização da capacidade de transmissão e o controle do fluxo de potência sobre rotas de transmissão pré determinadas. Para ilustrar estas funcionalidades, considere-mos a Figura 3.1 que representa uma linha de transmissão entre duas barras adjacentes. A equação (3.1) define o fluxo de potência ativa entre as barras, quando o valor da resistência da linha é desprezada.

$$P = \frac{V_1 V_2}{x} \text{sen}(\delta_{12}) \quad (3.1)$$

Está explícito na equação (3.1) que há três maneiras para controlar o fluxo de potência na linha de transmissão. São elas:

- Controlar o módulo da tensão das barras;

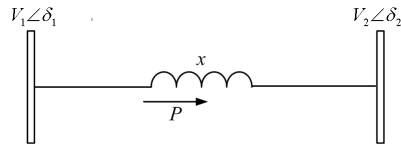


Figura 3.1: Linha de transmissão entre duas barras

- Variar a reatância da linha de transmissão;
- Controlar a defasagem angular entre as tensões terminais.

Dentre os equipamentos FACTS, têm-se o SVC e o STATCOM como capazes de controlar o módulo da tensão das barras; o TCSC e o SSSC que compensam a reatância das linhas de transmissão onde estão instalados; e o TCPS que controla a defasagem angular entre barras. Estes são exemplos da primeira e da segunda geração dos equipamentos FACTS que serão apresentados na sequência.

### 3.3 Equipamentos FACTS da primeira geração

Antes da construção dos equipamentos FACTS houve estudos, principalmente no campo da eletrônica de potência, que desenvolveram os tiristores, dispositivos semicondutores com elevada capacidade de condução e de isolamento. Estes dispositivos permitiram a concepção da primeira geração de equipamentos FACTS.

Os equipamentos FACTS da primeira geração trabalham como elementos passivos utilizando impedâncias ou transformadores com TAP variável controlados por tiristores. Equipamentos desta geração não são capazes de consumir e fornecer potência ativa ao sistema e ao mesmo tempo consumir e fornecer potência reativa.

Os elementos de controle elementares da susceptância equivalente dos dispositivos FACTS da primeira geração são o TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) e o TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*). Estes elementos são controlados por tiristores sem capacidade de corte de corrente.

Os dispositivos FACTS da primeira geração mais utilizados são o SVC (*Static VAR Compensator*) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*). Também fazem parte da primeira geração o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) e o TCPS (*Thyristor Controlled Phase Shifter*).

### 3.3.1 TCR - Thyristor Controlled Reactor

O Reator Controlado a Tiristores é o mais simples dos equipamentos FACTS. É definido como um indutor controlado por tiristores conectado em paralelo ao sistema com impedância variável de maneira contínua através do controle de condução parcial de uma válvula tiristorizada (ACHA et al., 2002). Consiste de um reator linear em série com dois tiristores bipolares. A Figura 3.2 ilustra a topologia deste dispositivo.

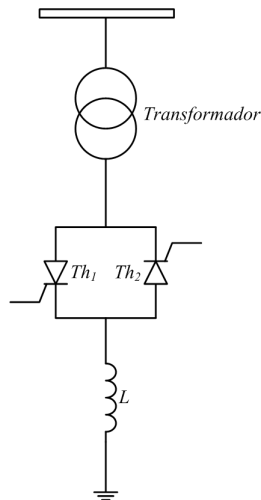


Figura 3.2: TCR - *Thyristor Controlled Reactor*

A susceptância aparente do TCR é afetada pela mudança da corrente que circula pelo reator através do disparo dos tiristores. A susceptância aparente do TCR é, portanto, uma função do ângulo de disparo dos tiristores de acordo com a equação (ACHA et al., 2002):

$$B_L = \frac{\sigma - \text{sen}\sigma}{\pi X_L} \quad (3.2)$$

onde:

$\sigma$ : ângulo de condução dos tiristores ( $\sigma = 2(\pi - \alpha)$ );

$\alpha$ : ângulo de disparo dos tiristores.

A equação (3.2) mostra que a mudança do ângulo de disparo do tiristor

provoca mudança na susceptância equivalente do TCR, sendo, nula para  $\sigma = 0$  ( $\alpha = \pi$ ) e máxima para  $\sigma = \pi$  ( $\alpha = \pi/2$ ). Sendo assim,  $B_{L\max} = 1/X_L$ .

A capacidade de excursão da susceptância através do controle do ângulo de disparo de tiristores é empregada para a construção dos dois principais equipamentos FACTS da primeira geração, o SVC e o TCSC.

### 3.3.2 TSC - Thyristor Switched Capacitor

Assim como TCR, o TSC é outro dispositivo elementar dos equipamentos FACTS. O TSC é constituído por um capacitor chaveado a tiristores conectado em paralelo ao sistema cuja reatância efetiva é variada de maneira discreta pela completa condução ou não condução da válvula tiristorizada (ACHA et al., 2002).

O TSC é mostrado na Figura 3.3. A susceptância equivalente é definida pelo número de capacitores paralelos em condução. Cada capacitor é controlado por uma chave formada por tiristores e a susceptância total é definida por qualquer combinação de  $k$  susceptâncias.

Este dispositivo é utilizado principalmente na construção da arquitetura de um SVC. Sua função é elevar a capacidade de excursão da potência reativa absorvida ou fornecida ao sistema onde está conectado o SVC.

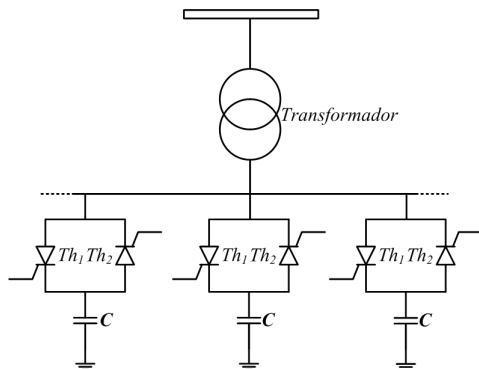


Figura 3.3: TSC - Thyristor-Switched Capacitor

### 3.3.3 SVC - Static VAR Compensator

A principal finalidade da instalação de um SVC em sistemas de potência é o controle de tensão no ponto de conexão. De um ponto de vista

operacional, o SVC comporta-se como uma reatância variável que pode gerar ou absorver potência reativa para realizar controle de tensão.

Além da larga utilização para fornecimento e absorção de potência reativa para proporcionar controle de tensão, reconhece-se que os SVC também ampliam a margem de estabilidade transitória e auxiliam no amortecimento de oscilações do sistema onde estão instalados (KUNDUR, 1994).

A partir dos dispositivos apresentados nas duas seções anteriores, o TCR e o TSC, constrói-se um SVC. Na sua forma mais simples, um SVC é formado por um banco de capacitores conectado em paralelo a um TCR. Para ampliar a faixa de operação pode ser instalado, também em paralelo ao TCR e ao banco de capacitores, um TSC. A Figura 3.4 ilustra um compensador estático de reativo composto pelos três elementos citados.

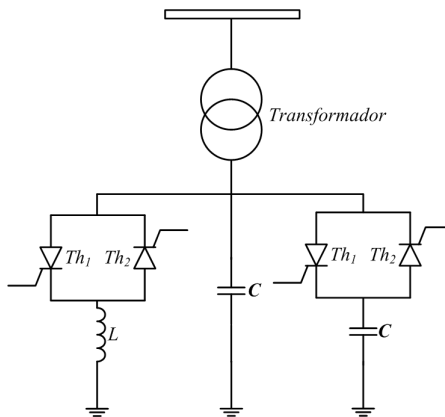


Figura 3.4: SVC - *Static Var Compensator*

O SVC leva vantagem sobre capacitores chaveáveis porque, devido seu controle contínuo da reatância, evita os esforços mecânicos do chaveamento. Além disso, o controle da reatância é rápido o suficiente para compensar a evolução da tensão durante um rápido transitório ou até mesmo durante uma falta. Esta velocidade não é alcançada com elementos fixos chaveáveis que sofrem esforços mecânicos devido ao seu contínuo chaveamento.

Durante contingências o SVC é capaz de rapidamente, através do rápido controle do ângulo de condução dos tiristores, aumentar ou diminuir o fornecimento de potência reativa reduzindo a amplitude da primeira oscilação e ajudando a manter o nível de tensão durante a falta. Esta característica ga-

rante melhorias no desempenho do sistema durante a falta elevando a margem de segurança da estabilidade transitória.

Outra vantagem é que, através de um controle auxiliar, o SVC é capaz de modular o sinal de controle de tensão para aumentar o amortecimento do sistema melhorando a estabilidade a pequenos sinais.

Em (SILVA, 2008) é apresentado o equacionamento que exemplifica a funcionalidade deste equipamento FACTS.

A Figura 3.5 mostra as malhas de controle de um SVC. O controle primário e o SVC são representados pelo bloco designado como  $SVC(s)$ .  $F1(s)$  representa a função de transferência do sistema responsável pela variação da tensão da barra controlada pelo SVC,  $V_{BARRA}$  em função da variação da susceptância do compensador estático.

O controle secundário, ou suplementar, tem como entradas mais comuns um sinal de frequência de barra ou fluxo de potência em uma linha de transmissão. Sua saída é chamada de sinal estabilizador.  $F2(s)$  representa a parte do sistema que determina a influência da susceptância do compensador estático sobre a frequência,  $\theta$ , de uma barra ou o fluxo de potência,  $P_{ij}$  em uma linha de transmissão.

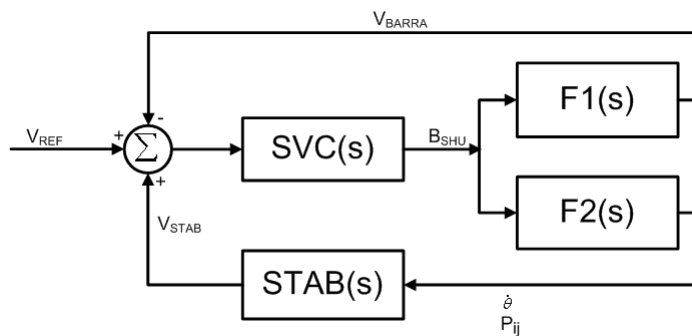


Figura 3.5: Malhas de controle de um SVC

No sistema interligado nacional brasileiro havia, em 2010, 14 compensadores estáticos de potência reativa em operação. Até 2013 está prevista a entrada em operação de outros 13 (ONS, 2010c). A principal função destes equipamentos no sistema brasileiro é a compensação de potência reativa e a melhoria da estabilidade transitória.



### 3.3.4 TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor

A principal característica do TCSC é prover um meio de variar a compensação série de uma linha de transmissão, permitindo rápido e eficiente controle do fluxo de potência nesta linha.

Dentre as funções de um TCSC estão o controle de fluxo de potência em uma linha de transmissão; redução de componentes assimétricas; redução das perdas de potência na rede; suporte de tensão; limitação de correntes de curto-circuito; redução da ressonância subsíncrona; amortecimento de oscilações de potência; e melhoria da estabilidade transitória (PANDA; R.N.PATEL; N.P.PADHY, 2006).

O principal dispositivo de controle de um TCSC é o TCR apresentado na seção 3.3.1. A arquitetura do TCSC é apresentada na Figura 3.6. Observe-se que é composto por um TCR em paralelo com um capacitor fixo.

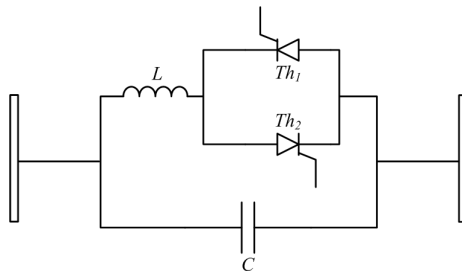


Figura 3.6: TCSC - Thyristor-Controlled Serie Capacitor

Com a compensação série variável provida pelo TCSC é possível controlar o fluxo de potência ativa ou a corrente em uma linha de transmissão. Isto se reflete no fluxo de potência propriamente dito ou no controle das perdas do circuito. Em (SILVA, 2008) há uma descrição matemática da influência do TCSC na capacidade de transmissão de potência ativa e reativa de uma linha de transmissão.

Ainda, através de uma modulação dinâmica do fluxo de potência na linha, com o uso de um TCSC, é possível prover amortecimento às oscilações do sistema de potência (CIGRÉ, 1995).

A ilustração das malhas de controle de um compensador série com a finalidade de controle do fluxo de potência e de modulação do fluxo para amortecimento das oscilações do sistema de potência é apresentada na Figura 3.7. A estrutura é semelhante à do SVC, exceto pelas variáveis controladas. A

finalidade do controle primário é controlar o fluxo de potência na linha  $P_{km}$ . O controle secundário, alimentado pelas mesmas grandezas que o SVC, tem finalidade de modular o fluxo de potência de uma linha para amortecimento de oscilações. Observa-se que o controle secundário pode ser realimentado com medição distinta da variável controlada,  $P_{ij} \neq P_{km}$ .

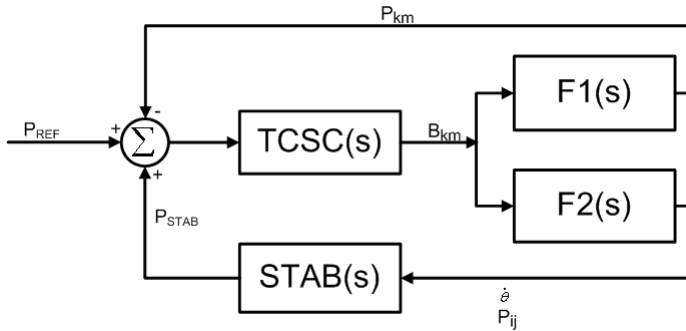


Figura 3.7: Malhas de controle de um TCSC

No mundo, a principal experiência de uso de dispositivos TCSC para mitigar oscilações pouco amortecidas, principalmente oscilações inter-áreas, foi no Brasil. Em 1999 foram instalados no sistema brasileiro dois TCSC com a finalidade exclusiva de amortecer oscilações inter-áreas de baixa frequência entre as regiões Norte e Sul (SIMÕES et al., 2009).

### 3.3.5 TCPS - Thyristor Controlled Phase Shifter

O TCPS é um transformador utilizado em casos onde a diferença angular da tensão nas extremidades de uma linha de transmissão não é adequado para a otimização do uso de uma linha de transmissão. O IEEE FACTS Working Group define o TCPS como um transformador ajustável com chaveamento via tiristores para prover rápida variação do ângulo de fase (ADAPA et al., 1997).

A equação (3.1) mostra que uma forma de controlar o fluxo de potência em uma linha de transmissão é variar o ângulo da tensão das duas extremidades da linha onde se deseja controlar o fluxo de potência. O TCSC é o equipamento FACTS capaz de variar o ângulo de abertura entre barras adjacentes e assim controlar o fluxo de potência em uma linha de transmissão (RAO; NAGARAJU; RAJU, 2007).

Além do controle do fluxo de potência este dispositivo também pode agir sobre oscilações pouco amortecidas melhorando o desempenho dinâmico do sistema quando submetido a pequenas perturbações (ROBAK; RASOLOMAMPIONONA; JANUSZEWSKI, 2007), (RAO; NAGARAJU; RAJU, 2007).

O controle do fluxo de potência e das oscilações do sistema através do TCPS melhora a controlabilidade e pode viabilizar a operação do sistema. A instalação do TCPS proporciona maior margem de operação para o sistema e melhor estabilidade de tensão (ROBAK; RASOLOMAMPIONONA; JANUSZEWSKI, 2007).

### 3.4 Equipamentos FACTS da segunda geração

Equipamentos FACTS de primeira geração funcionam como elementos passivos usando impedância ou Transformadores com TAP variável controlados por tiristores. Equipamentos FACTS da segunda geração funcionam como fontes controladas de módulo e ângulo de tensão.

A segunda geração de equipamento FACTS emprega conversores que utilizam elementos de eletrônica de potência com capacidade, não apenas de disparo, mas também de corte de corrente. Estes equipamentos são baseados em conversores CC/CA com capacidade de fornecer ou absorver potência ativa e reativa para o sistema de potência CA.

#### 3.4.1 Evolução da Eletrônica de Potência e o VSC

Um tiristor é uma chave de direção única. É capaz de isolar elevada tensão quando fora de condução e de conduzir correntes elevadas quando em condução. Porém, não possui a capacidade de interrupção de condução de corrente. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência houve o surgimento dos GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*) com capacidade de suportar elevadas tensões e capacidade de início ou corte de corrente a qualquer momento.

Os VSC (*Voltage Source Converter*), normalmente utilizados na substituição dos equipamentos FACTS da segunda geração, são dispositivos com capacidade de fornecer tensões trifásicas senoidais na frequência fundamental, com amplitude e fase controláveis e empregam dispositivos como o GTO, ou outros com capacidade de disparo e corte de corrente semelhantes.

Avanços em eletrônica de potência levaram ao desenvolvimento de uma grande variedade de chaves semicondutoras de potência com capacidade de interrupção de corrente como os IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transis-*

tors), os MTO (*MOS Turn Off Thyristor*) e os IGCT (*Integrated Gate Com-mutated Thyristor*).

A concepção do IGBT teve grande importância para os equipamentos FACTS devido à sua habilidade de rapidamente iniciar ou interromper a condução. Isto possibilitou que os conversores fossem concebidos utilizando a modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) em alta frequência (UZUNOVIC, 2001). A partir de então, as pesquisas buscam aumentar a frequência de chaveamento e reduzir as perdas para conseqüentemente aumentar a potência dos conversores VSC.

A Figura 3.8 apresenta o circuito básico de um VSC trifásico. É composto por seis válvulas formadas por uma chave semicondutora com capacidade de corte de corrente e um diodo em antiparalelo para fornecer um caminho para correntes indutivas e garantir que a polaridade da tensão em cada uma das chaves seja unidirecional.

O estado das chaves, Figura 3.8, controla a produção de distintos formatos de onda de tensão alternada.

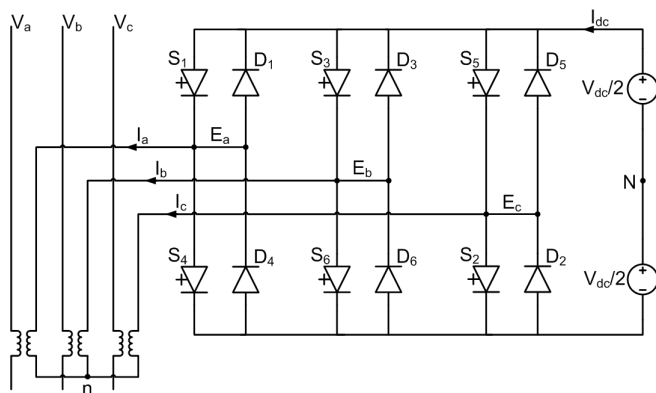


Figura 3.8: Circuito básico de um VSC - *Voltage Source Converter*

O controle da magnitude da tensão gerada determina se o VSC fornecerá ou absorverá potência reativa do sistema. Se esta magnitude for maior que a tensão do sistema CA ao qual está conectado, o VSC fornecerá potência reativa ao sistema. Se a tensão for menor que a do sistema CA, o VSC absorverá potência reativa do sistema (ALMEIDA; SILVA, 2006).

### 3.4.2 STATCOM - Static Compensator

Um STATCOM (*Static Compensator*) forma-se a partir da conexão transversal de um VSC a uma linha de transmissão. A tensão contínua representada na Figura 3.8 é fornecida por um capacitor. Portanto, na operação em regime permanente o STATCOM não é capaz de fornecer potência ativa ao sistema de potência (HINGORANI; GYUGYI, 2000). A Figura 3.9 ilustra esta situação.

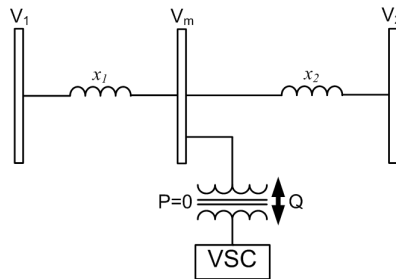


Figura 3.9: STATCOM - *Static Compensator*

Além da configuração convencional em que a tensão é mantida através de um capacitor, há possibilidade de incluir uma fonte adequada para capacitar o STATCOM a fornecer, além de potência reativa, potência ativa através do VSC e de seu transformador (ANGQUIST, 2010).

Tratando especificamente da configuração do STATCOM em que o intercâmbio de potência ativa com o sistema é nula temos, a exemplo do SVC, um equipamento capaz de fornecer ou absorver potência reativa na rede com a vantagem de prover controle mais veloz. Outras vantagens do STATCOM sobre o SVC são a elevada capacidade de corrente reativa em situações de quedas de tensão, controle mais estável, menor nível de inserção de correntes harmônicas no sistema e menor tamanho físico (F.M.KANDLAWALA; A.H.M.A.RAHIM, 2001).

Das vantagens citadas, a que se sobressai juntamente com a velocidade do controlador é a capacidade de fornecer compensação indutiva ou capacitiva com controle de corrente de saída sob toda a faixa controlável. Com isso, o STATCOM pode fornecer corrente capacitiva ou indutiva total em qualquer nível de tensão, inclusive próximo de zero.

A principal utilidade do STATCOM é o controle de tensão. Adicionalmente este equipamento pode ser utilizado para amortecer oscilações do

sistema de potência resultando em melhoria de sua estabilidade e capacidade de transmissão (REDDY; RAM, 2010).

A capacidade estabilizadora do STATCOM é superior à do SVC. O STATCOM tem melhor capacidade de amortecimento de oscilações e recuperação de tensão (BAMASAK; ABIDO, 2005).

Resumindo, o STATCOM atua como um compensador síncrono sem a desvantagem do momento de inércia de um rotor. Sua capacidade de melhoria da estabilidade transitória do sistema supera a do compensador síncrono e do SVC.

### 3.4.3 SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*

O SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) é composto por um VSC que utiliza uma fonte de corrente contínua independente para injetar tensão em série com o sistema de potência através de um transformador de acoplamento como, ilustrado na Figura 3.10.

O SSSC é capaz de alterar a impedância equivalente da linha de transmissão em que está instalado através do controle da magnitude e ângulo da tensão série injetada nesta linha.

Estas características conferem ao SSSC a capacidade de controle do fluxo de potência da linha de transmissão através da variação da compensação da reatância série da linha.

O resultado imediato da compensação série com este dispositivo FACTS é o aumento das margens de estabilidade transitória (KUMKRATUG, 2011) e para pequenas perturbações (PUPIN; PINA; ARAUJO, 2009).

Apesar dos benefícios para a estabilidade do sistema, em aplicações onde a relação  $x/r$  está entre três e dez, particularmente para tensões de transmissão acima de 115kV, um elevado grau de compensação série capacitiva pode reduzir a relação efetiva entre as impedâncias reativa e resistiva para valores tão baixos que o crescimento progressivo da demanda de potência reativa da linha, a perda associada ao aumento da demanda e um possível afundamento de tensão começam a limitar a capacidade de transmissão de potência ativa.

A instalação do SSSC permite injeção de potência ativa na linha através do controle do ângulo da tensão injetada em relação à corrente da linha de transmissão em questão. Assim como para o STATCOM, a injeção de potência ativa será possível somente se for acoplada ao SSSC uma fonte de energia externa ao sistema ou um dispositivo de armazenamento de energia. A capacidade de injeção de potência ativa do SSSC permite a compensação

simultânea das componentes reativa e resistiva da linha de transmissão mantendo a relação  $x/r$  em valores aceitáveis (GYUGYI; SCHAUDER; SEN, 1997).

Outro benefício do sistema compensado com o SSSC é a imunidade à ressonância sub-síncrona. Quando se aplica compensação série à uma linha de transmissão radial, que conecta um gerador com turbinas a vapor ao sistema interligado, há uma redução na frequência natural de oscilação do sistema elétrico naquela região acarretando em risco de excitação dos modos de oscilação torcionais referentes ao eixo da turbina a vapor (KUNDUR, 1994). A frequência de oscilação dos modos torcionais é inferior à síncrona, por este motivo a excitação destes modos é denominado ressonância sub-síncrona.

Quando na linha de transmissão a compensação série se dá através da instalação de um SSSC, não há ocorrência de ressonância sub-síncrona. O controle do SSSC é imune a este problema (GYUGYI; SCHAUDER; SEN, 1997).

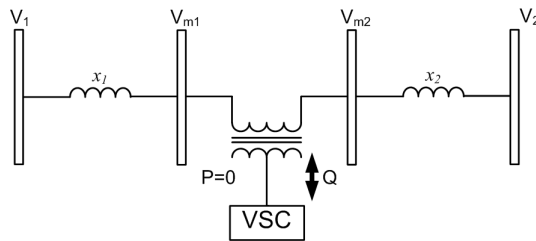


Figura 3.10: SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*

### 3.4.4 UPFC - *Unified Power Flow Controller*

O UPFC (*Unified Power Flow Controller*) é utilizado para controle do fluxo de potência no sistema de transmissão através do controle da impedância, magnitude da tensão e abertura angular.

O UPFC é formado por dois VSC, um SSSC em série e um STATCOM em paralelo, acoplados por um link DC comum. O SSSC é utilizado para a compensação série da linha de transmissão através da adição de tensão com controle da magnitude e ângulo em série com a linha enquanto o STATCOM é usado para prover compensação de potência reativa ao sistema. Os dois VSC compartilham o mesmo capacitor. A capacidade de armazenamento de energia deste capacitor é limitada, o que limitaria o fornecimento e controle do fluxo de potência ativa. Portanto, a potência ativa fornecida à linha de transmissão através do conversor conectado em série é suprida pelo conver-

sor conectado em paralelo (HINGORANI; GYUGYI, 2000) superando a limitação do capacitor. A potência reativa nos conversores série e paralelo podem ser escolhidas individualmente possibilitando maior flexibilidade ao controle do fluxo de potência.

A Figura 3.11 apresenta a topologia do UPFC e as possibilidades de fluxo de potência através de suas conexões.

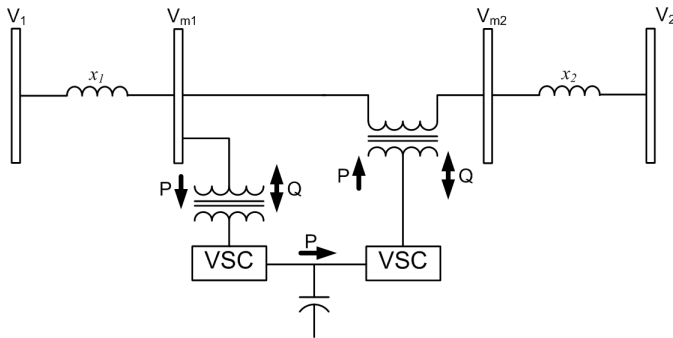


Figura 3.11: UPFC - *Unified Power Flow Controller*

Concluindo, o UPFC pode ser utilizado para controlar o fluxo de potência ativa e reativa na linha de transmissão e ainda fornecer compensação reativa ao sistema no ponto da instalação.

### 3.5 Recentes avanços no Brasil e no mundo

O desenvolvimento da eletrônica de potência permitiu o desenvolvimento de equipamentos FACTS mais confiáveis com custos reduzidos. Um exemplo bem sucedido da evolução dos equipamentos FACTS foi o surgimento da segunda geração destes dispositivos.

No começo, mesmo sendo muito caros, estes equipamentos logo foram considerados atrativos, por demonstrarem elevada capacidade de melhoria do desempenho dos sistemas de transmissão. Ainda que os custos estejam diminuindo, a diferença do valor do MW instalado é elevada para as duas categorias, primeira e segunda geração dos FACTS. Portanto, não se exclui a necessidade de estudos comparativos sobre a viabilidade do uso de equipamentos de segunda geração em detrimento aos da primeira geração.

Porém, frente ao avanço do carregamento dos sistemas de transmissão, a demanda por equipamentos de compensação variável cresce na busca



de garantir os requisitos mínimos para a operação dos sistemas de transmissão de maneira eficaz. Neste cenário, os avanços obtidos desde o surgimento dos equipamentos FACTS de segunda geração tornam-se cada vez mais relevantes.

Estima-se que há mais de 800 SVC instalados no mundo (ACHARYA; SODE-YOME; MITHULANANTHAN, 2005). No Brasil há 14 SVC instalados (ONS, 2010a) e, em 2013, serão 25(ONS, 2010c).

Para o TCSC, em 2004 havia sete aplicações no mundo, duas destas no Brasil, os dois equipamentos instalados no tronco Norte-Sul do País.

No Brasil, os TCSC foram instalados em 1999 com o objetivo de amortecer as oscilações inter-área Norte - Sul com frequência de aproximadamente  $0,2\text{Hz}$  (SIMÕES et al., 2009). Os resultados obtidos foram satisfatórios.

Quanto aos equipamentos da segunda geração dos FACTS, também em 2004, havia registro de aproximadamente 20 STATCOM instalados e dois UPFC ao redor do mundo (ACHARYA; SODE-YOME; MITHULANANTHAN, 2005), (ALMEIDA; SILVA, 2006).

### **3.6 Conclusão**

Tendo sido apresentados os diferentes tipos de equipamentos FACTS, evolui-se para o emprego destes para o amortecimento de oscilações inter-áreas.

No próximo capítulo é apresentado um apanhado geral sobre o projeto de controladores e, no capítulo seguinte, é apresentada a metodologia para aplicação destes métodos de projeto aos equipamentos FACTS do SIN.



## **4 PROJETO DE CONTROLADORES DO SISTEMA DE POTÊNCIA**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentado o formato para representação de plantas e controladores no espaço de estados bem como os métodos de projeto de controladores pelos métodos de alocação de pólos e por otimização de índices de robustez. É apresentado um método de redução de ordem da planta, modelam-se atrasos para o projeto de controladores e apresentam-se as possíveis estruturas de controladores para um sistema de potência. Por fim, são apresentados os métodos de projeto dos controladores que serão utilizados neste trabalho.

### **4.2 Estrutura de controladores para sistemas de potência**

Em sistemas de potência, um modo de oscilação pouco amortecido pode estar associado a mais de um estado em locais fisicamente distantes. Isto ocorre principalmente para oscilações inter-áreas em que há grandes distâncias entre as áreas conectadas.

Para atuar sobre uma determinada frequência de oscilação busca-se identificar quais as variáveis que mais atuam sobre determinado modo a ela associada. Para que o controlador seja eficaz, há necessidade de se atuar sobre a variável que exerce maior controlabilidade sobre o modo de interesse. Também para garantir a eficácia, a variável de entrada do controle deve ser selecionada de modo a propiciar boa observabilidade do modo de oscilação de interesse. De acordo com os fatores de observabilidade e controlabilidade e a infra-estrutura disponível o controle pode ser local ou remoto.

Se houver projeto de mais de um controlador para atuar em áreas diferentes, um pode sofrer interferência do outro, degradando o desempenho conjunto. Esta interferência pode ser eliminada com o projeto coordenado dos controladores ou pela centralização em um único controlador MIMO.

Nas seções seguintes são apresentadas as principais características de cada um dos tipos de controle e formas de projeto.

#### **4.2.1 Controle descentralizado**

Para elevar o amortecimento dos modos inter-áreas, pode ser necessário o projeto de sinais adicionais em mais de um regulador de tensão ou

equipamento FACTS do sistema. A estratégia baseada no uso de um controlador para cada um dos equipamentos envolvidos no amortecimento do modo de interesse considerando somente sinais locais na entrada dos controladores é denominada controle descentralizado.

Para o caso de equipamentos FACTS, que podem ser instalados em qualquer local de um sistema de transmissão, é preferível considerar a instalação em local adequado para melhorar o controle de tensão ou a capacidade de transmissão entre duas áreas, e ao mesmo tempo elevar o amortecimento das oscilações inter-áreas provocadas pela interligação dos dois subsistemas. Desta forma os sinais de entrada dos controladores serão obtidos localmente assim como o sinal de atuação não precisará ser enviado a um ponto de atuação remoto.

A utilização de controladores descentralizados evita uma série de problemas. O primeiro e mais relevante é a possibilidade de falhas na comunicação que poderiam deteriorar o desempenho, ou até mesmo eliminar a ação do controlador. Outra dificuldade, esta contornável, é a deterioração do desempenho devido ao atraso introduzido pela aquisição remota do sinal de entrada ou pelo envio do sinal de saída do controlador ao ponto de ação. Os atrasos podem ser considerados durante o projeto do controlador, mas a eficácia do sinal adicional pode ser comprometida devido à redução da velocidade de atuação sobre as perturbações no sistema.

Quando o recurso para o amortecimento de determinada oscilação é um equipamento já instalado no sistema, regulador de tensão ou FACTS, o PSS ou sinal adicional do equipamento FACTS podem não estar estrategicamente localizados e obrigatoriamente será requisitada a aquisição, ou envio, de sinais remotos para que o modo de interesse seja satisfatoriamente observável e controlável. Neste caso a estrutura do controlador é denominada quase descentralizada, e será apresentada na sequência.

Quando há mais que um controlador sendo projetado para atuação sobre determinado sistema, o projeto pode ser coordenado ou não coordenado, de acordo com o descrito nas seções 4.2.1.1 e 4.2.1.2, respectivamente.

#### **4.2.1.1 Projeto Não Coordenado**

O projeto não coordenado é aquele em que o projeto de vários controladores no mesmo sistema se dá de maneira sequencial considerando uma única entrada e uma única saída durante o projeto.

O fechamento das malhas subsequentes podem alterar a resposta dos controladores projetados anteriormente. Este problema é provocado pela in-

teração das diversas malhas de controle podendo provocar o aparecimento de modos de oscilação do controle conforme descrito na seção 2.2 (FARSANGI et al., 2003).

Este método deve ser aplicado preferencialmente à projeto de controladores robustos em que o desempenho do controlador é pouco alterado com as mudanças da planta.

#### 4.2.1.2 Projeto Coordenado

O principal objetivo do projeto coordenado de controladores é prevenir interações imprevistas entre a atuação destes controladores em diversas áreas (RAMÍREZ et al., 2002). Para cada malha de controle distinta, há uma função de transferência que representa com maior fidelidade uma fração diferente do sistema de potência. Como durante o projeto coordenado todas estas funções de transferência são levadas em consideração, todas as malhas de controle contribuem para a melhoria do desempenho das demais funções de transferência e para a melhoria do desempenho global do sistema.

Portanto, o projeto coordenado considera múltiplas plantas durante o projeto afastando o problema de interação adversa entre os controladores distribuídos pelo sistema (LIRIO; GOMES; WATANABE, 2007) e melhorando a estabilidade global do sistema.

#### 4.2.2 Controle quase descentralizado

O desempenho de uma malha de controle é ampliado quando, além de sinais locais, são utilizados sinais remotos na entrada do controlador. Esta configuração de controlador é denominada quase descentralizada (NADA, a).

Usualmente, PSS's utilizam sinais locais como entrada de controle. Devido à falta de flexibilidade na sua instalação e à falta de observabilidade de modos inter-áreas nos sinais locais, os PSS nem sempre são efetivos no controle de oscilações inter-áreas pouco amortecidas. Desta forma, equipamentos FACTS, que podem ser instalados em qualquer lugar do sistema, tem provado maior eficácia quando utilizados para melhora da estabilidade a pequenos sinais (XIE et al., 2004). O desempenho é ampliado quando é utilizada uma malha de controle suplementar com sinais remotos (BEGOVIC et al., 2005), (WESTERMANN; SAUVAIN, 2005), (TREHAN, 2002). A utilização de sinais remotos também melhora o resultado do controle das oscilações inter-áreas utilizando PSS. A vantagem da utilização de equipamentos FACTS é a possibilidade de se obter maior controlabilidade do modo de interesse devido à flexibilidade de instalação do dispositivo.

Ao utilizar um sinal remoto como entrada de um controlador, observam-se algumas diferenças básicas para o controlador com sinal de entrada local. Considerando métodos clássicos de projeto de controladores, quando o objetivo é minimizar uma oscilação inter-áreas, o ganho do controlador com sinal de entrada local é superior ao ganho do controlador que usa sinal remoto. Isso se deve ao fato de que o sinal local apresenta maior observabilidade de modos de oscilação locais. Sinais remotos escolhidos de maneira apropriada tem elevada observabilidade para os modos inter-áreas permitindo redução do ganho da malha de controle (SAMUELSSON et al., 2002), (SEETHALEKSHMI; SINGH; SRIVASTAVA, 2008).

Quando há necessidade de se melhorar o amortecimento de um modo local e de outro modo inter-áreas, utiliza-se uma solução de controle denominado hierárquico, onde o sinal de entrada do controlador é formado por uma composição do sinal local e do sinal remoto.

A utilização de controles hierárquicos reduz a dependência do sistema daquele controlador com sinal remoto de forma que, se houver falha de comunicação, o controlador continuará atuando a partir da leitura do sinal local.

Contudo, o problema do atraso na aquisição e envio de sinais remotos não pode ser sanado. Este atraso pode prejudicar o desempenho do controlador. Este problema deve ser contornado com a consideração do atraso durante as etapas de projeto do controlador (SNYDER et al., 2000), (HU; MILANOVIC, 2007), (CHAUDHURI; MAJUMDER; PAL, 2004).

A seguir é apresentada a solução disponível atualmente para aquisição de sinais remotos para o projeto de controladores, a medição fasorial (obtida de PMU - Phasor Measurement Unit). A medição fasorial permite a utilização de sinais remotos para a entrada dos controladores, possibilitando a obtenção de dados sincronizados do sistema. Esta facilidade permite o projeto de controladores mais eficazes no controle de oscilações com baixo amortecimento ou instáveis.

#### 4.2.2.1 PMU - *Phasor Measurements Units*

A solução amplamente difundida para obtenção de dados remotos sincronizados, tanto para a análise de ocorrências no sistema elétrico como para considerarmos como uma entrada em um controlador centralizado, são as PMU (*Synchronized Phasor Measurements Units*).

As PMU's são dispositivos de medição de tensões e correntes alternadas com uma referência temporal comum obtida através de sinais via satélite, (DOTTA, 2009). O primeiro protótipo, mais tarde utilizado para produção

comercial, foi desenvolvido pela universidade Virginia Tech em meados da década de 80 (PHADKE, 2002).

Em 1993, um experimento conduzido no estado da Califórnia nos Estados Unidos buscou a certificação da medição fasorial sincronizada (WILSON, 1994). Com as medidas de tensão e corrente em uma subestação, calculou-se, utilizando as equações consolidadas de fluxo de potência, tensão e ângulo em uma subestação a aproximadamente 320km da primeira e comparou-se o resultado calculado com o medido pelo sistema de medição fasorial sincronizado instalado nas duas subestações. As duas medidas produziram diferença média de  $0,46^\circ$ , o que aumentou a credibilidade das medições sincronizadas por GPS.

Dentre as aplicações de PMU estão (BURNETT R.O.; BUTTS; STERLINA, 1994), (LEIRBUKT et al., 2006):

- Medições de frequência e magnitude de grandezas elétricas como Corrente e Tensão;
- Estimação de estados;
- Registro de faltas e perturbações no sistema;
- Verificação de modelos computacionais do sistema de potência;
- Entradas de estabilizadores do sistema como PSS e controle secundário de equipamentos FACTS.

Apesar de ser um mecanismo de medição sincronizada, o atraso relativo ao envio dos dados ainda não pode ser eliminado. A vantagem das PMU, em um sistema de referência único, é a identificação do momento em que a medição foi tomada, possibilitando sincronização dos dados de entrada do controlador com o resto do sistema a qualquer instante devido as informações de tempo que acompanham a amostragem do sinal.

### 4.2.3 Controle Centralizado

O controle centralizado gera um sinal de controle a partir de uma visão global do sistema.

Um sistema de medição fasorial fornece informações geograficamente distantes para um controlador multivariável central que considera todos os dados de entrada e envia sinais de controle para diversos subsistemas.

A principal vantagem deste tipo de controlador refere-se ao uso de informação global do sistema, tornando-o robusto às variações da rede elétrica.

#### 4.2.4 Controle multi-níveis ou hierárquico

Neste caso há dois ou mais níveis de controle. Controladores em um nível recebem informações de controladores de um nível superior. Uma típica aplicação compreende um controlador local no primeiro nível e um controlador centralizado em um segundo nível.

Em sistemas de potência, enquanto o controlador local mitiga as oscilações locais o controlador centralizado o faz com as oscilações inter-áreas. As principais vantagens do controlador central em uma estrutura hierárquica são (DOTTA; SILVA; DECKER, 2007), (OKOU; DESSAINT; AKHRIF, 2005), (QUINTEIRO; VENKATASUBRAMANIAN, 2005):

- robustez quanto à perda de canais de comunicação;
- continuidade de operação, pelo controlador local, quando há perda do controle central;
- O uso de informação global do sistema, através do controle centralizado, torna o controlador robusto às variações da rede elétrica.

### 4.3 Modelagem do controle

Os sistemas elétricos de potência podem ser representados genericamente no espaço de estados na forma

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

e a estrutura do controlador

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

onde:

$w$ : entrada de perturbação;

$z$ : variáveis de saída da planta influenciadas pelo controlador;

$u, y_k$ : saída do controlador;

$y, u_k$ : variáveis de saída da planta medidas para entrada do controlador;

onde;

$x, x_k$ : variáveis de estado da planta e do controlador respectivamente.



Para obter a representação em espaço de estados do sistema realimentado considera-se o termo de realimentação direta  $D_{22}$  nulo. Especialmente em sistemas de potência esta consideração reflete a característica real da planta.

As matrizes  $B_1$  e  $C_1$  são matrizes de peso que determinam os objetivos do controlador  $H_\infty$  e devem ser especificadas somente quando o projeto do controlador busca a minimização da norma  $H_\infty$  do sistema controlado. O controlador e a norma  $H_\infty$  serão apresentados na seção 4.4.2.2.4

Com  $D_{22} = 0$ , a saída da planta conectada à entrada do controlador  $u_k = y$  e a saída do controlador conectada à entrada da planta  $u = y_k$ , temos

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ y \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

onde as matrizes  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$  e  $\hat{D}$  representam, no espaço de estados, o sistema realimentado e são calculadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \hat{A} &= \begin{bmatrix} A + B_2 D_k C_2 & B_2 C_k \\ B_k C_2 & A_k \end{bmatrix}, & \hat{B} &= \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_k C_2 \\ B_k D_{21} \end{bmatrix}, \\ \hat{C} &= [C_1 + D_{12} D_k D_{21} \quad D_{12} C_k], & \hat{D} &= [D_{11} + D_{12} D_k D_{21}]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

A função de transferência entre o sinal de entrada  $w$  e a saída  $z$  é dada por

$$\hat{G}(s) = \hat{C}(sI - \hat{A})^{-1} \hat{B} + \hat{D} \quad (4.5)$$

Sistemas elétricos de potência são compostos por milhares de variáveis de estados, o que torna a matriz  $A$  de grande dimensão e extremamente esparsa. Para a realização de estudos destes sistemas utilizam-se *software* projetados especificamente para este fim. Porém, os projetos de controladores modernos são realizados utilizando-se métodos de controle consagrados não ajustáveis às plantas. As plantas é que devem ser adaptadas para permitir o projeto de controladores com um determinado método.

*Software* específicos de projeto de controladores, ou até mesmo métodos de projeto, podem comportar-se de forma inadequada quando aplicados à plantas com elevado número de variáveis de estado. As dificuldades são:

- Tempo elevado de processamento;
- Obtenção de controladores com ordem elevada e de difícil implementação;

- Impossibilidade de projeto frente ao mal condicionamento da matriz de estados devido a presença de modos não controláveis e não observáveis.

Portanto, há necessidade de se reduzir o modelo do sistema elétrico de potência a um modelo equivalente com o número de estados adequado à capacidade dos *software* de projeto de controladores.

#### 4.3.1 Redução de Ordem de Sistemas

Para adequar a ordem do modelo de um sistema a ser controlado à capacidade dos programas computacionais para projeto de controladores, reduzir o tempo de projeto e evitar resultados de controladores com ordem elevada e de difícil implementação, aplicam-se aos sistemas de ordem elevada métodos de redução de ordem.

A maior parte das técnicas de redução de modelos de sistemas de potência são adaptadas à tarefa de projeto de controladores para análise de estabilidade transitória e para pequenas perturbações. A base para a variedade de ferramentas desenvolvidas para redução de modelos são conceitos como (CHANLOTIS; PAI, 2005):

- **Coerência:** Duas máquinas são coerentes se após alguma perturbação apresentam comportamento dinâmico similares. Neste método de redução de ordem, múltiplos geradores coerentes são agregados em uma única máquina equivalente (BRETAS; ALBERTO, 2000);
- **Sincronia:** Duas máquinas estão em sincronia se após alguma perturbação do sistema suas variações angulares são idênticas ou em proporção constante. Geradores que se movem de maneira síncrona podem ser combinados em uma máquina equivalente (RAMASWAMY et al., 1995);
- **Análise de perturbações singulares (*Singular perturbation analysis*):** Este método de redução é recomendado para sistemas que apresentam duas escalas de tempo distintas. Identifica-se as duas escalas de tempo e separa-se as variáveis para cada uma das constantes de tempo em dois subsistemas. O sistema com constante de tempo menor é utilizado para estudo de transitórios rápidos e aquele com constante de tempo maior é utilizado para estudos de situações quase estacionárias (CHOW et al., 1990);
- **Análise modal:** Se apenas uma parte do sistema completo é controlável e observável para uma determinada função de transferência, uma

alternativa para a representação do sistema é uma redução modal. Um sistema reduzido modal-equivalente é calculado a partir dos pólos dominantes da função de transferência e seus resíduos (ROMMES; MARTINS, 2006).

Para sistemas de potência com elevado número de estados (mais de 3000 para o SIN), somente uma parte dos estados apresenta elevada controlabilidade e observabilidade para os autovalores de interesse. Portanto, apesar de os outros métodos também se aplicarem à sistemas de potência, neste trabalho será utilizada a análise modal para obtenção de um modelo reduzido equivalente para o SIN.

Para a redução do sistema completo a um modelo equivalente, analisam-se principalmente os resíduos da função de transferência de interesse.

No caso de um sistema SISO-*Single Input Single Output* de autovalores distintos, a função de transferência de uma planta qualquer e sua fatoração são representadas como na equação (4.6), onde  $p_i$  são seus pólos e  $z_i$  representa seus zeros.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_l)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)} + D \quad (4.6)$$

A função pode ser expandida em suas frações parciais, como na equação (4.7), onde  $R_i$  são os resíduos de cada pólo.

$$G(s) = \frac{R_1}{s - p_1} + \frac{R_2}{s - p_2} + \cdots + \frac{R_n}{s - p_n} + D \quad (4.7)$$

A classificação decrescente dos resíduos indica quais os pólos do sistema têm melhor controlabilidade e observabilidade na função de transferência selecionada. Uma seleção natural dos pólos de interesse é a escolha daqueles que apresentam maior resíduo desprezando aqueles com resíduo pequeno. Porém, na representação do sistema, é mais importante considerarmos um modo pouco amortecido com resíduo desprezível do que um modo altamente amortecido com resíduo elevado (TRUDNOWSKI, 1994).

O algoritmo utilizado para a determinação dos pólos dominantes é denominado DPSE (*Dominant Pole Spectrum Eigensolver*) e é descrito em (MARTINS, 1997). Neste algoritmo o usuário determina as condições iniciais e a cada iteração o DPSE aproxima os valores iniciais dos pólos dominantes de qualquer sistema de ordem elevada.

Portanto, para a redução de ordem do sistema, calcula-se um conjunto de pólos e selecionam-se aqueles que apresentem maior resíduo, juntamente com aqueles pouco amortecidos, de modo que a resposta no tempo e em frequência reproduzam a resposta do sistema completo.

### 4.3.2 Modelagem de atrasos na transmissão dos sinais

Como discutido na seção 2.4, pode haver necessidade de consideração de um sinal remoto na entrada do controlador para garantir que o desempenho do sinal de controle melhore o amortecimento do modo de oscilação de interesse, por exemplo um modo inter-áreas que pode ser melhor controlável em um local e melhor observado em outro.

Para considerarmos os atrasos durante o projeto dos controladores, primeiro deve-se quantificar o valor do atraso para depois representá-lo adequadamente na planta a ser controlada.

O atraso introduzido pela transmissão de sinais varia de acordo com o meio físico utilizado. A Tabela 4.1 apresenta os atrasos típicos para diferentes meios de transmissão (NADUVATHUPARAMBIL; VALENTI; FELIACHI, 2002).

Tabela 4.1: Atraso associado à diferentes meios físicos de transmissão de sinais.

Meio Físico	Atraso Associado ( <i>ms</i> )
Fibra Óptica	100 - 150
Microondas digitais	100 - 150
PLC ( <i>Power Line Communication</i> )	150 - 350
Linha Telefônica	200 - 300
Satélite	500 - 700

Para que o controlador seja eficaz perante a presença dos atrasos, há necessidade de considerarmos o atraso durante o projeto do controlador.

Um atraso pode ser representado pela expressão (4.8). Utilizar esta representação de atraso introduz algumas inconveniências à planta a ser controlada. A principal é que um sistema em malha fechada com atraso tem dimensão infinita, infinitos pólos (VAJITA, 2000).

$$e^{-sT} \quad (4.8)$$

Para contornar este problema, utilizam-se métodos de aproximação

do atraso. O método mais utilizado para modelar o atraso no sistema é a aproximação de Padé (VAJITA, 2000).

A Tabela 4.2 apresenta as aproximações de Padé de baixa ordem para a representação do atraso (VAJITA, 2000).

Tabela 4.2: Representações do atraso através de aproximações de Padé de baixa ordem

Aproximação de Padé	Função de Transferência
$R_{1,1}$	$\frac{2-sT}{2+sT}$
$R_{1,2}$	$\frac{6-2sT}{6+4sT+(sT)^2}$
$R_{2,2}$	$\frac{12-6sT+(sT)^2}{12+6sT+(sT)^2}$

A Figura 4.1 ilustra e fornece subsídio para a escolha da função de transferência de baixa ordem que melhor representa os atrasos introduzidos no sistema devido à transmissão de sinais de entrada ou de saída dos controladores. A melhor representação do atraso é a  $R_{1,2}$ . O principal motivo para a escolha de  $R_{1,2}$  para representar o atraso nas plantas durante o projeto dos controladores está no fato de que quando submetido à um degrau a resposta no tempo no instante  $t = 0$  não apresenta um valor diferente de zero como nas funções de transferência com numerador e denominador de mesma ordem,  $R_{1,1}$  e  $R_{2,2}$ .

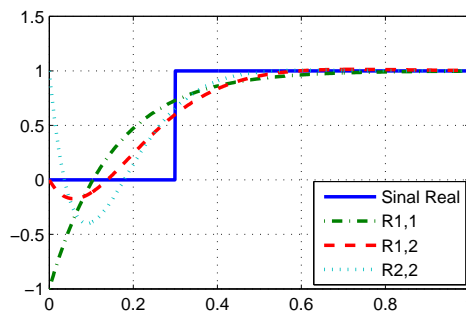


Figura 4.1: Resposta no tempo a um degrau em  $t=0$  com atraso de  $300ms$

Genericamente, no espaço de estados, podemos incluir o atraso na

entrada da planta de acordo com a equação aumentada (4.9). Já a planta com atraso na saída é representado no espaço de estados de acordo com a equação (4.10).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_{di} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & BC_{di} \\ 0 & A_{di} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{di} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BD_{di} \\ B_{di} \end{bmatrix} u_{di} \\ y &= \begin{bmatrix} C & DC_{di} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{di} \end{bmatrix} + DD_{di}u_{di} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_{do} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & o \\ B_{do}C & A_{do} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{do} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B_{do}D \end{bmatrix} u \\ y_{do} &= \begin{bmatrix} D_{do}C & C_{do} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{do} \end{bmatrix} + D_{do}Du \end{aligned} \quad (4.10)$$

Nas equações (4.9) e (4.10), os índices subscritos  $di$  e  $do$  fazem referência à representação do atraso na entrada ou na saída do sistema de controle, respectivamente, onde as matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  com índices  $di$  ou  $do$  são a representação no espaço de estados da função de transferência  $R_{1,2}$ .

Para compormos um sistema que considere atraso na entrada e na saída da planta, como é o caso de controladores centralizados, deve-se substituir o sistema com atraso na entrada (4.9) nas equações do sistema com atraso na saída (4.10). Assim, obtém-se o sistema com atraso modelado na entrada e saída de acordo com as matrizes de estado mostradas na equação (4.11).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_{di} \\ \dot{x}_{do} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & BC_{di} & 0 \\ 0 & A_{di} & 0 \\ B_{do}C & B_{do}DC_{di} & A_{do} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{di} \\ x_{do} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BD_{di} \\ B_{di} \\ B_{do}DD_{di} \end{bmatrix} u_{di} \\ y_{do} &= \begin{bmatrix} D_{do}C & B_{do}DC_{di} & C_{do} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{di} \\ x_{do} \end{bmatrix} + D_{do}DD_{di}u_{di} \end{aligned} \quad (4.11)$$

#### 4.4 Métodos de Projeto de Controladores

Os estudos de controle remetem a diferentes métodos de projeto. Para cada método são levados em consideração diferentes requisitos para estabelecer a função objetivo do projeto. Independente do objetivo do controlador,

um sistema com realimentação de saídas é genericamente representado pelo diagrama de blocos da Figura 4.2. À planta  $G$  é aplicada uma perturbação  $w$  e o sinal de saída do controlador  $u$ .  $y$  representa o que é mensurado e utilizado como entrada do controlador  $K$  e  $z$  é uma saída do sistema realimentado constituída por variáveis influenciadas pelo controlador (MACKENROTH, 2004).

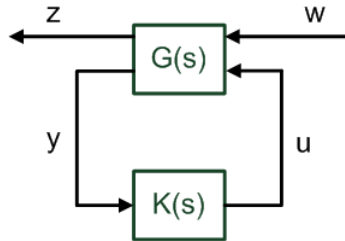


Figura 4.2: Sistema realimentado.

O objetivo de um controlador  $K$  é fazer com que as saídas  $z$  de uma planta qualquer  $G$  comportem-se de uma forma pré determinada manipulando as entradas  $u$  desta mesma planta. Para esta finalidade, vários métodos de projeto podem ser utilizados para obtenção de um controlador  $K$  que projete as saídas da planta para o seguimento de uma referência.

Para modos de oscilação pouco amortecidos, podem ser incorporados controladores adicionais aos equipamentos disponíveis no sistema para prover amortecimento a estes modos específicos. Neste trabalho explora-se o projeto de sinais adicionais para dispositivos FACTS para prover amortecimento aos modos de oscilação pré-selecionados.

Para o projeto podem ser utilizados vários métodos de controle. Esta seção apresenta os métodos de posicionamento de pólos e projeto de controles robustos com otimização de índices de robustez.

#### 4.4.1 Posicionamento de pólos

Históricamente, foram desenvolvidos diversos métodos de projeto através de posicionamento de pólos para melhoria da estabilidade de sistemas de potência. Alguns deles são apresentados em (ELANGOVAN; LIM, 1987), (GOOI et al., 1981), (LEFEBVRE, 1983), (REDDY et al., 2011) e (FERRAZ; MARTINS; TARANTO, 2001).

Neste trabalho será utilizado uma generalização do método de posicionamento de pólos que considera os critérios de estabilidade de Nyquist com

a consideração de um requisito de amortecimento para o modo de oscilação de interesse.

O método convencional para projeto de controladores a partir dos critérios de estabilidade de Nyquist é baseado no diagrama polar de  $G(j\omega)$  com frequência variando de  $-\infty$  a  $\infty$ . No método convencional o amortecimento desejado não é um parâmetro do projeto. O projeto de controlador utilizando o diagrama de Nyquist convencional produz avanço ou atraso de fase acima do necessário para frequências complexas mais amortecidas, causando redução da frequência de oscilação do pólo de interesse do sistema original sem assegurar amortecimento mínimo ao sistema compensado (GOMES; MARTINS; PINTO, 1998).

Uma generalização do diagrama de Nyquist é apresentada em (GOMES; MARTINS; PINTO, 1998) e (GUIMARÃES et al., 2000). Esta generalização apresenta o traçado do diagrama de Nyquist considerando uma reta de fator de amortecimento constante. Ou seja, é baseado no diagrama polar de  $G(\sigma + j\omega)$  que varia sobre uma linha com amortecimento constante. Portanto, o amortecimento desejado é especificado durante o procedimento de projeto do controlador.

A Figura 4.3 indica quais os valores de  $s$  são considerados na função de transferência  $G(s)$  para o traçado do diagrama de Nyquist clássico ( $s = j\omega$ ) e o generalizado ( $s = \sigma + j\omega$ ). Observa-se que, para que haja envolvimento do semi plano a direita do eixo imaginário, o raio do semi círculo desenvolvido é  $R = \infty$ .

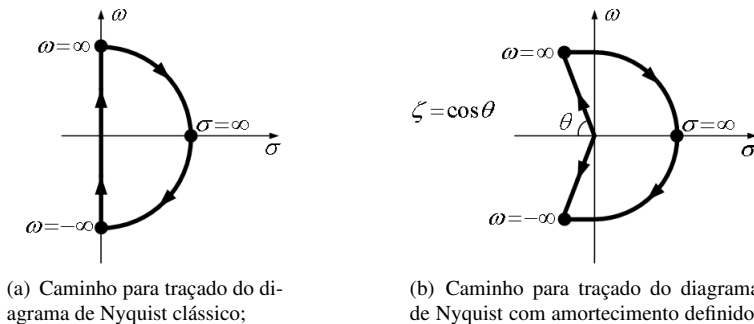


Figura 4.3: Caminho para traçado do diagrama de Nyquist.

O posicionamento parcial de pólos é feito adicionando-se uma reali-



mentação de saída com blocos do tipo avanço-atraso de fase. A finalidade desta operação é deslocar os pólos que conferem comportamento inadequado ao sistema para uma posição mais adequada. Ou seja: deslocar os pólos que causam instabilidade ou oscilações subamortecidas (GUIMARÃES et al., 2000).

Se particularizarmos o sistema representado na Figura 4.2, desprezando a perturbação  $w$  e considerando que  $y$  é a realimentação do controlador e também a saída do sistema influenciada pelo controlador, temos o diagrama indicado na Figura 4.4.

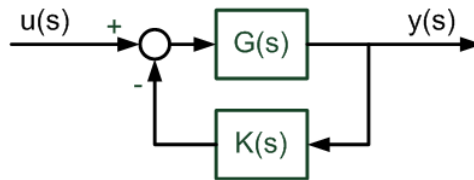


Figura 4.4: Sistema realimentado

Para que a função de transferência  $y(s)/u(s)$  equivalente tenha um par de pólos complexos nas posições  $s = \sigma \pm j\omega$ , o denominador daquela função de transferência deve ser nulo nesta frequência como mostra a equação (4.12).

$$1 + G(s)K(s) = 0 \text{ ou } G(s)K(s) = -1 \quad (4.12)$$

Sendo assim, o projeto de  $K(s)$  deve atender às duas condições descritas em (4.13).

$$\angle G(s)K(s) = 180^\circ \quad (4.13a)$$

$$|G(s)K(s)| = 1 \quad (4.13b)$$

A função de transferência do controlador que confere avanço ou atraso de fase ao sistema assume a forma indicada na equação (4.14).

$$K(s) = k \left( \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts} \right)^n \quad (4.14)$$

Quando  $\alpha$  é maior que 1 tem-se um bloco de avanço de fase. Quando  $\alpha$  estiver entre 0 e 1 o sistema compensado sofrerá atraso de fase.

A solução da equação (4.13a) define se o controlador terá função de avanço ou atraso de fase.

O expoente  $n$  do controlador é diferente de 1 quando a necessidade de compensação de fase do controlador é elevada. Isso se deve ao fato de o ângulo de compensação de um bloco de avanço-atraso ser limitado a aproximadamente  $60^\circ$ .

Se considerarmos o controlador apresentado na equação (4.14) para o atendimento às condições descritas nas equações (4.13a) e (4.13b), obteremos os parâmetros do controlador como indicado a seguir:

1. Primeiramente especifica-se o valor de amortecimento  $\zeta$ .
2. A partir do amortecimento e da frequência  $\omega$  do modo instável ou subamortecido que o controlador deverá atuar, determina-se a posição desejada para o pólo  $s = \sigma + j\omega$  do sistema compensado. Como já conhecemos a frequência  $\omega$  da nova posição do pólo, resta calcular o valor da parte real do polo de acordo com a equação (4.15).

$$\sigma = \frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\omega \quad (4.15)$$

3. Conhecendo  $\sigma$ , determina-se a compensação de fase  $\phi$  necessária para atender à restrição da equação (4.13a). Se  $|\phi|$  for menor que  $60^\circ$ , então fazer  $n=1$ . Se for superior determina-se o valor de  $n$  para que cada bloco contribua na fase do sistema compensado com avanço ou atraso inferior a  $60^\circ$ .
4. A partir de então têm-se as seguintes expressões para o cálculo de  $T$  e  $\alpha$  (GUIMARÃES et al., 2000).

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.16)$$

$$\alpha = \frac{1}{k_2 T^2 \omega_c^2} \quad (4.17)$$

onde:

$$a = k_2 \omega \omega_c^2 (k_1 \tan \phi + 1)$$

$$b = k_2 (\omega_c^2 + \omega^2) \tan \phi$$

$$c = (k_1 \tan \phi - 1) \omega$$

$$k_1 = \frac{\sigma}{\omega}$$

$$k_2 = 1 + k_1^2$$

$\omega_c =$  frequência onde há máximo avanço ou atraso de fase  
caso considere-se diferente de  $\omega$ . Ver Figura 4.5

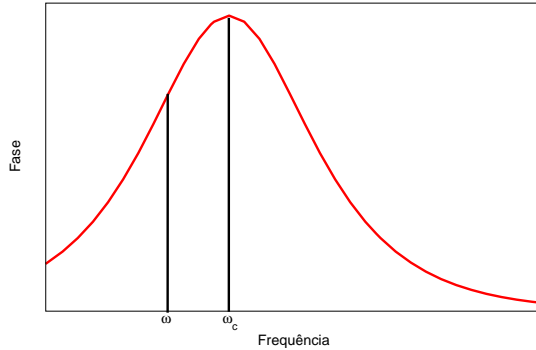


Figura 4.5: Diagrama de fase de um bloco de avanço de fase.

5. Obtidos  $T$  e  $\alpha$  a partir da solução das equações (4.15), (4.16) e (4.17), para a última etapa do projeto do controlador basta recorrermos à condição de módulo da expressão (4.13b) para o cálculo do valor do ganho  $k$  do controlador da equação (4.14).

#### 4.4.1.1 Implementação do método de posicionamento de pólos no Matlab

O método descrito está implementado no PacDyn. Porém, no PacDyn não há possibilidade de representarmos o atraso na obtenção de sinais remotos. Portanto, o método foi implementado no Matlab com a consideração dos atrasos previstos na planta. O código do Matlab é reproduzido na Tabela 4.4.1.1.

Tabela 4.3: Código do Matlab para o projeto de controladores por posicionamento de pólos.

<pre> % Especificações para o controlador  % amortecimento especificado qsi = .50; % frequência de corte do controlador wcorte = 2.3;  % sistema reduzido via PacDyn Reduzido_PacDyn; sist = ss(Ar,Br,Cr,D);  % Inserção do atraso s = tf('s'); % Define tempo de atraso Td = 0.3; % Define a (1,2) Padé approximant (6 - 2 * Td * s) / (6 + 4 * Td * s + (Td * s)^2); pd = ss(pd_);  % Inclusão do atraso Td no sinal de entrada na_sist = max(size(sist.a)); na_pd = max(size(pd.a));  Ad = [sist.a zeros(na_sist, na_pd)       (pd.b * sist.c) pd.a];  Bd = [sist.b       (pd.b * sist.d)];  Cd = [(pd.d * sist.c) pd.c];  Dd = pd.d * sist.d;  sist_di = ss(Ad, Bd, Cd, Dd);  % Filtro wash out wout = tf([30], [31]); sist_wo = sist_di * wout; sist_wo = sist_di;  % modo pouco amortecido modo_instavel = -.044969 + 2.3005 * i; wd = imag(modo_instavel); % sigma compensado (corresponde ao amortecimento % especificado e a frequência do modo) sigd = ((-qsi) / (sqrt(1 - (qsi)^2))) * wd; modo_desejado = complex(sigd, wd); </pre>	<pre> % máximo avanço ou atraso por bloco % 50 graus = 0,87 radianos % 60 graus = 1,047 radianos angulo_limite = .87;  % angulo fi a ser compensado fi = evalfr(sist_wo, modo_desejado); fi = pi - angle(fi); if abs(fi) &gt; angulo_limite     n = 2;     fiaux = fi/2;     if abs(fiaux) &gt; angulo_limite         n = 3;     else         n = 1;     end end fi = fi/n; % cálculo de alpha e T k1 = sigd/wd; k2 = 1 + k1^2;  a = k2 * wd * (wcorte)^2 * (k1 * tan(fi) + 1); b = k2 * (wcorte^2 + wd^2) * tan(fi); c = (k1 * tan(fi) - 1) * wd;  T = (-b + sqrt(b^2 - 4 * a * c)) / (2 * a);  alpha = (1) / (k2 * (T^2) * (wcorte^2));  % Cálculo do ganho K do controlador H = tf([alpha * T 1], [T 1]); H1 = H^n;  compensado_malha_aberta = sist_wo * H1; aux1 = evalfr(compensado_malha_aberta, modo_desejado); K = 1 / (abs(aux1));  % equação final do controlador H2 = K * H1;  % malha realimentação realimenta = H2 * wout; sist_cont = feedback(sist_di, realimenta); </pre>
---	---

#### 4.4.2 Projeto por Otimização de Parâmetros

As técnicas de controle moderno permitem a otimização dos sistemas de controle com consideráveis ganhos para robustez do sistema. A otimização de índices de desempenho é uma forma de projeto de controladores que, dependendo do índice, pode elevar os níveis de robustez do sistema.

Esta seção apresenta índices de desempenho que posteriormente serão

otimizados durante o projeto de controladores robustos, para comparação com o método clássico de alocação de pólos.

#### 4.4.2.1 Medida de Robustez de Sistemas Controlados

Métodos clássicos de controle consideram a estabilização como principal requisito de projeto. A simples estabilização do sistema não garante comportamento adequado diante de contingências. A seguir são definidas alguns índices que expressam quão robusto é um sistema a contingências e que, quando considerados na função objetivo do projeto de controladores, buscam garantir comportamento adequado do sistema durante contingências.

**Definição 1.** *Considera-se o espectro de  $A$  o conjunto de autovalores desta matriz, denotado  $\Lambda(A)$ .*

**Definição 2.** *A abscissa espectral de  $A$ ,  $\alpha(A)$ , é definida como a maior parte real do espectro de  $A$ .*

$$\alpha(A) = \sup \{\operatorname{Re} \lambda : \lambda \in \Lambda(A)\} \quad (4.18)$$

**Definição 3.** *O  $\varepsilon$ -pseudo-espectro  $\Lambda_\varepsilon(A)$  de uma matriz  $A$  é o subconjunto do plano complexo que corresponde a todos os autovalores de todas as matrizes complexas distantes  $\varepsilon$  de  $A$  (BURKE; LEWIS.; OVERTON, 2003) (TREFETHEN; EMBREE, 2005).*

$$\Lambda_\varepsilon(A) = \{z \in \mathbb{C} : z \in \Lambda(X) \text{ onde } \|X - A\| \leq \varepsilon\}, \quad (4.19)$$

o que é equivalente a

$$\Lambda_\varepsilon(A) = \left\{ z \in \mathbb{C} : \left\| (z - A)^{-1} \right\| > \varepsilon^{-1} \right\}. \quad (4.20)$$

A distância do sistema à instabilidade corresponde ao menor  $\varepsilon$  para o qual o limite do pseudo-espectro toca o eixo imaginário (TREFETHEN; EMBREE, 2005). A Figura 4.6 ilustra o fato.

**Definição 4.**  *$\varepsilon$ -abscissa pseudo-espectral,  $\alpha_\varepsilon$ , é a maior parte real do  $\varepsilon$ -pseudo-espectro como representa a equação (4.21).*

$$\alpha_\varepsilon(A) = \sup \{\operatorname{Re} z : z \in \Lambda_\varepsilon(A)\} \quad (4.21)$$

**Definição 5.** *Sendo  $M^n$  o espaço de matrizes complexas com dimensão  $n \times n$ ,*

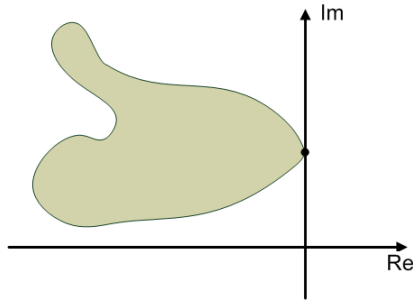


Figura 4.6: Distância da instabilidade

tem-se que o raio de estabilidade da matriz  $A$ ,  $\beta(A)$ , é dado por:

$$\beta(A) = \min \{ \|X - A\| : X \in M^n, \alpha(X) \geq 0 \}, \quad (4.22)$$

onde  $\alpha(X)$  representa a abscissa espectral da matriz  $X$  (BURKE; LEWIS; OVERTON, 2003).

Outra forma de representar o raio de estabilidade da matriz  $A$  é apresentado em (BURKE; LEWIS; OVERTON, 2003) e reproduzido na equação (4.23).

$$\beta(A) = \min_{z \in \mathbb{C}} \{ \underline{\sigma}(A - zI) : \text{Re}(z) \geq 0 \} \quad (4.23)$$

Em (4.23),  $\underline{\sigma}$  denota o menor valor singular de uma matriz.

Simplificando, o raio de estabilidade de  $A$  é a norma dois da menor matriz de perturbação  $E = X - A$  que torna  $A$  instável.

$$\beta(A) = \min \{ \|E\| : A + E \text{ é instável} \} \quad (4.24)$$

#### 4.4.2.2 Índices de Desempenho

Para o projeto de controladores distintos daqueles estabelecidos nos métodos clássicos, a partir das medidas de robustez apresentados na seção 4.4.2.1, determinam-se índices de desempenho para incorporação aos critérios de projeto.

##### 4.4.2.2.1 Estabilização

A forma mais simples de projeto de controlador é estabelecer que o único requisito para o sistema compensado deva ser a estabilidade. Com este

critério de projeto não se impõe nenhum requisito de robustez ou garantia de amortecimento mínimo a ser assegurado pelo controlador. Ou seja, com este tipo de controlador não há nenhuma medida de quão suscetível o sistema está à perda de estabilidade na ocorrência de perturbações, inclusive na ocorrência de pequenas perturbações.

#### 4.4.2.2 Abcissa espectral

Um controlador que minimize a abscissa espectral tem como objetivo estabilizar uma planta e afastar o máximo possível do eixo imaginário, para a esquerda, os pólos do sistema compensado.

A minimização da abscissa espectral também não é condição suficiente para afirmar que o controle é robusto.

Uma matriz  $A$  é estável se seus autovalores pertencem a um subconjunto do plano- $s$  à esquerda do eixo imaginário. Autovalores distantes do eixo imaginário, obtido mediante a minimização da abscissa espectral, não fornece uma condição suficiente para garantir que  $A$  está distante da instabilidade, a não ser que  $A$  seja normal ou próxima da normalidade.

**Definição 6.** *Uma matriz é normal se os seus autovetores formam um conjunto ortogonal.*

*Uma matriz normal possui a propriedade de que existe uma transformação unitária que a torna diagonal sendo que um autovetor à esquerda desta matriz também é um autovetor à direita. Como ilustrado na Figura 4.7, têm-se que o pseudo-espectro de uma matriz normal é formado por círculos concêntricos em torno dos autovalores e um autovalor estável não se aproxima de maneira desordenada do eixo imaginário como em uma matriz não normal.*

Se a matriz  $A$  é estável e não normal, pode existir uma perturbação  $\epsilon$  que provoque a aproximação desordenada dos autovalores ao eixo imaginário do plano complexo, provocando inclusive, em alguns casos, transposição do pólo para o plano direito do eixo imaginário causando instabilidade do sistema.

Portanto, a abscissa espectral não é uma medida de robustez. Ela indica simplesmente que, para sistemas estáveis, os pólos estão afastados o máximo possível do eixo imaginário.

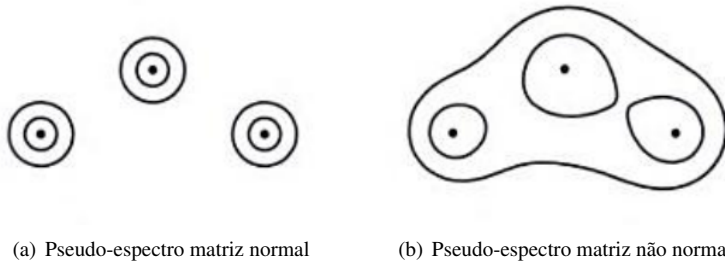


Figura 4.7: Pseudo espectro de uma matriz normal e de uma matriz não normal.

#### 4.4.2.2.3 Abscissa pseudo-espectral

Para certas aplicações, a análise exclusiva dos autovalores pode conduzir à conclusões precipitadas acerca da robustez e do condicionamento de uma matriz. Surge então a definição do pseudo-espectro. A vantagem da análise do pseudo-espectro sobre a análise dos autovalores é que ele é capaz de capturar o comportamento do sistema durante transitórios (TREFETHEN; EMBREE, 2005). Isto ocorre porque o pseudo-espectro é uma medida da variação dos autovalores quando o sistema é perturbado.

A trajetória de um autovalor, por mais distante que esteja do eixo imaginário, pode aproximar-se rapidamente da instabilidade quando o sistema sofre uma perturbação. A análise dos autovalores não é capaz de mostrar este comportamento, exceto quando o índice que está sendo analisado é o pseudo-espectro.

Para o projeto de um controlador que considere a minimização da abscissa pseudo-espectral, deve-se determinar qual a perturbação máxima  $\varepsilon$  a qual o sistema estará sujeito para que a minimização da função objetivo determine um controlador que afaste o máximo possível os autovalores do sistema compensado do eixo imaginário, considerando a capacidade de absorver a perturbação indicada como requisito de projeto sem instabilizar a planta.

Diferente da minimização da abscissa espectral, a minimização da abscissa pseudo-espectral, afasta o máximo possível os autovalores do eixo imaginário garantindo a capacidade de absorver pelo menos uma determinada perturbação  $\varepsilon$  pré estabelecida.

#### 4.4.2.2.4 Norma $H_\infty$



O controle  $H_\infty$  foi formulado na década de 80 por G. Zames como um método de otimização no domínio da frequência para projeto de controladores robustos (STEFANI et al., 1994).

A norma  $H_\infty$  de uma função de transferência SISO,  $G_{SISO}(j\omega)$ , representa, no plano complexo, a distância entre a origem e o ponto mais distante do diagrama de Nyquist desta função. Ela também quantifica o maior pico da magnitude do diagrama de Bode. Isto significa que a norma  $H_\infty$  representa o maior ganho de magnitude que um sinal de entrada pode ter na saída. Para o caso MIMO, a norma  $H_\infty$  representa o maior valor singular da função de transferência  $G_{MIMO}(j\omega)$  considerando diferentes frequências  $\omega$ . A norma  $H_\infty$  pode ser estimada como descrito em (ZHOU; DOYLE; GLOVER, 1996).

Para a estimação da norma  $H_\infty$ , determina-se uma extensa sequência de frequências próximas uma das outras

$$\{\omega_1, \dots, \omega_N\}.$$

Então, uma estimativa para  $\|G\|_\infty$  é

$$\max_{1 \leq k \leq N} \bar{\sigma}\{G(j\omega_k)\}, \quad (4.25)$$

onde  $\bar{\sigma}$  denota o maior valor singular da função de transferência.

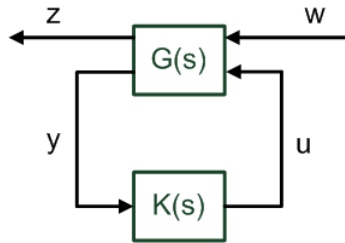


Figura 4.8: Sistema realimentado.

Para o sistema realimentado reproduzido na Figura 4.8 a estimativa da norma  $H_\infty$  é obtida a partir da escolha do vetor de frequências próximas uma das outras, como determinado para a equação (4.25), substituindo-as na expressão (4.26).

$$\|\hat{G}\|_\infty = \max_{1 \leq k \leq N} \bar{\sigma}\left(\hat{C}(j\omega I - \hat{A})^{-1}\hat{B} + \hat{D}\right) \quad (4.26)$$

Como a função de transferência expressa em (4.5) representa a relação entre a entrada  $w$  de perturbação e a saída  $z$  controlada, o objetivo do controlador é reduzir a norma infinita da função de transferência entre estes vetores.

Na modelagem apresentada na seção 4.3, reproduzida na equação (4.27), durante o projeto de controladores, normalmente a matriz  $B_1$  é considerada nula ou simplesmente desprezada. Esta consideração não é válida para projeto de controladores que visem a minimização da norma  $H_\infty$ . A matriz  $B_1$  é considerada a matriz de peso sobre as variáveis e estados e determina os objetivos do controlador.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Para determinação da matriz  $B_1$  leva-se em consideração que modos de oscilações inter-áreas estão associados a grupos de máquinas de uma área oscilando fora de fase com grupos de máquinas de outra área. A escolha natural da matriz  $B_1$  consiste em elevar o peso de entradas de perturbação que mais excitam os estados que representam estes grupos de máquinas.

Em um modelo reduzido nem sempre é possível identificar qual grandeza, local, máquina ou equipamento um estado representa. As entradas de perturbação com significado físico que mais excitam a oscilação pouco amortecida de interesse também não são identificáveis.

Para contornar a falta de informação sobre os estados, os fatores de participação indicarão quais estados mais afetam o modo de oscilação de interesse e estes fatores podem ser utilizados como matriz de peso  $B_1$ . Esta escolha é efetiva para o método de controle quando o sistema é representado na forma canônica de Jordan. Na forma canônica de Jordan, cada elemento da matriz de perturbação  $w$  atua exclusivamente sobre a variação de um determinado estado  $\dot{x}$ .

A matriz  $B_1$  não é dotada de significado físico. Ela representa uma perturbação fictícia sobre os estados que mais excitam o modo de interesse. Desta forma o objetivo do controlador passa a ser a minimização da influência da perturbação destes estados na saída da planta.

A matriz  $C_1$  informa sobre quais saídas o controlador deve atuar. Para que o controlador atue sobre todas as saídas da planta reduzida, simplesmente reproduzimos em  $C_1$  a matriz  $C_2$  de saída.

O projeto de um controlador que considere a norma  $H_\infty$  como medida de robustez deve buscar a minimização desta norma, isto porque a norma  $H_\infty$

de uma matriz estável também está relacionada ao pseudo-espectro. A norma será inferior ao inverso de  $\varepsilon$  como será mostrado na equação 4.28.

#### 4.4.2.5 Raio de Estabilidade

O termo raio de estabilidade foi introduzido por Hinrichsen e Pritchard em 1986. Designa a distância da instabilidade e tem recebido atenção na teoria de controle desde então (TREFETHEN; EMBREE, 2005).

Como o raio de estabilidade e a norma  $H_\infty$  de um sistema com função de transferência  $G(s)$  e matriz de estados  $A$  estável se relacionam com o pseudo-espectro de acordo com a equação (4.28) (BURKE; LEWIS.; OVERTON, 2003), naturalmente explica-se a necessidade de estudo da distância da estabilidade ou raio de estabilidade.

$$\alpha_\varepsilon(A) < 0 \Leftrightarrow \beta(A) > \varepsilon \Leftrightarrow \|G\|_\infty < \frac{1}{\varepsilon} . \quad (4.28)$$

#### 4.4.2.3 Método de otimização

Para o projeto de controladores ótimos, são formadas funções objetivo com os índices de desempenho desejados e suas restrições. Esta função objetivo é submetida a um método de otimização que apresentará a solução mais próxima do ótimo que sua capacidade permitir.

Quando busca-se a otimização de qualquer um dos índices de robustez apresentados na seção 4.4.2.2 tem-se um problema de otimização não convexa e não suave (BURKE; HENRION; LEWIS, 2006).

O método de busca de alguns métodos de otimização não tem capacidade de lidar com funções não convexas e não suaves, principalmente as não suaves. Para resolver os problemas com estas características é proposto em (BURKE; HENRION; LEWIS, 2006) um algoritmo híbrido que combina os métodos Quase-Newton (BFGS), o método do Feixe e o método do gradiente amostrado.

- **Quase-Newton BFGS:** é o método utilizado na fase inicial para prover uma estimativa para um mínimo local. O algoritmo é robusto e, quando utiliza-se um método de busca linear adequado, apresenta taxa de convergência superlinear (NOCEDAL; WRIGHT, 1999);
- **Método do Feixe:** é um método apropriado para funções convexas e não suaves (SAGASTIZÁBAL; SOLODOV, 2005) que neste algoritmo híbrido é utilizado para verificar a otimalidade local para o melhor ponto encontrado pelo método Quase-Newton BFGS;

- **Gradiente Amostrado:** se os métodos Quase-Newton BFGS e do feixe não forem bem sucedidos, o método do gradiente amostrado é utilizado para encontrar uma solução ou para refinar o mínimo local determinado pelos demais métodos. Os resultados mostram que o método do gradiente amostrado é apropriado para determinação de mínimos de funções não convexas e não suaves (BURKE; LEWIS; OVERTON, 2005).

O algoritmo híbrido proposto não se afasta da convergência devido à inexistência do gradiente da função objetivo em algum ponto excepcional. Os métodos do Feixe e do Gradiente Amostrado são responsáveis por encontrar outro ponto na proximidade desta descontinuidade com a norma da função objetivo reduzida (BURKE; HENRION; LEWIS, 2006).

#### 4.4.2.4 HIFOO (*H-Infinity Fixed Order Optimization*)

O **HIFOO** é um aplicativo de domínio público desenvolvido para utilização como ferramenta do *software* Matlab. O aplicativo busca solucionar um problema de otimização local que consiste na estabilização de sistemas utilizando controladores de ordem fixa. (BURKE; HENRION; LEWIS, 2006).

O pacote HIFOO oferece as seguintes opções de função objetivo:

- Minimização da norma  $H_\infty$ ;
- Maximização do raio de estabilidade;
- Minimização da abscissa espectral;
- Minimização da abscissa pseudo-espectral.

O *software* **HIFOO** permite que um controlador de ordem fixa seja obtido de maneira individual para qualquer malha de controle ou, caso haja mais de uma malha de controle de interesse, permite o projeto dos controladores de maneira coordenada.

Utiliza-se o **HIFOO** para realizar a otimização dos índices apresentados na seção 4.4.2.2.

O método de otimização utilizado pelo **HIFOO** é o método híbrido apresentado na seção 4.4.2.3.

## 4.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas diversas estruturas de controladores que podem ser aplicadas a sistemas de potência discutindo a melhoria da

observabilidade de um modo de controle proporcionada pelos sinais remotos em comparação com sinais locais. A utilização de sinais remotos demanda a modelagem dos atrasos na transmissão destes sinais.

Além do atraso na utilização de sinais remotos, o controle de sistemas de potência tem outra característica intrínseca que deve ser contornada para o projeto de controladores: sua dimensão. Para evitar problemas como o elevado custo computacional para o projeto de controladores, os sistemas devem ser reduzidos para posterior aplicação dos métodos de projeto de controladores.

Também foram apresentados neste capítulo os métodos de projeto por posicionamento de pólos e por otimização de parâmetros que serão explorados neste trabalho. São definidas medidas de robustez para comparação dos métodos de projeto.

Por último define-se o método de otimização híbrido que se adapta às características não convexas e não suaves dos projetos por otimização de parâmetros.

No próximo capítulo serão exploradas as peculiaridades da aplicação dos métodos de controle listados à controles suplementares de equipamentos FACTS do SIN.



## 5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CONTROLE AO SIN

### 5.1 Introdução

Apresentados os métodos de projetos, os formatos dos controladores, as características das malhas secundárias de controle de reguladores de tensão e de equipamentos FACTS, busca-se aplicar estes conceitos ao Sistema Interligado Nacional.

A proposta deste trabalho é avaliar o efeito da instalação de malhas de controle secundária nos equipamentos FACTS em operação no sistema sobre o amortecimento do SIN. O projeto dos controladores propostos busca a otimização de índices de robustez do sistema.

Da seção 4.4 serão adotados os seguintes métodos de projeto para a malha complementar de controle:

- Otimização de índices de desempenho
  - Minimização da Abscissa Espectral;
  - Minimização da norma  $H_{\infty}$ ;
- Posicionamento de Pólos.

Os resultados serão comparados considerando-se o desempenho sob contingência e através de análise de robustez que considera o pseudo-espectro como indicador.

Este capítulo apresenta uma explanação de como os métodos de projeto serão aplicados ao SIN. É feita uma breve introdução ao Sistema Interligado Nacional apresentando suas características e qual é o modo de oscilação de interesse neste trabalho. A partir de então é determinado qual dos equipamento FACTS já instalados no SIN será utilizado para mitigar as oscilações do modo alvo e qual será o grandeza, remota ou local, de entrada para o controle amortecedor atuando através do dispositivo escolhido. Também neste capítulo é explicado o método para determinação das matrizes de peso para o projeto que considera a minimização da norma  $H_{\infty}$ . Para a análise de robustez, fica definido quais são as principais contingências que devem ser aplicadas ao SIN e a forma de análise do pseudo-espectro como medida de robustez.

### 5.2 Sistema Interligado Nacional

Para a realização dos estudos propostos buscam-se os bancos de dados para análise de transitórios eletromecânicos e de estabilidade a pequenos

sinais disponíveis no site do ONS. Enquanto os modelos de estudos de transitórios estão disponíveis para o horizonte de quatro anos a frente, que são os horizontes do PAR (Plano de Ampliação e Reforços), os dados para estudos de estabilidade a pequenos sinais estão disponíveis somente para o cenário atual.

Em dezembro de 2008, início dos estudos, a base de dados para estudos de estabilidade a pequenos sinais mais atual disponível no site do ONS era de setembro de 2008. Portanto, para os estudos subsequentes, utiliza-se o cenário de carga elevada de setembro de 2008, disponível no site do ONS (ONS, 2010b). Portanto, quando o texto fizer referência ao SIN, considera-se o cenário de carga elevada de setembro de 2008.

A Tabela 5.1 apresenta os dados de constituição do SIN.

Tabela 5.1: Dimensão do Sistema Interligado Nacional.

Grandeza	Quantidade
Barras	3757
Linhas	5299
Equipamentos FACTS	16
Variáveis de Estado	3300
Variáveis Algébricas	19007
Dimensão da Matriz Jacobiana	23843

As análises realizadas neste trabalho têm enfoque na estabilidade para pequenas perturbações e na robustez do SIN.

Os modos de interesse no presente estudo serão os modos N-S (Norte-Sul) e N-NE (Norte-Nordeste). Para a condição de operação do banco de dados disponível no site do ONS, a Tabela 5.2 apresenta numericamente o modo N-S e a Figura 5.1 representa graficamente este modo através de seus *Mode-Shapes*.

Tabela 5.2: Modo de Oscilação N-S.

Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
$-0,3931 \pm j2,2459$	17,24%	0,36Hz

Para não realizar estudos e análises sobre um sistema que apresenta elevado amortecimento para o modo de oscilação de interesse, foram realizadas algumas mudanças que tornaram o modo menos amortecido.



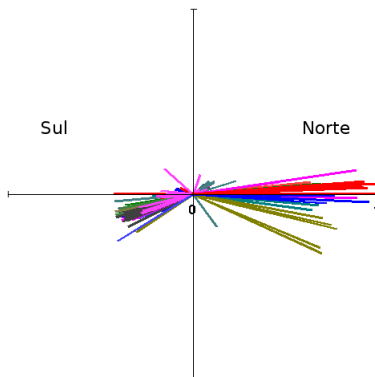


Figura 5.1: *Mode-Shapes* do modo inter-áreas N-S.

Adequou-se o ganho do PSS de algumas máquinas, escolhidas pelos fatores de controlabilidade dos ângulos das máquinas síncronas do sistema sobre o modo N-S, de modo a atingir o desempenho pouco satisfatório para a estabilidade a pequenos sinais do modo N-S. A Tabela 5.3 apresenta as alterações realizadas.

Tabela 5.3: Máquinas em que os ganhos dos PSS foram alterados.

Local	%
Paulo Afonso 4	-92,0%
Xingó	-94,3%
Tucuruí 6	-91,7%
Tucuruí 5	-91,7%
Angra II	+150,0%
Itaipú 6	-90,3%
Tucuruí 3	-90,0%
Tucuruí 1	-90,0%
Tucuruí 2	-90,0%

A Tabela 5.4 apresenta o resultado obtido após as mudanças nos ganhos dos PSS's.

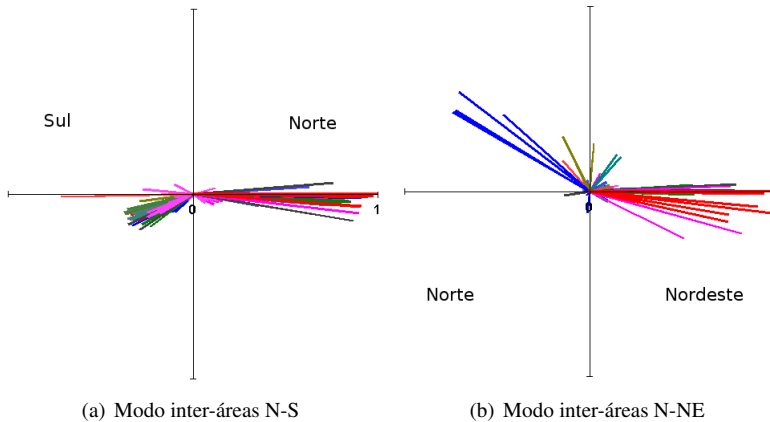
Após a alteração no ganho dos PSS's, o amortecimento do modo N-S sofre redução de 88,7%, passando para 1,95%. Também ocorre a degradação do amortecimento de um modo local e do modo N-NE. Este tornou-se

Tabela 5.4: Modos de Oscilação com ganho dos PSS's alterados.

Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
N-S	$-0,044969 \pm j2,3005$	1,95%	0,37Hz
N-NE	$0,031304 \pm j4,407$	-0,71%	0,7Hz
Local	$-0,3059 \pm j9,4823$	3,22%	1,51Hz

instável. Isto se deve ao fato de que o uso dos fatores de controlabilidade para escolha das máquinas para dessintonização dos PSS levou à deterioração do desempenho dos PSS da usina de Tucuruí cujo objetivo é amortecer o modo de oscilação N-NE.

Os *mode-shapes* ilustrados na Figura 5.2 corroboram a informação que os modos citados na Tabela 5.4 são inter-áreas.

Figura 5.2: *Mode-shapes* dos modos inter-áreas após alteração dos PSS.

O modo local está associado à UHE Espora, no Centro Oeste do país, e não desperta interesse para o escopo deste trabalho. Portanto, todos os controladores projetados neste trabalho visam a elevação do amortecimento dos modos inter-áreas N-S e N-NE.

Para avaliação do desempenho dos controladores realizam-se estudos de estabilidade transitória e de estabilidade para pequenos sinais.

Para os estudos de estabilidade transitória utiliza-se o software desen-

volvido pelo CEPEL, ANATEM (Análise de Transitório Eletromecânicos)<sup>1</sup>. Seu foco é dirigido para a simulação no domínio do tempo para análise dinâmica do sistema elétrico de potência visando a avaliação da estabilidade eletromecânica. Por conseguinte, todos os equipamento do sistema que desempenham papel relevante no processo transitório têm seus modelos representados no ANATEM.

Os estudos de estabilidade a pequenas perturbações são realizados com a utilização do *software* PacDyn<sup>2</sup>, também desenvolvido pelo CEPEL. O PacDyn têm capacidade de cálculo de autovalores pouco amortecidos, pólos e zeros dominantes de uma função de transferência, resposta em frequência, resposta no tempo, torque sincronizante e de amortecimento de geradores e têm sido utilizado para estudo de sistemas interligados em varias partes do mundo.

Além da análise de pequenos sinais, o PacDyn é capaz de projetar controladores para amortecimento dos modos de interesse através do método generalizado de alocação de pólos complexos.

### 5.3 Definição dos Locais para Aplicação da Malha de Controle Secundário

Conforme demonstrado na Tabela 5.1, há 16 equipamentos FACTS instalados no SIN. Destes, 12 são SVC e os outros 4 correspondem aos dois pares de TCSC instalados em cada um dos lados da interligação N-S entre Serra da Mesa e Imperatriz.

A instalação de sinais adicionais nos controladores dos TCSC da interligação N-S foi explorada em (GAMA, 1999), (SIMÕES et al., 2009) (GAMA; TENORIO, 2000) e (SAVELLI, 2007). Como os TCSC já foram utilizados para prover amortecimento ao modos N-S e os PSS dos reguladores de tensão de algumas máquinas síncronas tiveram seus ganhos alterados para deteriorar o amortecimento do modo N-S mesmo com a presença do TCSC, descarta-se a possibilidade do controle das oscilações via TCSC e considera-se somente os SVC como recursos disponíveis para a instalação de sinais adicionais nas suas respectivas malha de controle.

Como há 12 SVC instalados no SIN, há necessidade de se utilizar uma sistemática para determinação da localização do melhor equipamento a ser utilizado para amortecimento de um determinado modo de oscilação de interesse.

---

<sup>1</sup>Disponível na Eletrosul, empresa onde o autor atua.

<sup>2</sup>Disponível na Eletrosul, empresa onde o autor atua.

É consenso em (KUMAR; SINGH; SRIVASTAVA, 2007), (MARTINS; LIMA, 1989), (MESSINA; PÉREZ; HERNÁNDEZ, 2003) e (PEREZ; MESSINA; FUERTE-ESQUIVEL, 2000) que a medida dos fatores de controlabilidade e observabilidade, ou algum índice que represente estes fatores, é adequada para a determinação da melhor posição para adicionar amortecimento ao sistema.

Aplicando esta sistemática aos SVC do SIN, obtém-se os fatores de controlabilidade, referentes ao modo de oscilação Norte-Sul pouco amortecido, indicados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Fatores de controlabilidade do modo N-S referente à variável Susceptância Shunt das barras onde estão instalados os SVC do SIN.

<b>Localização</b>	<b>FC</b>
Bandeirantes (42)	0,05347
Bandeirantes (43)	0,05347
Campos (46)	0,09874
Barro Alto (55)	0,08222
Ouro Preto (389)	0,02993
Coxipó (4530)	0,01270
Campina Grande (5239)	0,07822
Milagres (5410)	0,2709
Fortaleza (5450)	<b>0,3747</b>
São Luis II (5551)	<b>0,3142</b>
Funil (5902)	0,04590
Bom Jesus da Lapa (6349)	0,1947

A Tabela 5.5 apresenta indícios de que os SVC de Fortaleza ou São Luis II devem ser considerados para a inserção de sinal adicional em suas malhas de controle de modo que haja aumento do amortecimento do modo N-S.

Além da melhor localização para a inserção do sinal adicional, há necessidade de determinarmos qual é o local em que deve ser medida a grandeza para que o modo pouco amortecido tenha elevada observabilidade.

A análise dos fatores de observabilidade e dos resíduos da função de transferência indicam qual a função de transferência é a mais indicada para obtenção do resultado esperado.

Considerando o sinal remoto de frequência como a entrada do controlador têm-se no sinal de frequência de Xingó e de Paulo Afonso a melhor informação sobre o modo pouco amortecido N-S. Para a análise do fluxo de

Tabela 5.6: Fatores de observabilidade do modo N-S considerando-se a frequência e o fluxo de potência ativa como variáveis observadas.

<b>Frequência da barra</b>	<b>Fator de Observabilidade Frequência</b>
Xingó (5061)	1,0
Paulo Afonso (5009)	0,9951
Fortaleza (5450)	0,8576
São Luis II (5551)	0,7792
<b>Fluxo de potência ativa da Linha</b>	<b>Fator de Observabilidade Fluxo de Potência Ativa</b>
Gurupi (7201) - Miracema (7200)	1,0
Gurupi (7101) - Serra da Mesa (7100)	0,9871

potência ativa em qualquer linha de transmissão, têm-se a melhor informação a respeito do modo N-S nas linhas Gurupi-Miracema e Gurupi-Serra da Mesa. Ambas fazem parte da interligação entre os subsistemas Norte e Sul.

A função de transferência mais efetiva para a consideração do projeto de um controlador adicional é determinada pela função de transferência com maior resíduo (MARTINS; LIMA, 1989) mesmo quando as variáveis de entrada das funções de transferência avaliadas são distintas (ABOUL-ELA et al., 1996).

Na Tabela 5.5, a partir dos fatores de controlabilidade, estão determinados os locais onde a inclusão do sinal adicional tem maior influência sobre o modo N-S. Na Tabela 5.6, a partir dos fatores de observabilidade, estão determinados os sinais remotos que portam mais informações a respeito do modo N-S. Combinando os locais com melhor controlabilidade e observabilidade, e comparando os resíduos das funções de transferência obtidas, Tabela 5.7, tem-se que a melhor opção para o amortecimento do modo N-S é a consideração de um controlador complementar no SVC de São Luis II com sinal de entrada remoto proveniente do fluxo de potência ativa da Linha de Transmissão entre Gurupi e Miracema pertencente à interligação N-S.

Para o caso de projeto de controladores SISO, coordenados ou não, e controladores MIMO visando o amortecimento também do modo N-NE, aplica-se a mesma sistemática para definição do local para aplicação do controlador adicional e definição do sinal remoto que melhor apresente informações sobre o modo N-NE.

Após a determinação da função de transferência que apresenta elevada controlabilidade e observabilidade do modo de oscilação pouco amortecido de interesse, pode-se aplicar, dentre outros, os métodos de projeto de controladores estudados na seção 4.4.

Uma ressalva para a aplicação de controladores amortecedores adicionais às malhas de controle do SVC é a necessidade de suporte de tensão

Tabela 5.7: Resíduos referentes às funções de transferência avaliadas.

<b>Frequência da Barra</b>	<b>Módulo Resíduo SVC Fortaleza</b>	<b>Módulo Resíduo SVC São Luis</b>
Xingó (5061)	0,0014108	0,46779
Paulo Afonso (5009)	0,001403	0,46549
Fortaleza (5450)	0,0012099	–
São Luis II (5551)	–	0,3645
<b>Fluxo de potência ativa da Linha</b>	<b>Módulo Resíduo SVC Fortaleza</b>	<b>Módulo Resíduo SVC São Luis</b>
Gurupi (7201) - Miracema (7200)	0,012529	<b>4,1545</b>
Gurupi (7101) - Serra da Mesa (7100)	0,012368	4,1009

da região onde o equipamento está instalado. De acordo com (WANG, 2000), assim como os diversos controladores do sistema podem interagir negativamente, a malha de controle de tensão e de amortecimento de oscilações de um mesmo SVC podem interagir e provocar degradação do desempenho de um dos controladores. Para mitigar esta interação, deve-se buscar o projeto coordenado destas duas malhas de controle para que ambas as funções tenham resultados satisfatórios. Os controladores propostos neste trabalho não serão projetados de maneira coordenada com o controle de tensão.

#### 5.4 Considerações para o projeto através de posicionamento de pólos

Na seção 4.4.1 foi apresentada o método de projeto para posicionamento de par de pólos complexos que considera o amortecimento como um requisito do projeto. Para aplicação deste método de projeto são feitas algumas considerações.

O *software* PacDyn, utilizado para os estudos do sistema linearizado pode ser usado para, a partir do diagrama polar de frequência, projetar um controlador utilizando o método de alocação de par de pólos baseado nos critérios de estabilidade de Nyquist.

Este projeto é adequado somente para controladores locais, visto que o PacDyn não considera a inserção de atraso de transmissão quando utiliza sinais remotos na entrada do controlador.

Portanto, para a consideração de sinais remotos na entrada do controle adicional, há necessidade de transportamos os dados do sistema linearizado para outro *software* que permita a consideração do atraso durante o projeto. Para essa finalidade, foi utilizado o método apresentado na seção 4.4.1.1 im-

plementado no ambiente Matlab para onde será transportada a representação linearizada do SIN.

### **5.5 Considerações para o projeto de controle robusto através de otimização de índices de desempenho**

Conforme introduzido anteriormente, para o projeto de controladores por otimização de índices de desempenho será utilizado o **HIFOO**.

O **HIFOO** é um pacote programado em ambiente Matlab, assim o sistema a ser compensado também deve estar representado no Matlab. A seção 5.5.1 apresenta detalhes da utilização do **HIFOO** no Matlab.

Por conveniência, para o projeto de controladores será considerado o conceito de *strong stabilization*. O problema de *strong stabilization* é conhecido como o projeto de um controlador estável que estabilize a planta de interesse (GUMUSSOY; OZBAY, 2005).

#### **5.5.1 Utilização do HIFOO para o projeto de controle robusto**

Uma vantagem do projeto utilizando a plataforma Matlab é que antes do projeto do controlador, pode-se levar em consideração a inserção de atrasos na entrada e saída do sistema. A Tabela 5.5.1 particulariza a inserção do atraso no sinal de entrada do controlador, neste caso representada pela inserção na saída da planta não compensada.

Tabela 5.8: Código do Matlab para inclusão do atraso na entrada do controlador.

```

% Leitura do sistema reduzido via PacDyn
% sistema reduzido via PacDyn
Reduzido_PacDyn;
SIST = ss(Ar, Br, Cr, D);

% Consideração do atraso no sinal de entrada do controlador
% Define tempo de atraso
Td = 0.3;

% Define a (1,2) Padé approximant
s = tf('s');
pd_ = (6 - 2 * Td * s) / (6 + 4 * Td * s + (Td * s)^2);
pd = ss(pd_);

% Define as dimensões do sistema
na = size(SIST.a); na = na(1);
nb = size(SIST.b); nb = nb(2);
nc = size(SIST.c); nc = nc(1);
na_pd = max(size(pd.a));

% Define o sistema aumentado com atraso Td no sinal de entrada

Ad = [SIST.a   zeros(na, na_pd)
      (pd.b * SIST.c) pd.a];

Bd = [SIST.b
      (pd.b * SIST.d)];

Cd = [(pd.d * SIST.c)   pd.c];

Dd = pd.d * SIST.d;

SIST_di_ = ss(Ad, Bd, Cd, Dd);

```

A Tabela 5.5.1 dá continuidade ao código anterior e apresenta detalhes da forma de utilização do pacote **HIFOO** para o projeto de controles robustos através da otimização de índices de desempenho considerando o conceito de *strong stabilization*.



Tabela 5.9: Código do Matlab para o projeto de controladores robustos por otimização de índices de desempenho.

<pre> % Strong Stabilization % A planta seguida pela string 'k' indica necessidade % de estabilizar a planta e o controlador P = {SIST_di,'k'};  % Define a estrutura no espaço de estados de um % controlador com a ordem pré-definida - Neste caso % controlador de segunda ordem % Definir a estrutura somente para o % caso de strong stabilization  STRUCTURE.Ahat = [ones(2,2)]; STRUCTURE.Bhat = [ones(2,1)]; STRUCTURE.Chat = [11]; STRUCTURE.Dhat = 1; options.structure = STRUCTURE;  % Entradas para o projeto do controlador % Consultar o arquivo de ajuda do HIF00 no Matlab % através do comando help hifoo % Neste caso: % P = Planta % 2 = Ordem do controlador conforme definida em STRUCTURE % 's' = Minimização da abscissa espectral % (usar 'h' para norma <math>H_\infty</math> e % 'r' para o raio de estabilidade) % options = Opções da otimização - ver help hifoo % Cx = Controlador utilizado como um dos pontos % iniciais para a otimização o HIF00 adota o Cx mais % três pontos como condição inicial para a otimização </pre>	<pre> [C1,F1,VIOL1,LOC1] = HIFOO(P,2,'s',options); c1 = ss(C1.a,C1.b,C1.c,C1.d);  [C2,F2,VIOL2,LOC2] = HIFOO(P,2,'s',options,C1); [C2,F2,VIOL2,LOC2] = HIFOO(P,2,'s',options,C2); c2 = ss(C2.a,C2.b,C2.c,C2.d);  [C3,F3,VIOL3,LOC3] = HIFOO(P,2,'r',options,C2); c3 = ss(C3.a,C3.b,C3.c,C3.d);  % Considerar realimentação negativa  SIST_PSS1 = feedback(SIST,-C1); SIST_PSS2 = feedback(SIST,-C2); SIST_PSS3 = feedback(SIST,-C3);  % Avaliação do pseudo-espectro  eigtool(SIST_PSS1.a); eigtool(SIST_PSS2.a); eigtool(SIST_PSS3.a); </pre>
---	--

Do **HIFOO** serão consideradas as funções objetivo minimização da abscissa espectral e minimização da norma  $H_\infty$ . Para esta última, há necessidade de seleção de matrizes de peso adequadas para que o resultado esperado seja atingido. A seção 5.5.2 apresenta o método utilizado para a construção destas matrizes de peso.

### 5.5.2 Determinação das Matrizes de Peso para a Otimização da Norma $H_\infty$

As discussões anteriores indicam que, para o projeto de controladores que minimizem a norma  $H_\infty$ , é conveniente elevar o peso das variáveis de estado que mais excitam o modo eletromecânico que se deseja amortecer.

Então, o controlador visa reduzir a variação do modo eletromecânico quando a entrada perturba a variável de estado com maior peso.

Para sistemas representados na forma canônica de Jordan, os fatores de participação são uma medida da associação entre variáveis de estado e os modos de oscilação (KUNDUR, 1994). Então, como um indicativo da participação dos estados nos modos de oscilação correspondentes, aplica-se uma

transformação de similaridade ao sistema e utilizam-se os fatores de participação do modo de interesse como pesos para a minimização da norma  $H_\infty$ . Desta forma, estamos perturbando o sistema e minimizando a variação das trajetórias dos estados que mais excitam o modo pouco amortecido.

Conforme descrito na seção 4.4.2.2.4, a consideração dos fatores de participação para a matriz de peso  $B_1$  representa uma perturbação fictícia sobre os estados que mais excitam o modo de interesse. Desta forma o objetivo do controlador passa a ser a minimização da influência da perturbação destes estados na saída da planta.

## 5.6 Redução de ordem do SIN para representação no Matlab

No início do capítulo 5 informa-se que serão realizados projetos para sinais adicionais de dispositivos FACTS aplicando os métodos de minimização da abscissa espectral, minimização da norma  $H_\infty$  e posicionamento de pólos. Para tanto, o SIN representado no espaço de estados no PacDyn deve ser transportado para o Matlab onde pode-se incluir a influência do atraso na planta para o cálculo dos controladores. Além disso, pode-se utilizar o *software* **HIFOO** para projeto de controladores robustos sem a inconveniência da ordem elevada do sistema representado no PacDyn.

De acordo com a Tabela 5.1 há 3300 variáveis de estado no SIN em estudo. Devido às limitações de *software* é impraticável a migração completa, com todas as variáveis de estado, do PacDyn para o Matlab. A migração completa somente é permitida para sistemas com ordem inferior à 2000. Para tanto considera-se o método de redução de ordem descrito na seção 4.3.1 para viabilizar o tratamento do sistema no Matlab. O DPSE, descrito na referida seção, está implementado no PacDyn.

No PacDyn calcula-se um conjunto de pólos e selecionam-se aqueles que apresentem baixo amortecimento e aqueles com maior resíduo, de modo que a resposta no tempo e em frequência reproduzam as respostas do sistema completo. Uma limitação do DPSE no PacDyn é a possibilidade de determinar somente 100 condições iniciais que convergirão para no máximo 100 pares de pólos complexos limitando a ordem do sistema reduzido a 200 estados. Também, de acordo com as condições iniciais, os pólos para os quais o algoritmo convergirá poderão não representar adequadamente os aspectos do modelo completo para a obtenção de um modelo reduzido equivalente. Desta forma, a correta representação de um modelo reduzido equivalente depende das condições iniciais do DPSE.

A Figura 5.3 representa o sistema equivalente compensado para o caso

em que se deseja amortecer o modo N-S. Como pode-se observar, a variável controlada é a susceptância *shunt* em São Luis II e a variável observada é a transferência de potência ativa entre Gurupi e Miracema.

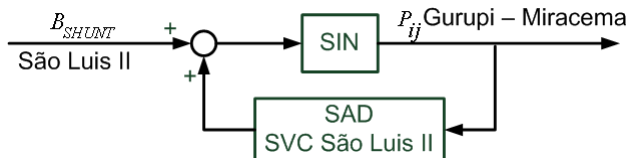


Figura 5.3: Representação de entradas e saídas do Sinal Adicional a ser projetado.

Esta estrutura simplificada não tem significado físico e pode ser utilizada somente para demonstrar diretamente a influência do sinal adicional sobre o SIN.

Para a aplicação física do sinal adicional em qualquer controlador de SVC, deve ser utilizada a estrutura apresentada na Seção 3.3.3 e reproduzida na Figura 5.4

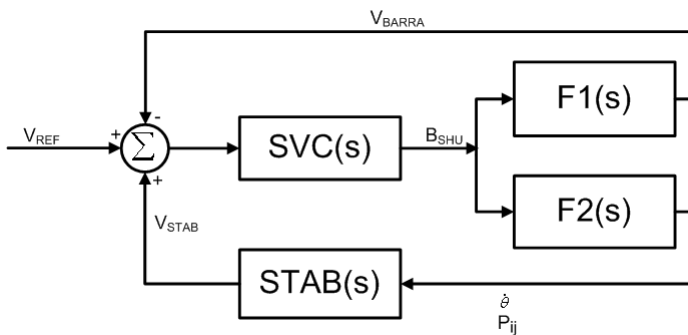
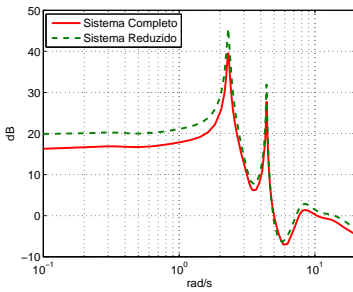


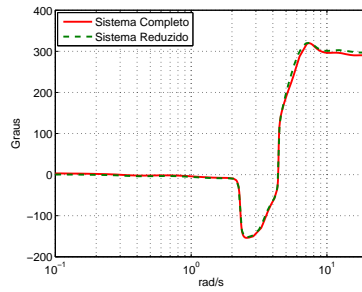
Figura 5.4: Malhas de controle de um SVC

Para exemplificar e confirmar o método de redução de ordem utilizado, a Figura 5.5 apresenta a resposta em frequência e a resposta ao degrau do sistema completo e do sistema reduzido entre a susceptância *shunt* do SVC instalado em São Luis II e o fluxo de potência ativa entre Gurupi e Miracema como sinal de saída. O sistema reduzido tem 196 estados.

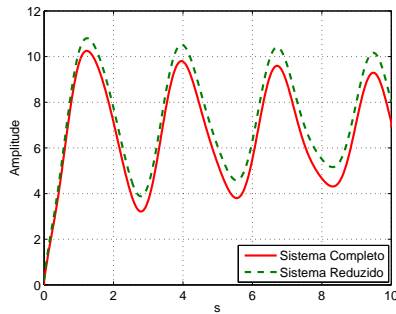
Observa-se que o sistema reduzido está em conformidade com o sis-



(a) Diagrama de Bode: Amplitude



(b) Diagrama de Bode: Fase



(c) Resposta ao degrau com amplitude unitária

Figura 5.5: Comparação entre sistema completo e sistema reduzido com 196 estados para o SVC em São Luis II.

tema completo consolidando o método de redução de ordem. Esta redução do sistema pode ser utilizada para o projeto de controladores utilizando o Matlab.

## 5.7 **Análise de robustez**

Para o projeto de controladores considera-se o sistema linearizado na vizinhança de um determinado ponto de operação fixo. Este sistema linearizado sofre uma redução de ordem para possibilitar tratamento no *software* disponível. Portanto, o controlador é projetado para uma condição específica de operação sem considerar todas as variáveis e estados do sistema completo.

Devido às incertezas introduzidas pela linearização e pela redução de ordem do sistema, aplica-se a análise de robustez ao sistema compensado para avaliação e validação do controlador.

A robustez será analisada através da avaliação do comportamento transitório do sistema durante contingências e através do traçado do pseudo-espectro do sistema compensado. Para a simulação dos transitórios será utilizado o ANATEM e para o traçado do pseudo-espectro o aplicativo desenvolvido sobre a plataforma Matlab denominado EigTool apresentado em (BURKE; LEWIS; OVERTON, 2003).

### 5.7.1 **Contingências para a Análise de Robustez**

Uma forma de realizar a análise de robustez é simular contingências no sistema que desviem a operação para uma condição distinta daquela considerada durante o projeto. A partir dos fatores de participação, identificam-se as variáveis que mais excitam os modos de oscilação de interesse, determinando assim um ou mais pontos de contingência.

Para o modo N-S, o maior fator de participação ocorre na usina Angra II. Para provocarmos oscilações neste modo aplicam-se variações na potência mecânica de entrada na Usina Angra II. Para o modo N-NE a usina que produz este efeito é a usina de Xingó onde a potência mecânica de entrada também pode sofrer variações durante as simulações para provocar oscilações entre as áreas N e NE.

Além deste dois locais, consideram-se outras contingências no sistema. Observando a linha de transmissão com maior controlabilidade do modo N-S, chega-se à conclusão que a aplicação de falta na linha entre Imperatriz e Colinas também perturba o modo N-S. Outra contingência considerada severa é o desligamento do circuito paralelo àquele onde é adquirido o sinal de entrada para o controle suplementar entre Miracema e Gurupi.

A Figura 5.7.1 indica fisicamente as posições dos controladores e das contingências que serão consideradas para a avaliação de robustez.

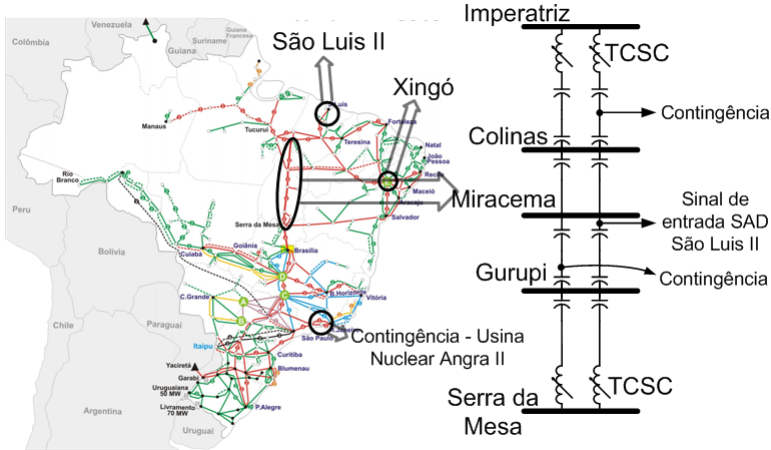


Figura 5.6: Localização das contingências para o modo N-S.

A Tabela 5.10 apresenta um sumário das contingências que serão aplicadas no SIN para verificação da robustez dos controladores propostos.

Tabela 5.10: Contingências aplicadas ao SIN para verificação de robustez dos controladores.

Contingência nº	Descrição	Objetivo
01	Redução permanente de 1% da potência mecânica de entrada na Usina Nuclear Angra II	Excitação do modo N-S
02	Redução permanente de 1% da potência mecânica de entrada na Usina Xingó	Excitação do modo N-NE
03	Desligamento de um dos circuitos da linha de transmissão dupla da interligação N-S entre Imperatriz e Colinas	Verificação da robustez do controlador projetado
04	Desligamento do circuito paralelo àquele onde é adquirido o sinal de entrada do estabilizador instalado em São Luis II	Verificação da robustez do controlador projetado

### 5.7.2 Análise de robustez através do pseudo-espectro

Como explanado no início da seção 5.7, o projeto dos sinais adicionais para os controladores dos SVC considerados é feito a partir da redução de um

sistema linearizado nas proximidades de uma única condição de operação. Na seção 5.7.1 é apresentado um método expedito para a análise da robustez do sistema compensado.

Aqui, através da análise do pseudo-espectro do sistema compensado, apresenta-se um método analítico para mensurar a robustez deste mesmo sistema.

Na seção 4.4.2.1 tem-se que o  $\varepsilon$ -pseudo-espectro,  $\Lambda_\varepsilon(A)$ , de uma matriz  $A$  é o subconjunto do plano complexo que corresponde a todos os autovalores de todas as matrizes complexas distantes  $\varepsilon$  de  $A$ , conforme equações (5.1) e (5.2)

$$\Lambda_\varepsilon(A) = \{z \in \mathbb{C} : z \in \Lambda(X) \text{ onde } \|X - A\| \leq \varepsilon\}, \quad (5.1)$$

equivalente a

$$\Lambda_\varepsilon(A) = \left\{ z \in \mathbb{C} : \left\| (z - A)^{-1} \right\| > \varepsilon^{-1} \right\}. \quad (5.2)$$

Desta forma, na comparação de dois sistemas compensados, o controlador mais robusto será aquele cujo pseudo-espectro intercepte o eixo imaginário com o maior valor de  $\varepsilon$ .

A avaliação do pseudo-espectro é realizada com o apoio do *software* EigTool (BURKE; LEWIS; OVERTON, 2003) fornecido gratuitamente para a plataforma Matlab.

Um exemplo do uso do EigTool foi apresentado na Tabela 5.5.1. Foi utilizado um sistema Máquina Barra Infinita de sexta ordem, apresentado na equação 5.3, e projetados controladores através da minimização da norma  $H_\infty$  e da maximização do raio de estabilidade. A Tabela 5.11 apresenta os controladores obtidos e as Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresenta a comparação de robustez para cada um dos controladores através da análise do pseudo-espectro. A barra ao lado direito das figuras apresenta o valor logarítmico de  $\varepsilon$ .

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -13 & 0 & 11,74 & 0 & -0,8466 & 0,1209 \\ 0 & -9,786 & 0 & 0 & 1,658 & 0 \\ 0,6195 & 0 & -1,121 & 0 & -0,09608 & 0,1786 \\ -0,1021 & 0,06407 & 0 & 0 & -0,09597 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ -1162 & -614,9 & 0 & 0 & 342,9 & -20 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2000 \end{bmatrix} VREF \quad (5.3)$$

$$WW = \begin{bmatrix} 0,5808 & 0,3074 & 0 & 0 & -0,1714 & 0 \end{bmatrix} x$$

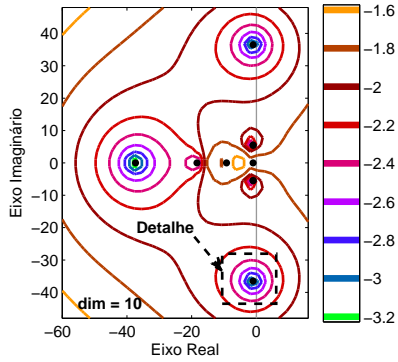
A avaliação das Figuras mostra que o sistema compensado com controlador C3 é mais robusto do que aqueles compensados com C1 e C2 visto que permite maior perturbação ( $\varepsilon(C3) > \varepsilon(C2) > \varepsilon(C1)$ ) da matriz de estados antes de atingir a instabilidade.

Tabela 5.11: Controladores para o sistema Máquina Barra Infinita.

Controlador	Método de projeto
$C1 = 27,6102 \frac{(s^2+6,037s+24,49)}{(s^2+14,85s+778,4)}$	Minimização da abscissa espectral com uma iteração
$C2 = 61,0712 \frac{(s^2+6,201s+24,82)}{(s^2+24,67s+1731)}$	Minimização da abscissa espectral com três iterações
$C3 = 833,114 \frac{(s^2+6,252s+24,59)}{(s+655,1)(s+41,08)}$	Maximização do raio de estabilidade com uma iteração

É importante observar que a perturbação  $\varepsilon$  considerada não é estruturada, ou seja, não leva em consideração as características das perturbações fisicamente possíveis em sistemas de potência. Isto conduz a uma avaliação conservadora da robustez visto que a perturbação máxima observada para a instabilização do sistema não necessariamente é fisicamente possível.





(a)

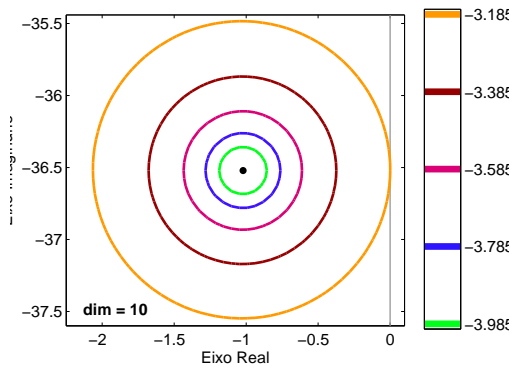
(b)  $\varepsilon = 10^{-3,185} = 0,000653$ 

Figura 5.7: Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C1

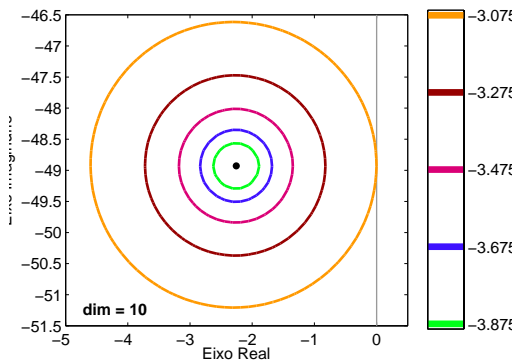
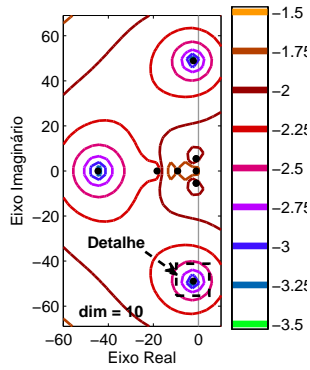
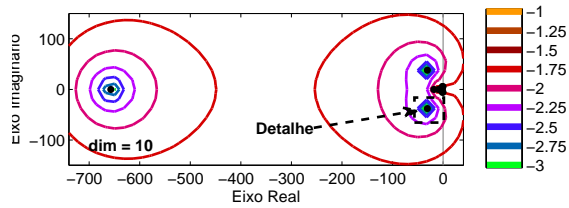


Figura 5.8: Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C2



(a)

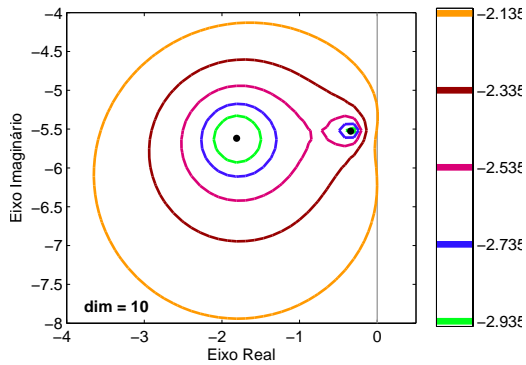
(b)  $\epsilon = 10^{-2,135} = 0,0073$ 

Figura 5.9: Comparação de robustez de sistema Máquina Barra Infinita com controlador C3

## 5.8 Conclusão

O caso base para o cenário em estudo, carga pesada de setembro de 2008, apresenta baixo amortecimento para o modo N-S e amortecimento negativo para o modo N-NE. Observa-se que os fatores de controlabilidade, observabilidade e os fatores de participação subsidiam informações sobre o sistema para a determinação da melhor localização para a instalação e aquisição do sinal de entrada de controladores complementares.

Com o estudo dos fatores de controlabilidade define-se que a melhor opção para o amortecimento da oscilação inter-áreas N-S é a configuração de um sinal adicional no SVC instalado em São Luis II. Esta escolha não poderia ser realizada de forma intuitiva visto que não necessariamente o SVC mais próximo da interligação Norte - Sul apresenta o maior fator de controlabilidade. O mesmo raciocínio é válido para a escolha do sinal de entrada do controle complementar. A proximidade física à interligação das áreas não garante que o fluxo de uma linha ou a frequência de uma barra seja a melhor opção para se obter as informações sobre determinado modo de oscilação. Faz-se necessário a análise dos fatores de observabilidade.

Ainda baseado nos fatores de controlabilidade e de participação, foram apresentados neste Capítulo os melhores locais para a aplicação de contingências para permitir a observação da robustez do sistema compensado, bem como, foi apresentada a eficácia do método de redução de ordem proposto.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

Apresentados os detalhes de cada método de projeto de controladores utilizam-se estas metodologias para o projeto de diferentes controladores que elevem o amortecimento dos modos inter-áreas para posterior avaliação e comparação do desempenho destes controladores.

Neste capítulo serão utilizados e comparados os métodos de projeto de controladores por otimização de índices de desempenho e por posicionamento de pólos.

O desempenhos dos controladores serão comparados nos requisitos de amortecimento e robustez através de simulação de transitórios e avaliação do pseudo-espectro.

### 6.1 Amortecimento do Modo N-S

Os primeiros resultados serão buscados individualmente para amortecimento do modo N-S. Na próxima seção será buscado aumento no amortecimento do modo N-NE através do projeto de controladores coordenados e não coordenados, centralizados e não centralizados.

Para ilustrar o amortecimento dos modos N-S e N-NE no caso base de estudo, aplica-se a contingência nº 01, redução permanente de 1% da potência mecânica de entrada da usina Angra II. A resposta é apresentada na Figura 6.1. Observa-se nos primeiros instantes a presença predominante do modo de oscilação N-S pouco amortecido e com o passar do tempo o aparecimento do modo N-NE com amortecimento negativo.

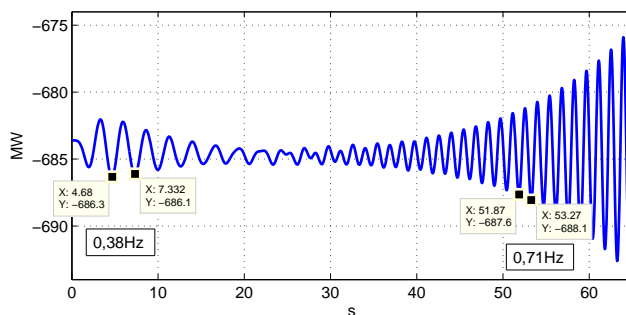


Figura 6.1: Resposta do caso base à contingência nº 01.

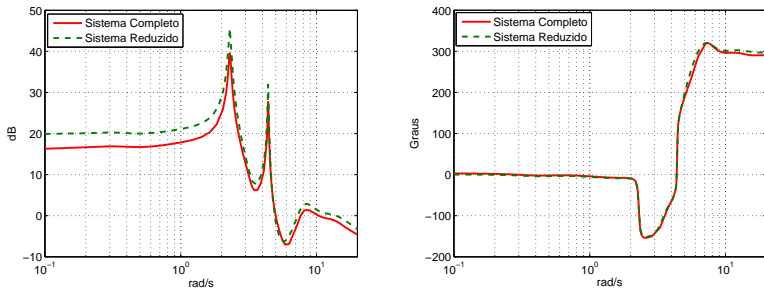
### 6.1.1 Projeto por otimização de índices de desempenho

Os autovalores de interesse do sistema base são os dos modos de oscilação N-S e N-NE reproduzidos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Autovalores do caso base.

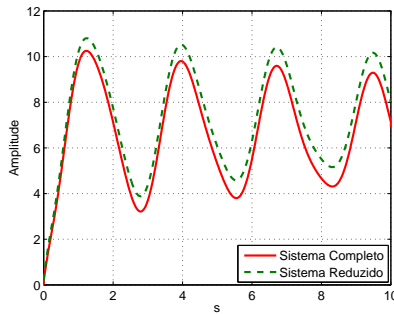
Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
N-S	$-0,044969 \pm j2,3005$	1,95%	0,37Hz
N-NE	$0,031304 \pm j4,407$	-0,71%	0,7Hz

Conforme descrito na Seção 5.6, obtém-se um modelo reduzido, para a função de transferência entre a susceptância *shunt* da barra onde está conectado o SVC de São Luis II e o fluxo de potência ativa entre Gurupi e Miracema, com 196 estados. A Figura 6.2 reproduz a comparação ilustrada naquela seção.



(a) Diagrama de Bode: Amplitude

(b) Diagrama de Bode: Fase



(c) Resposta ao degrau com amplitude unitária

Figura 6.2: Comparação entre sistema completo e sistema reduzido para o SVC em São Luis II.

### 6.1.1.1 Minimização da Abscissa Espectral

O primeiro índice de desempenho a ser considerado é a abscissa espectral.

Utilizando a planta reduzida em conjunto com o *software* **HIFOO**, a primeira iteração da função objetivo minimização da abscissa espectral resultou no controlador  $K1$ :

$$K1 = \frac{-2,949s^2 - 7,781s - 2,457}{s^2 + 1,712s + 0,3825}$$

ou fatorando

$$K1 = -2,9494 \frac{(s + 2,272)(s + 0,3667)}{(s + 1,448)(s + 0,2642)}$$

cuja minimização resultou em uma abscissa espectral  $\alpha = -0,1228$

No **HIFOO** o controlador obtido como resultado de uma otimização pode ser considerado como umas das condições iniciais para uma nova otimização. Aqui o termo "iteração" refere-se à quantidade de vezes que o resultado de uma otimização é considerada como uma das condições iniciais para a otimização seguinte.

Para a minimização da abscissa espectral, sucessivas iterações não modificaram o valor da abscissa espectral, porém resultaram em um controlador instável  $K2$ :

$$K2 = \frac{-20,06s^2 - 30,61s - 7,675}{s^2 + 0,6427s - 0,5002}$$

ou, fatorando-se os polinômios do numerador e denominador

$$K2 = -20,0637 \frac{(s + 0,3163)(s + 1,209)}{(s - 0,4555)(s + 1,098)}$$

Utilizando o conceito de *strong stabilization*, estabilização da planta com controlador estável, o controlador  $K2$  não será considerado.

Os autovalores de interesse resultantes desta otimização são aqueles apresentados na Tabela 6.2. Nesta tabela há referências aos autovalores obtidos no Matlab com o sistema reduzido e aos autovalores obtidos no PacDyn após a inserção do controlador no sistema completo. Observa-se que os autovalores obtidos com o sistema reduzido e o sistema completo assumem valores muito próximos para o sistema compensado, validando mais uma vez o modelo reduzido.

Tabela 6.2: Autovalores do sistema com controlador  $K1$

Software	Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
MATLAB	N-S	$-0,338 \pm j3,37$	9,97%	0,54Hz
MATLAB	N-NE	$-0,373 \pm j4,48$	8,29%	0,71Hz
PACDYN	N-S	$-0,3286 \pm j3,3837$	9,67%	0,54Hz
PACDYN	N-NE	$-0,3643 \pm j4,4662$	8,13%	0,71Hz



#### **6.1.1.1.1 Avaliação da robustez do sistema compensado**

Como o maior fator de controlabilidade do modo de oscilação N-S está relacionado à Usina de Angra II reduz-se permanentemente 1% da potência mecânica nessa usina e observa-se o resultado ilustrado na Figura 6.3.

A contingência em Angra, que excita principalmente o modo de oscilação N-S e, como efeito secundário o modo N-NE, provoca oscilações de baixa amplitude com elevado amortecimento e posterior convergência para um ponto de operação distinto da condição inicial.

Apesar da demora para atingir o ponto de operação pós falta, a variação entre o ponto inicial e o ponto final é pequena, bem como o amortecimento apresenta valor elevado. Desta forma, o objetivo do controlador, que era elevar o amortecimento do sistema, foi atingido.

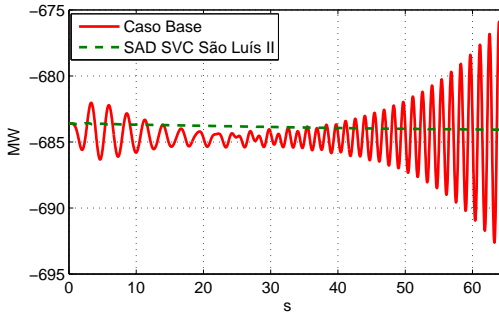
Analogamente, para o modo de oscilação N-NE, provoca-se redução permanente de 1% da potência mecânica de entrada da Usina Xingó. O resultado apresentado na Figura 6.4 mostra o fluxo de potência na linha de transmissão entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga que apresenta maior fator de observabilidade para o modo N-NE. As oscilações observadas têm amplitude de aproximadamente 35% do valor inicial e o fluxo na Linha de Transmissão acomoda-se em um valor absoluto maior do que aquele registrado antes da contingência.

#### **6.1.1.1.2 Avaliação da influência do atraso na resposta do sistema compensado**

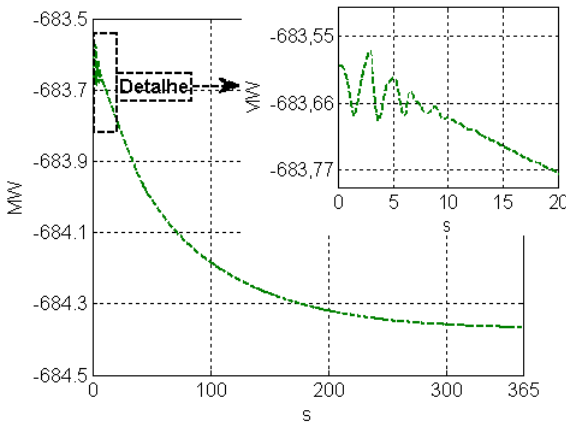
O sinal de entrada do controle adicional é obtido remotamente. Isto introduz um atraso na resposta do controlador. O projeto do compensador denominado *K1* não leva em consideração este atraso. A inclusão de atrasos em malhas de controle tendem a reduzir a estabilidade do sistema compensado (FRANKLIN; POWELL; ABBAS, 1994).

Ao introduzirmos o controlador na planta completa levando em consideração diferentes níveis de atrasos obtém-se os resultados apresentados na Tabela 6.3.

Com a consideração do atraso de  $100ms$  na obtenção do sinal remoto, há uma leve deterioração no desempenho do controlador para os modos de oscilação N-S e N-NE. Porém, quando o tempo de atraso aumenta, o controle do SVC de São Luis II torna-se instável. A Figura 6.5 mostra que os *mode-shapes* dos modos instáveis não se referem a modos inter-áreas. A instabilidade está associada ao controlador, que não é capaz de se manter estável com a consideração de atrasos elevados. As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os fatores de participação para os autovalores instáveis obtidos com a consi-



(a) Caso Base e Sistema com controlador K1



(b) Detalhe do sistema com controlador K1

Figura 6.3: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controlador K1, à contingência n<sup>o</sup> 01.

deração de  $200ms$  e  $300ms$ , respectivamente, na entrada do controlador K1. Observa-se que os estados que mais têm participação no modo instável fazem parte do controle do SVC de São Luís II (CE SLD06, barra n<sup>o</sup> 1380).

A instabilidade do sistema após a consideração do atraso na entrada do controlador K1 é evidenciada na Figura 6.6.

Observa-se também, na Figura 6.7, que a instabilidade do controlador o leva a saturação com o aumento do atraso.

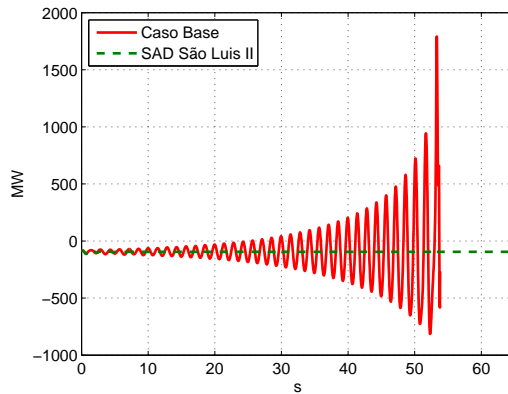
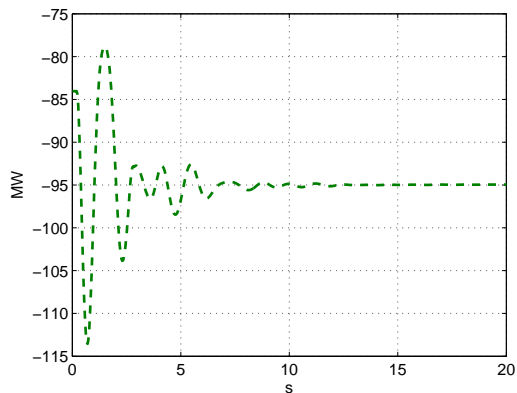
(a) Caso Base e Sistema com controlador  $K1$ (b) Sistema com controlador  $K1$ 

Figura 6.4: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controlador  $K1$ , à contingência nº 02.

Para evitar os problemas provocados pelo atraso na transmissão dos sinais, há necessidade de considerarmos este atraso durante o projeto do controlador. Desde a década de 1920 as empresas de energia elétrica têm usado o sinal de *carrier* para supervisão controle remoto de suas instalações. Com o desenvolvimento e redução dos custos da instalação de fibras óticas, as em-

Tabela 6.3: Autovalores do sistema com controlador  $K1$  considerando atraso na obtenção do sinal remoto.

Atraso	Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
100ms	N-S	$-0,3253 \pm j3,3892$	9,55%	0,54Hz
100ms	N-NE	$-0,3628 \pm j4,4577$	8,11%	0,71Hz
200ms	N-S	$-0,3249 \pm j3,3953$	9,53%	0,54Hz
200ms	N-NE	$-0,3590 \pm j4,4508$	8,04%	0,71Hz
200ms	SVC São Luis II	$5,0774 \pm j12,8099$	-36,85%	2,04Hz
300ms	N-S	$-0,3270 \pm j3,4003$	9,57%	0,54Hz
300ms	N-NE	$-0,3536 \pm j4,4455$	7,93%	0,71Hz
300ms	SVC São Luis II	$4,8036 \pm j8,7646$	-48,06%	1,39Hz

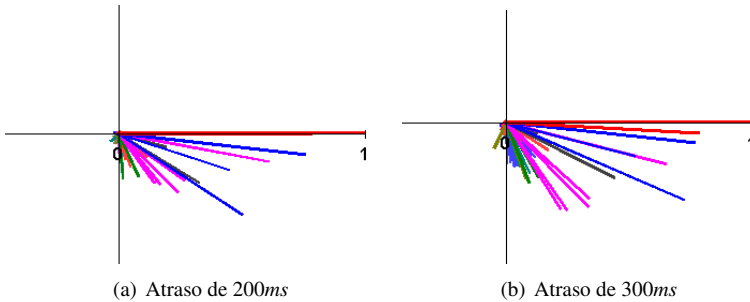


Figura 6.5: *Mode-shapes* dos modos instáveis para o sistema com controlador  $K1$  com atraso na recepção do sinal de entrada.

presas de energia têm migrado seus sistemas de supervisão e controle para sistemas de fibra ótica.

Para considerarmos a condição mais severa de operação, será considerada a comunicação através de PLC. De acordo com a Tabela 4.1 da seção 4.3.2, para este meio físico o atraso típico pode chegar a 350ms. Consideremos então, para o projeto dos controladores, atraso de 300ms na transmissão de sinais.

A minimização da abscissa espectral considerando o atraso no sinal de entrada da planta reduzida do SIN resultou no controlador  $K3$ . A abscissa espectral assumiu o valor  $\alpha = -0,1227$ , praticamente o mesmo alcançado sem a consideração do atraso.

Tabela 6.4: Fatores de participação do modo instável considerando atraso de 200ms na entrada do controlador K1.

<b>Módulo</b>	<b>Fase</b>	<b>Nome e n° da Barra</b>	<b>Variável</b>
1,0000	0.	CE SLD06 n° 1380	X20033
0,3986	-3,9220	CE SLD06 n° 1380	X10033
0,2042	-26,085	CE SLD06 n° 1380	X 0010
0,1161	-96,390	LAJEADO 4GR n° 7206	DELT
0,1153	-95,503	LAJEADO 4GR n° 7206	WW
0,07603	162,46	CE SLD06 n° 1380	X 0007
0,07136	74,260	S.MESA 2GR n° 36	DELT
0,07025	74,434	S.MESA 2GR n° 36	WW
0,06226	-30,412	IMPERATR 3CS n° 5596	DELT
0,06226	-30,412	IMPERATR 3CS n° 5596	WW

Tabela 6.5: Fatores de participação do modo instável considerando atraso de 300ms na entrada do controlador K1.

<b>Módulo</b>	<b>Fase</b>	<b>Nome e n° da Barra</b>	<b>Variável</b>
1.0000	3.18055e-015	CE SLD06 n° 1380	X20033
0.3871	-17.524	CE SLD06 n° 1380	X10033
0.1554	-29.645	CE SLD06 n° 1380	X0010
0.1031	-60.139	LAJEADO 4GR n° 7206	DELT
0.1021	-59.032	LAJEADO 4GR n° 7206	WW
0.06613	100.50	S.MESA 2GR n° 36	DELT
0.06571	99.903	S.MESA 2GR n° 36	WW
0.06328	-114.60	CE SLD06 n° 1380	X10034
0.05623	156.89	CE SLD06 n° 1380	X 0007
0.05582	-149.29	TUCURUII 5GR n° 6419	DELT

$$K3 = \frac{-90,7s^2 + 43,31s - 68,58}{s^2 + 417,7s + 614,8}$$

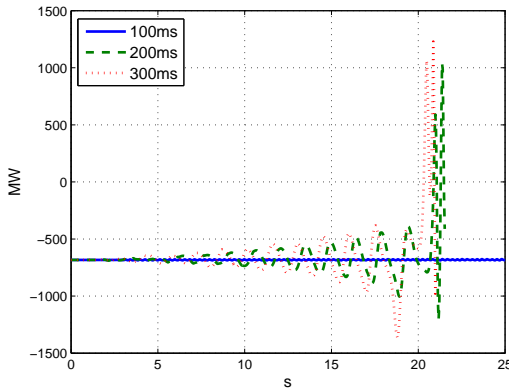


Figura 6.6: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, considerando atraso na entrada do controlador  $K1$ , à contingência  $n^o$  01.

ou fatorando

$$K3 = -90,7007 \frac{(s^2 - 0,4775 + 0,7561)}{(s + 1,477)(s + 416,2)}$$

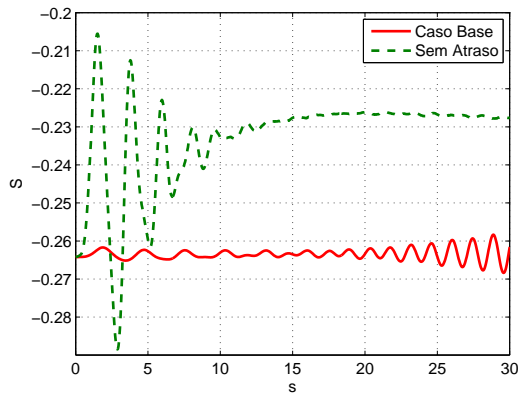
Os pólos de interesse do sistema completo compensado são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Autovalores do sistema com controlador  $K3$  em São Luis II considerando atraso de 300ms no projeto.

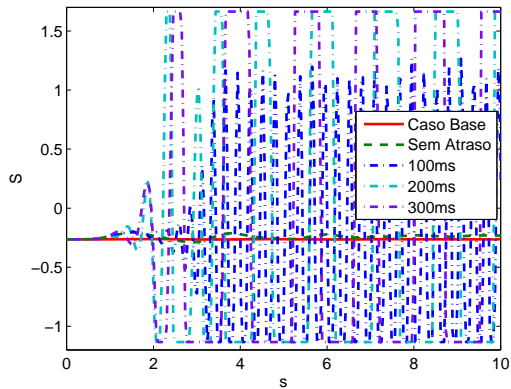
Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
N-S	$-0,3760 \pm j3,3956$	11,01%	0,54Hz
N-NE	$-0,1560 \pm j4,8126$	3,24%	0,77Hz

### 6.1.1.1.3 Avaliação da robustez do sistema compensado com a consideração do atraso no projeto do compensador

Na Figura 6.8 a frequência de oscilação detectada é inferior à obtida para o sistema linearizado. Apesar da oscilação ser de baixa frequência, seu amortecimento é elevado. Observando a Figura 8(b) percebe-se que a osci-



(a) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II sem atraso na entrada do controlador.

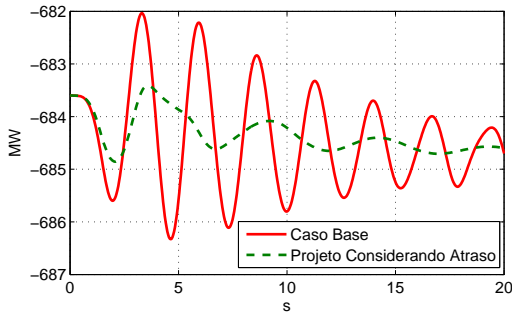


(b) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II sem e com atraso variável na entrada do controlador.

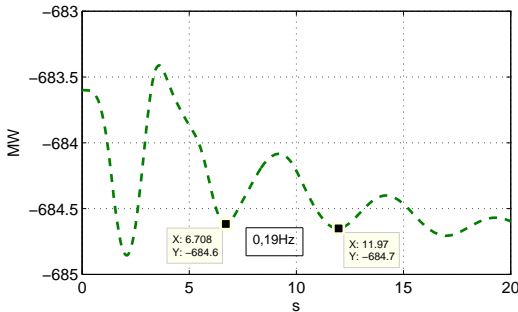
Figura 6.7: Susceptância shunt do SVC em São Luis II. Resposta do sistema, com controlador  $K1$ , à contingência nº 01.

lação é formada por mais de uma componente com frequências diferentes. Portanto, não necessariamente esta oscilação deve-se somente ao modo N-S. Este é um indício que a robustez do controlador inserido pode estar com-

prometida, ou que, com a presença deste controlador, a variação da potência mecânica de entrada em Angra II excita outros modos de oscilação não identificados no modelo linearizado.



(a) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II



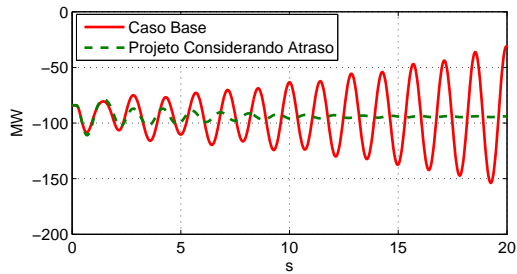
(b) Sistema Compensado em São Luis II

Figura 6.8: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controlador K3, à contingência n<sup>o</sup> 01.

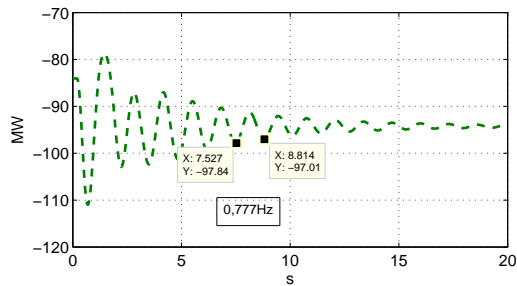
Já na Figura 6.9, evidencia-se o modo N-NE com baixo amortecimento de acordo com a Tabela 6.6

A Figura 6.10 ilustra que, mediante excitação do modo N-S através da perturbação da potência mecânica de entrada em Angra II, o controlador é estável e que não há saturação em sua saída.





(a) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II



(b) Sistema Compensado em São Luis II

Figura 6.9: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controlador  $K3$ , à contingência n<sup>o</sup> 02.

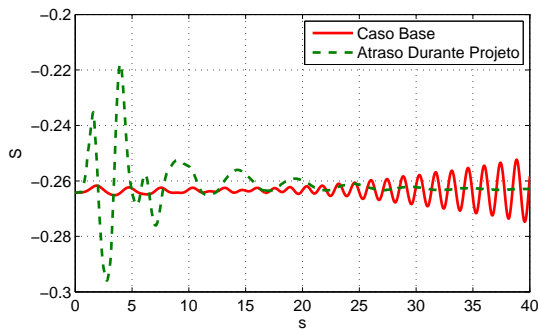


Figura 6.10: Susceptância shunt do SVC em São Luis II. Resposta do sistema, com controlador  $K3$ , à contingência n<sup>o</sup> 01.

### 6.1.1.2 Minimização da Norma $H_\infty$

Considerando ainda o SVC em São Luis II, projeta-se um controlador com sinal de entrada remoto representando o fluxo de potência ativa na linha entre Miracema e Gurupi cuja função é minimizar a norma  $H_\infty$  entre entrada de perturbação na susceptância *shunt* em São Luis II e saída controlada do fluxo de potência entre Miracema e Gurupi com o objetivo final de amortecer as oscilações do modo N-S presentes no Caso Base de estudo.

O projeto é concebido utilizando-se o *software* HIFOO e a planta utilizada é o modelo reduzido apresentado na seção 5.6 com 196 estados e que já foi utilizado para o projeto de controlador que minimiza a abscissa espectral do controlador.

Como foi apresentado em estudo anterior, o atraso introduzido na obtenção do sinal remoto de entrada do controlador deve ser considerado durante o projeto do controlador. A minimização da norma  $H_\infty$ , considerando atraso de 300ms no sinal de entrada na planta reduzida, resultou no controlador K4. A norma  $H_\infty$  assumiu o valor  $\|G\|_\infty = 1,4571$ .

$$K4 = \frac{-37,09s^2 - 38,84s + 21,38}{s^2 + 178,0s + 756,9}$$

ou fatorando

$$K4 = -37,0939 \frac{(s + 1,446)(s - 0,3986)}{(s + 173,6)(s + 4,36)}$$

Os pólos de interesse do sistema completo compensado são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Autovalores do sistema com controlador K4 em São Luis II considerando atraso de 300ms.

Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
N-S	$-0,3769 \pm j3,4027$	11,01%	0,54Hz
N-NE	$-0,1397 \pm j4,750$	2,94%	0,76Hz

#### 6.1.1.2.1 Avaliação da robustez do sistema compensado

A Figura 11(b) apresenta a resposta dos sistemas compensados com os controladores K3 e K4 frente à perturbação de 1% da potência mecânica

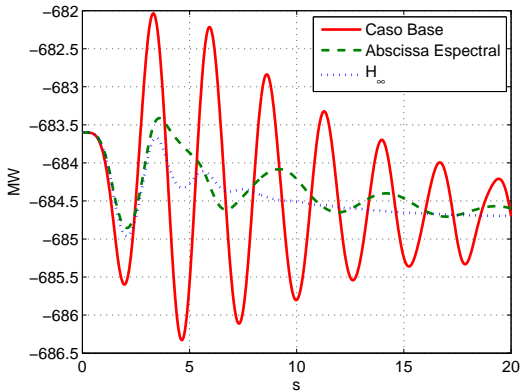
de entrada da usina Angra II. Consta-se que o amortecimento obtido com a minimização da norma  $H_\infty$  é superior àquele obtido com a minimização da abscissa espectral. A análise da Figura 8(b) referente ao controlador obtido com a minimização da abscissa espectral demonstra que há diferentes modos de oscilação presentes na oscilação pouco amortecida detectada. Com o controlador  $K4$ , a influência destes modos é atenuada, demonstrando que o controlador obtido com a função objetivo de minimização da norma  $H_\infty$  é mais robusto que o anterior.

Os resultados das duas contingências em linhas de transmissão listadas na Seção 5.7.1 são apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13. Na primeira está ilustrado o comportamento do sistema quando há desligamento no circuito em que a potência ativa transmitida têm o maior fator de controlabilidade sobre o modo N-S provocando o surgimento das oscilações referentes à este modo. Percebe-se que a amplitude das oscilações, bem como o esforço de controle medido pela susceptância do SVC, são maiores no sistema compensado em que houve minimização da abscissa espectral do que naquele em que houve otimização da norma  $H_\infty$ . A Figura 6.13 demonstra o comportamento do sistema compensado quando é aberto o circuito paralelo àquele onde é obtido o sinal remoto para a entrada do controle adicional em São Luis II.

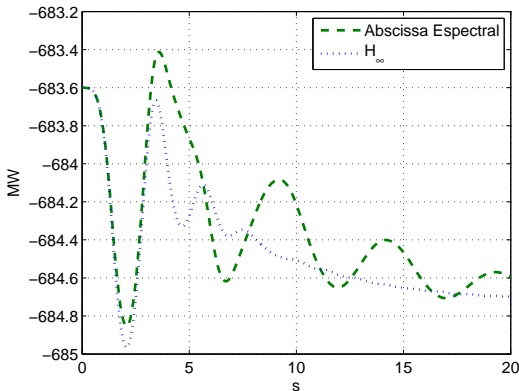
Observa-se na Figura 6.13 que há saturação do controle do compensador estático e que em regime permanente, pós falta, há permanência de uma oscilação não amortecida com frequência de aproximadamente 3,1 Hz. Observa-se também que o fluxo pós falta na linha de transmissão entre Miracema e Gurupi, mesmo local de onde é obtido o sinal de entrada para os controladores, passa de aproximadamente 700 MW para aproximadamente 1300 MW. Para esta contingência, abertura do circuito paralelo àquele onde é obtido o sinal de entrada dos controladores entre Miracema e Gurupi no tronco N-S, o fluxo de potência naquele trecho do tronco N-S, pós falta, passa a ter aproximadamente o dobro da amplitude do sinal pré falta. A severidade desta contingência pode ter excitado algum modo de oscilação que, devido a mudança no ponto de operação do sistema, o sistema linearizado inicial não é capaz de identificar. Devido a esta instabilidade, esta contingência não será mais considerada para a avaliação da robustez dos controladores projetados.

Os traçados do pseudo-espectro, Figura 6.14 e Figura 6.15, ilustram que a matriz de estados do sistema compensado com o controlador obtido com a minimização da norma  $H_\infty$  admite perturbação  $\varepsilon$  sem perder a estabilidade que é maior do que a perturbação admitida pela planta compensada com o controlador projetado através da minimização da abscissa espectral.

A Figura 6.14 ilustra que a maior perturbação  $\varepsilon$  admissível sem que



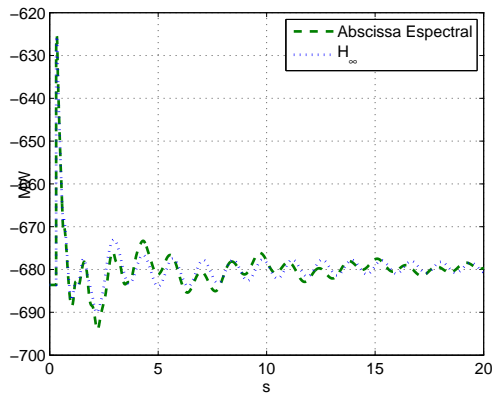
(a) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II



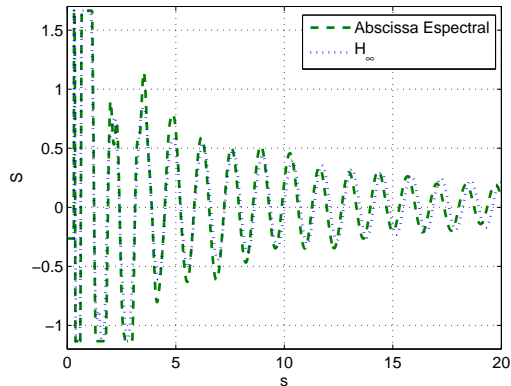
(b) Sistema Compensado em São Luis II

Figura 6.11: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores  $K3$  e  $K4$ , à contingência  $n^{\circ} 01$ .

haja transposição do pseudo-espectro da matriz de estados do sistema compensado com o controlador  $K3$  para o semiplano a direita do eixo imaginário do plano complexo é  $0,01037$ . Para o controlador  $K4$ , como mostra a Figura 6.15, a maior perturbação da matriz de estados admissível sem que haja transposição do pseudo-espectro do sistema compensado para o semiplano



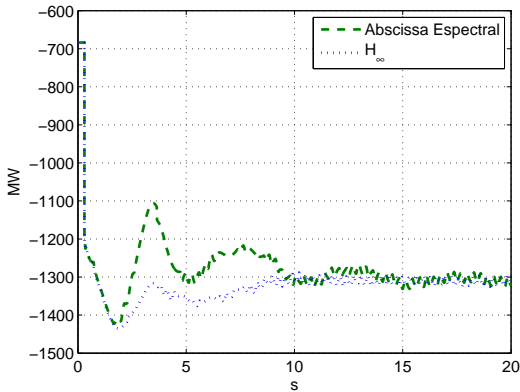
(a) Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi;



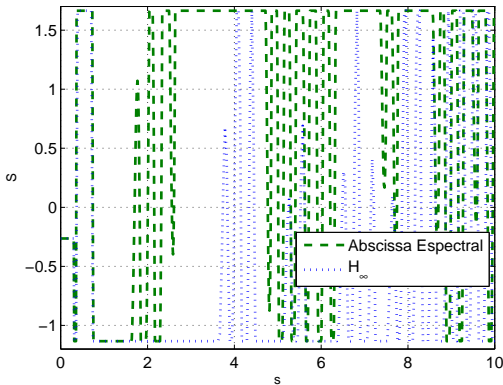
(b) Susceptância do SVC em São Luis II.

Figura 6.12: Resposta do sistema, com controladores  $K3$  e  $K4$ , à contingência nº 03.

direito do plano complexo é  $0,0375$ . Portanto, o projeto com requisito de minimização da norma  $H_\infty$  é mais robusto que aquele que minimiza a abscissa espectral. Este resultado era esperado, uma vez que simplesmente afastar os pólos do sistema compensado do eixo imaginário, caso em que há minimiza-



(a) Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi;

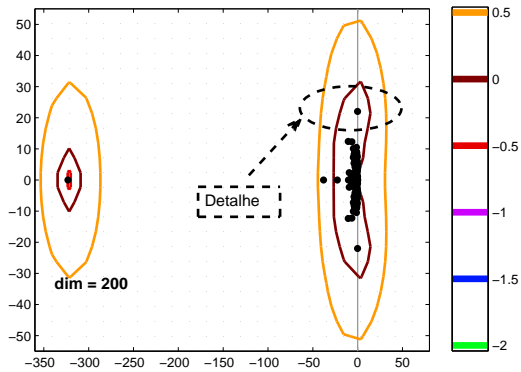


(b) Susceptância do SVC em São Luis II.

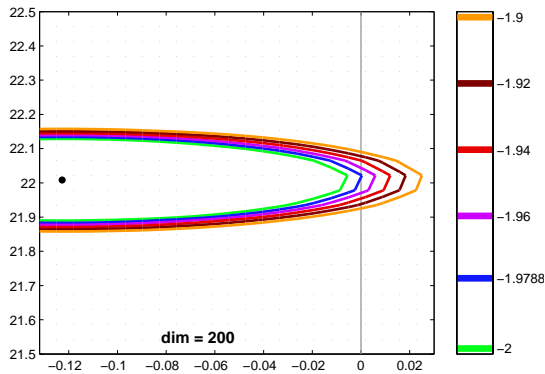
Figura 6.13: Resposta do sistema, com controladores  $K3$  e  $K4$ , à contingência nº 04.

ção da abscissa espectral de sistemas com matriz de estados não normal, não necessariamente confere robustez ao sistema.

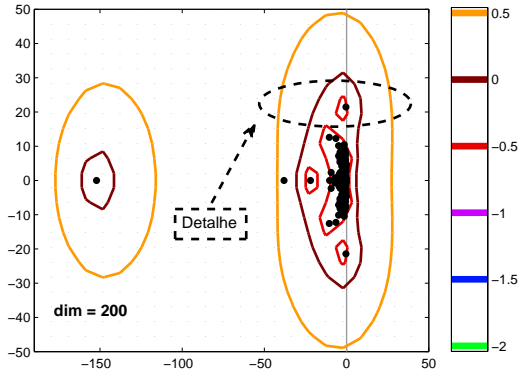
Já na Figura 6.16, após a perturbação da potência mecânica de entrada da usina de Xingó, evidencia-se que o modo N-NE é mais amortecido para o controlador em que há minimização da abscissa espectral, 3,24%, do que



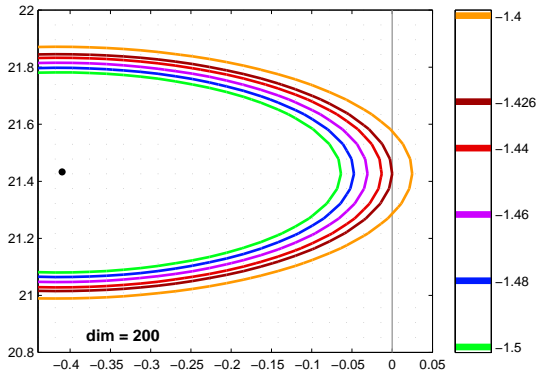
(a) Pseudo-espectro

(b)  $\varepsilon = 10^{-1,984} = 0,01037$ Figura 6.14: Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador  $K3$ .

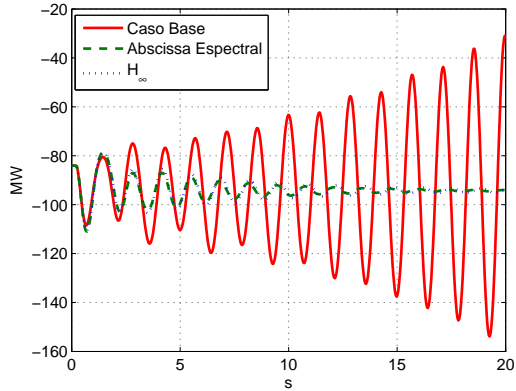
para aquele em que se minimiza a norma  $H_\infty$ , 2, 94%. Este fato não representa elevada relevância na análise do controlador, visto que o objetivo da malha de controle secundária no SVC de São Luiz é prover amortecimento ao modo N-S e não ao modo N-NE.



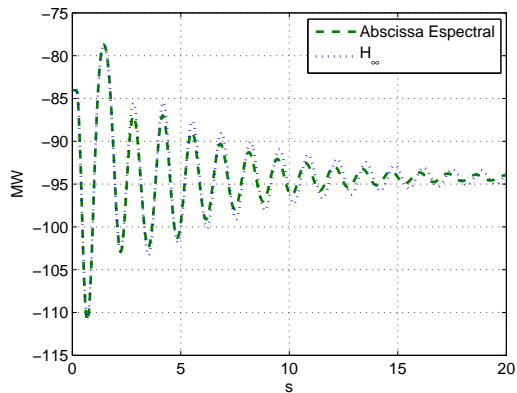
(a) Pseudo-espectro

(b)  $\varepsilon = 10^{-1,426} = 0,0375$ Figura 6.15: Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador  $K4$ .





(a) Caso Base e Sistema Compensado em São Luis II



(b) Sistema Compensado em São Luis II

Figura 6.16: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores  $K_3$  e  $K_4$ , à contingência n<sup>o</sup> 02.

### 6.1.2 Posicionamento de par de pólos

Mantendo a análise realizada na seção 5.3, que define a localização para a malha de controle secundária, será projetado uma malha de controle adicional para o SVC instalado em São Luis II cujo sinal de entrada é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre Miracema e Gurupi do tronco de interligação N-S.

Devido a limitação para consideração do atraso para projeto de controladores através do método de posicionamento de pólos disponível no PacDyn, o método foi implementado sobre a plataforma Matlab e o PacDyn é utilizado para disponibilizar um sistema reduzido equivalente ao sistema completo para implementação do controlador via Matlab. O PacDyn também é utilizado para aplicação e análise do controlador obtido no sistema completo.

O sistema reduzido equivalente utilizado é o mesmo apresentado na seção 5.6 que foi utilizado para a obtenção dos controladores para otimização dos parâmetros abscissa espectral e norma  $H_\infty$  na seção 6.1.1.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos para o projeto de controladores para diferentes requisitos de amortecimento especificados.

Tabela 6.8: Autovalores do sistema com controlador projetado através do posicionamento de par de pólos com diferentes requisitos de amortecimento e considerando atraso de 300ms na obtenção de sinais remotos.

Requisito de projeto	Áreas	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência	Controlador
11%	N-S	$-0,2582 \pm j2,2974$	11,17%	0,37Hz	$K5 = 0,58812 \left( \frac{s+1,053}{s+5,086} \right)^3$
	N-NE	$0,035952 \pm j4,5328$	-0,79%	0,72Hz	
20%	N-S	$-0,4929 \pm j2,2828$	21,10%	0,36Hz	$K6 = 1,5743 \left( \frac{s+0,9883}{s+5,576} \right)^3$
	N-NE	$-0,03880 \pm j4,6536$	0,83%	0,74Hz	
50%	N-S	$-0,4649 \pm j2,3774$	19,19%	0,38Hz	$K7 = 1,9147 \left( \frac{s+1,202}{s+5,868} \right)^3$
	Controle	$-1,1427 \pm j2,3896$	43,14%	0,38Hz	
	N-NE	$-0,04537 \pm j4,6846$	0,95%	0,75Hz	
80%	N-S	$-0,2717 \pm j2,4786$	10,90%	0,39Hz	$K8 = 0,84031 \left( \frac{s+2,271}{s+6,471} \right)^3$
	N-NE	$0,085769 \pm j4,5565$	-1,88%	0,73Hz	

A primeira conclusão obtida da análise do comportamento dos autovalores do sistema compensado é que elevar o requisito de amortecimento para o projeto não garante que o sistema compensado tenha incremento no amortecimento do modo inter-áreas de interesse. Ao realimentarmos o sistema com o controlador obtido com elevado requisito de amortecimento modo inter-áreas deixará de ser representado pelo pólo alocado e o amortecimento do modo inter-áreas será melhorado, mas inferior ao especificado.

Observa-se para o caso com requisito de 50% de amortecimento que

o método de alocação de pólos posicionou um pólo próximo ao local especificado mas o modo inter-áreas continua com amortecimento inferior ao especificado. Para o controlador com especificação de 80% de amortecimento o modo inter-áreas N-S foi identificado e apresenta amortecimento inferior ao especificado e inferior a todos os demais casos de projeto. O pólo realocado com amortecimento próximo a 80% não foi identificado no PacDyn. Isto provavelmente se deve ao fato de que o pólo realocado deixou de ser dominante e o algoritmo do PacDyn não o identificou.

Portanto elevar demasiadamente o requisito de amortecimento no projeto aloca o pólo para atender ao requisito mas não garante o amortecimento do modo de interesse.

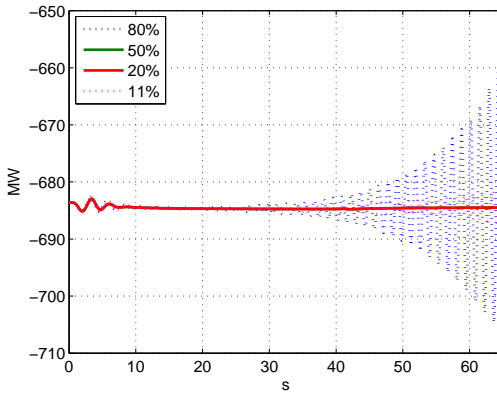
Das Figuras 6.17 e 6.18 destaca-se o comportamento instável dos controladores *K5* e *K8* obtidos com requisito de amortecimento de 11% e 80% respectivamente. Na primeira, perturba-se a potência mecânica de entrada da Usina Angra II para excitar o modo de oscilação inter-áreas N-S. Os quatro controladores amortecem o modo N-S e com o passar do tempo o modo N-NE instável para os controladores *K5* e *K8* predomina. Na Figura 6.18 reduz-se permanentemente 1% da potência mecânica de entrada da Usina Xingó para excitar o modo inter-áreas N-NE. Observa-se a pequena diferença no desempenho dos controladores *K6* e *K7* e o comportamento instável dos controladores *K5* e *K8*.

Nas Figuras 6.19 e 6.20 observa-se que o sistema compensado com o controlador *K7*, com requisito de projeto de 50% de amortecimento, tem leve vantagem sobre o controlador *K6*, com requisito de amortecimento de 20% na etapa de projeto.

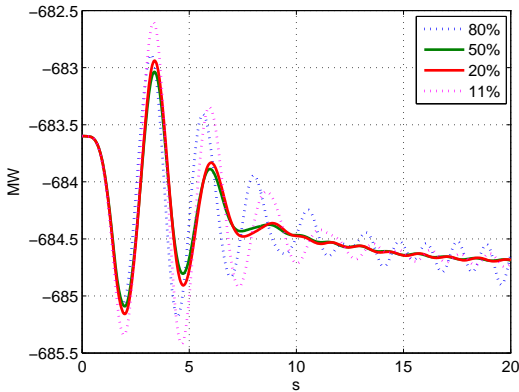
O motivo para a diferença ser tão pequena é aquele exposto através da Tabela 6.8. Apesar do controlador alocar o pólo no local solicitado, ele não é capaz de amortecer o modo N-S de acordo com o requisito e o sistema compensado com o controlador *K7*, apesar do requisito de 50% de amortecimento, apresenta modo inter-áreas N-S com amortecimento próximo a 20%.

Portanto, o melhor compensador para o SVC em São Luis II, obtido com o método de posicionamento de par de pólos, é aquele que tem como requisito de projeto amortecimento para o pólo de interesse de 50%. Esta conclusão é corroborada pelas Figuras 6.21 e 6.22 que demonstram que a matriz de estados do sistema compensado com o controlador obtido com requisito de projeto de 20% admite perturbação  $\varepsilon$ , para atingir a instabilidade, inferior àquela admitida pelo sistema compensado em que o requisito de projeto é 50%.

Pelo exposto nesta seção, para comparação de desempenho do método



(a) Oscilações dos modos N-S e N-NE;



(b) Instantes iniciais somente com a oscilação do modo N-S;

Figura 6.17: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores  $K5$ ,  $K6$ ,  $K7$  e  $K8$ , à contingência nº 01.

de alocação de pólos com os controladores obtidos através dos demais métodos de projeto, será utilizado o controlador  $K7$  conforme reproduzido na equação (6.1).

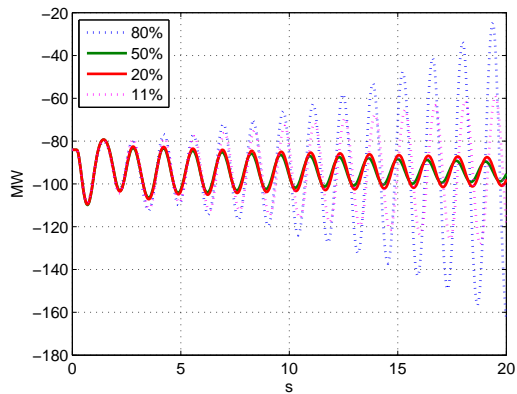


Figura 6.18: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores  $K_5$ ,  $K_6$ ,  $K_7$  e  $K_8$ , à contingência n° 02.

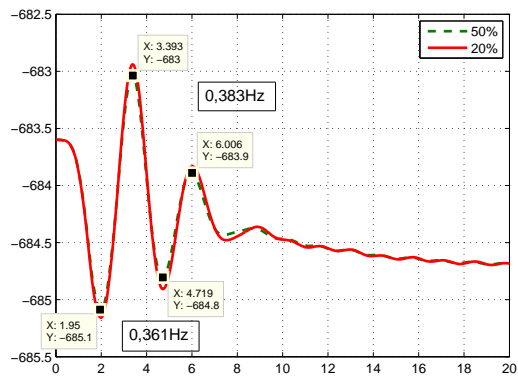


Figura 6.19: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema com controladores  $K_6$  e  $K_7$ , à contingência n° 01.

$$K_7 = 1,9147 \left( \frac{s + 1,202}{s + 5,868} \right)^3 \quad (6.1)$$

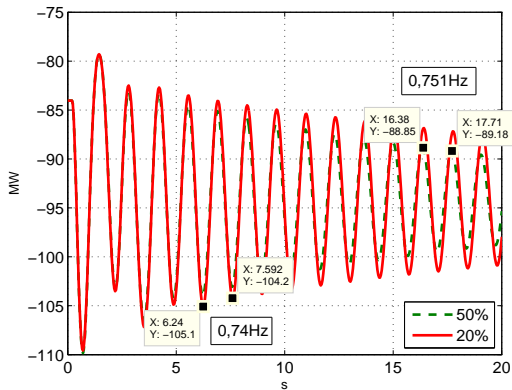
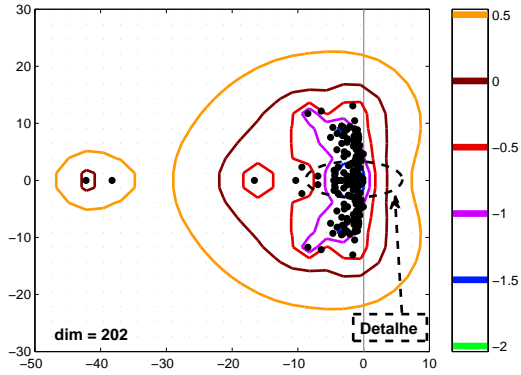
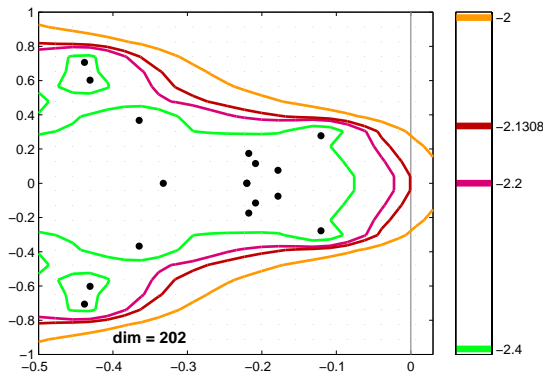


Figura 6.20: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema com controladores  $K_6$  e  $K_7$ , à contingência nº 01.

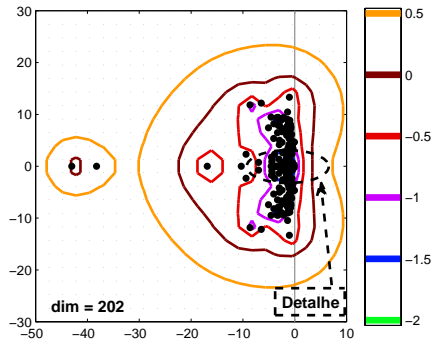


(a) Pseudo Espectro



(b)  $\varepsilon = 10^{-2,1308} = 0,0074$

Figura 6.21: Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador  $K6$ .



(a) Pseudo Espectro

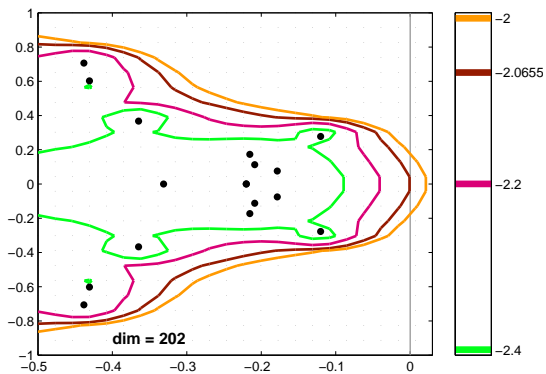
(b)  $\varepsilon = 10^{-2.0655} = 0,0086$ 

Figura 6.22: Pseudo-espectro do sistema compensado com o controlador K7.



## 6.2 Comparação de robustez entre os métodos de controle

Dentre os métodos de controle utilizados, resta-nos identificar aquele que apresenta os melhores resultados quanto ao amortecimento de oscilações e robustez. As Tabelas 6.9, 6.10 e 6.11 apresentam os resultados obtidos para o amortecimento do modo N-S, do modo N-NE e da perturbação  $\varepsilon$  admissível para cada um dos três métodos de projeto utilizados nas seções 6.1.1 e 6.1.2, respectivamente.

Tabela 6.9: Comparação do modo N-S com controladores  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ .

Controlador	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
$K3$	$-0,3760 \pm j3,3956$	11,01%	0,54Hz
$K4$	$-0,3769 \pm j3,4027$	11,01%	0,54Hz
$K7$	$-0,4649 \pm j2,3774$	19,19%	0,38Hz

Se o principal requisito de projeto do controlador for a elevação do amortecimento do modo N-S, o melhor resultado obtido neste quesito foi obtido com o controlador  $K7$  calculado através do método de posicionamento de par de pólos. A avaliação gráfica do comportamento do modo N-S para cada um dos controladores é apresentada na Figura 6.23 onde observa-se que o melhor comportamento de amortecimento do modo N-S é obtido com o controlador  $K4$ .

Pode-se dizer que garantir amortecimento elevado ao sistema linearizado em certa condição de operação não garante a robustez do sistema controlado enquanto para controladores robustos pode-se garantir determinado amortecimento do sistema, mesmo que baixo, para diferentes situações. Trata-se do *trade-off* entre desempenho e robustez. Controladores que garantem desempenho elevado para um determinado ponto de operação não são robustos o suficiente para garantir o mesmo desempenho quando há mudanças nas condições de operação. Controladores robustos, mesmo com desempenho inferior, garantem desempenho mínimo para diversas condições de operação.

Um efeito dos controladores calculados é prover amortecimento ao modo N-NE. De acordo com o apresentado na Tabela 6.10, o melhor resultado obtido para o amortecimento deste modo foi com o controlador  $K3$  calculado com requisito adicional de minimizar a abscissa espectral do sistema compensado. A avaliação da Figura 6.24, após a excitação do modo N-NE através da redução permanentemente de 1% da potência mecânica de entrada da Usina Xingó, corrobora o observado na Tabela 6.10.

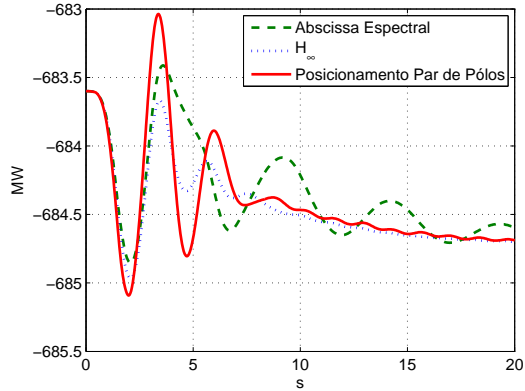
Tabela 6.10: Comparação do modo N-NE com controlador  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ .

Controlador	Modo de Oscilação	Amortecimento	Frequência
$K3$	$-0,1560 \pm j4,8126$	3,24%	0,77Hz
$K4$	$-0,1397 \pm j4,750$	2,94%	0,76Hz
$K7$	$-0,04537 \pm j4,684$	0,95%	0,75Hz

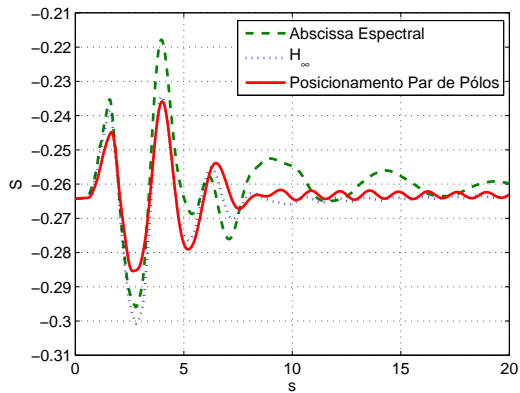
Tabela 6.11: Comparação da perturbação  $\varepsilon$  admissível com controladores  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ .

Controlador	$\varepsilon$
$K3$	0,01037
$K4$	0,0375
$K7$	0,0086

A robustez dos sistema compensados, medida através da avaliação do pseudo-espectro, indica que o melhor controlador é aquele projetado com o objetivo de reduzir a norma  $H_\infty$  entre entrada e saída do sistema compensado. Isto explica o fato de a análise gráfica do amortecimento do modo N-S nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25 indicar que o controlador que melhor amortece este modo é o  $K4$ . Apesar de o autovalor do sistema compensado apresentar amortecimento inferior ao obtido com o controlador  $K7$ , por ser mais robusto, ao haver alteração do ponto de operação do sistema, o controle mantém sua eficácia enquanto o desempenho do controlador  $K7$  é deteriorada.

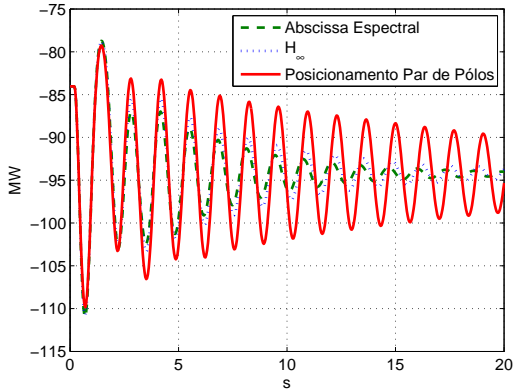


(a) Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi;

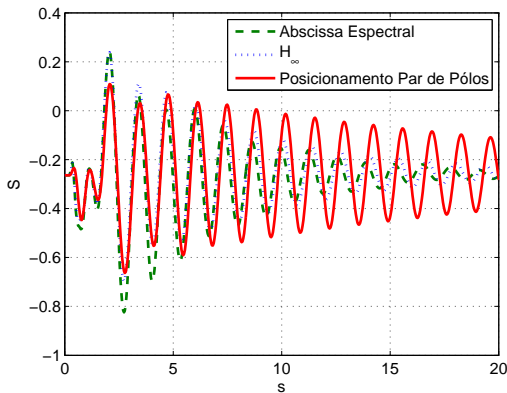


(b) Susceptância do SVC em São Luis II.

Figura 6.23: Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi. Resposta do sistema, com controladores  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ , à contingência  $n^o$  01.

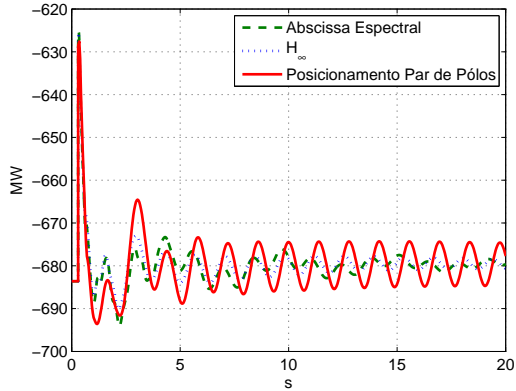


(a) Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga;

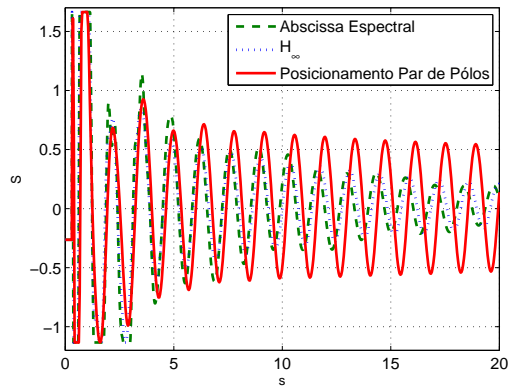


(b) Susceptância do SVC em São Luis II.

Figura 6.24: Fluxo de potência ativa entre Paulo Afonso e Luiz Gonzaga. Resposta do sistema, com controladores  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ , à contingência  $n^o$  02.



(a) Fluxo de potência ativa entre Miracema e Gurupi;



(b) Susceptância do SVC em São Luis II.

Figura 6.25: Resposta do sistema, com controladores  $K3$ ,  $K4$  e  $K7$ , à contin-gência nº 03.

### 6.3 Amortecimento do modo de oscilação N-NE

Para o modo de oscilação N-S conclui-se que o melhor equipamento FACTS para a instalação de um sinal de controle adicional para elevar o amortecimento é o SVC localizado em São Luis II. O sinal de entrada escolhido para este controlador é o fluxo de potência em um dos circuitos paralelos do tronco de interligação N-S entre Miracema e Gurupi.

Dos métodos de controle explorados, conclui-se que o que apresenta o melhor resultado para mitigar as oscilações do modo N-S é aquele projetado para minimizar a norma  $H_\infty$  denominado  $K4$ .

Após incluir o controlador  $K4$  no SVC de São Luis II, determina-se outro SVC com as características de controlabilidade apropriadas para aumentar o amortecimento do modo N-NE. A Tabela 6.12 destaca os três SVC que apresentam maiores fatores de controlabilidade para o modo de oscilação inter-áreas N-NE. Um destes será determinado como apropriado para a instalação do sinal adicional com objetivo de mitigar a oscilação do modo N-NE.

Tabela 6.12: Fator de Controlabilidade dos SVC do SIN para o modo N-NE.

Localização	FC
Bandeirantes (42)	0,1197
Bandeirantes (43)	0,1197
Campos (46)	0,1428
Barro Alto (55)	<b>0,2404</b>
Ouro Preto (389)	<b>0,2255</b>
Coxipó (4530)	0,07666
Campina Grande (5239)	0,1502
Milagres (5410)	<b>0,2006</b>
Fortaleza (5450)	0,07053
São Luis (5551)	0,08049
Funil (5902)	0,09255
Bom Jesus da Lapa (6349)	0,1424

A Tabela 6.13 elenca os candidatos a sinal de entrada da malha de controle secundária do SVC. Estão listadas as barras cujas frequências apresentam maior observabilidade do modo N-NE, as barras locais dos SVC que apresentam maior controlabilidade, com indicação de seus respectivos fatores

de observabilidade, e as Linhas de Transmissão com a melhor observabilidade do modo em questão.

Tabela 6.13: Fatores de Observabilidade do modo N-NE para frequência e fluxo de potência ativa.

<b>Frequência da barra</b>	<b>Fator de observabilidade frequência</b>
Tucuruí (6424)	1,0
V. Conde (6465)	0,8938
Barro Alto(55)	0,06279
Ouro Preto (389)	0,05661
Milagres (5410)	0,2986
<b>Fluxo de potência ativa da linha</b>	<b>Fator de observabilidade fluxo de potência ativa</b>
Tucuruí (6430) - Marabá (6509)	1,0
Marabá (6509) - Marabá (6400)	0,9501

Como não há possibilidade de compararmos os fatores de observabilidade referentes às frequências com aqueles referentes aos fluxos de potência ativa, calculam-se os resíduos das combinações de SVC com melhores fatores de controlabilidade e os locais com melhores fatores de observabilidade. Esta medida determina aonde deve ser alocado o sinal adicional e qual deve ser a origem do sinal de entrada.

A Tabela 6.14 apresenta o comparativo dos resíduos. De acordo com os resultados, o melhor equipamento FACTS para a instalação de um controlador adicional visando a elevação do amortecimento do modo N-NE é o SVC de Barro Alto considerando como sinal portador de informação sobre o modo de interesse na entrada do controlador o fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre Tucuruí e Marabá.

Determinado o local para instalação do sinal adicional, serão utilizados os métodos de projeto discutidos anteriormente para projeto de controlador que melhore o amortecimento das oscilações do modo N-NE.

Tabela 6.14: Resíduos das funções de transferência de interesse para o modo de oscilação N-NE.

Frequência da barra	Módulo Resíduo SVC Barro Alto	Módulo Resíduo SVC Ouro Preto	Módulo Resíduo SVC Milagres
Tucuruí (6424)	0,009556	0,0089624	0,0079751
V Conde (6465)	0,0085416	0,008011	0,0071285
Barro Alto (55)	0,0006	–	–
Ouro Preto (389)	–	0,0005074	–
Milagres (5410)	–	–	0,0023811
Fluxo de potência ativa da linha	Módulo Resíduo SVC Barro Alto	Módulo Resíduo SVC Ouro Preto	Módulo Resíduo SVC Milagres
Tucuruí (6430) - Marabá (6509)	<b>0,17145</b>	0,1608	0,14308
Marabá (6509) - Marabá (6400)	0,16289	0,15277	0,13594

### 6.3.1 Projeto de controlador descentralizado

Neste estudo, as técnicas de controle descritas na Seção 4.4 foram aplicadas para aumentar o amortecimento do modo N-S do SIN. Dos métodos estudados, o que apresentou melhor resultado foi o da minimização da norma  $H_\infty$  conforme exposto na seção 6.2. Portanto, aplica-se este controlador para mitigar as oscilações do modo N-S no SIN e a partir do sistema compensado com o controlador  $K4$  busca-se outro controlador que mitigue as oscilações do modo N-NE.

Por analogia ao caso do projeto do controle para o modo N-S, assume-se a expectativa que um projeto que minimize a norma  $H_\infty$  do controlador apresentará melhores resultados que os demais controladores descritos também para o modo N-NE, somente este método será considerado pra o projeto deste segundo controlador.

De acordo com o descrito na Seção 4.2.1.1 a principal característica de um projeto não coordenado é a aplicação de uma técnica de projeto qualquer, de maneira sequencial, à diversos controladores do sistema, sem estudo da interação entre os controles projetados.

Conhecendo que para reduzir as oscilações do modo N-NE, de acordo com a Tabela 6.14, deve-se aplicar um sinal adicional no SVC de Barro Alto utilizando o fluxo de potência entre Tucuruí e Maraba como sinal portador da informação sobre o modo de oscilação entre estas regiões, utiliza-se o sistema já compensado para a elevação do amortecimento de oscilações do modo N-S para se obter um sistema reduzido que possibilite o projeto do controlador para elevar o amortecimento do modo N-NE.

Limitado ao número de estados permitidos pelo PacDyn, obtém-se um



sistema reduzido com 200 estados. Durante o projeto do controlador robusto para minimizar a norma  $H_\infty$  deste sistema chega-se a conclusão que a matriz do espaço de estados do sistema reduzido está próxima da singularidade, comprometendo o resultado da otimização.

Além de a matriz de estados estar próxima da singularidade, observa-se na Figura 6.26 que o sistema reduzido com 200 estados não representa de maneira adequada o sistema completo. Apesar da magnitude do diagrama de Bode apresentar leve coincidência nas proximidades da frequência do modo de oscilação de interesse, a fase da resposta em frequência está muito distante daquela apresentada pelo sistema completo.

Buscando afastar o sistema reduzido da singularidade, modela-se um novo sistema reduzido com a eliminação dos pólos com os menores resíduos e buscando-se outros pólos com resíduos elevados que aproximem ainda mais a resposta em frequência do sistema reduzido àquela do sistema completo. Isto resulta em uma nova redução com 170 estados cujo comportamento nos domínios da frequência e do tempo são apresentados na Figura 6.26 para comparação com aquele sistema com 200 estados.

Apesar do sistema reduzido com 170 estados ser de ordem inferior daquele com 200 estados, tratam-se de modelagens totalmente diferentes em que a seleção dos autovalores do sistema levou em consideração diferentes valores de resíduo. Para o sistema com 170 estados, os resíduos dos autovalores selecionados são superiores aos resíduos dos autovalores do sistema com 200 estados.

Nota-se, nos dois casos de sistemas reduzidos, que a fase da resposta em frequência se aproxima de  $180^\circ$  quando a frequência diminui. Isto evidencia a presença de pelo menos dois zeros não cancelados na origem. Este comportamento não é observado na resposta em frequência do sistema completo bem como no mapa de zeros e pólos deste sistema reduzido não se observa a presença de zeros na origem. Para os dois sistemas reduzidos observa-se a presença de zeros no semiplano direito do plano complexo. Para o sistema reduzido com 200 estados, há 5 zeros no semiplano direito e para o sistema reduzido com 170 estados, há 3 zeros no semiplano direito do plano complexo. Apesar dos zeros à direita do eixo imaginário, o problema de proximidade da singularidade foi eliminado no sistema reduzido com 170 estados.

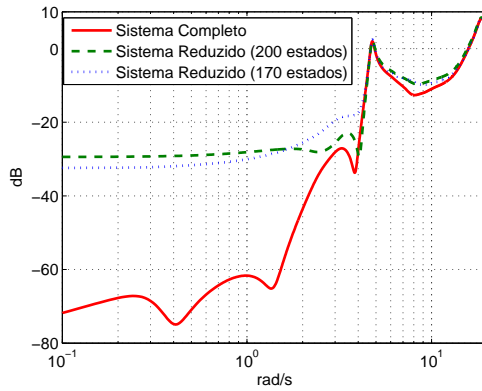
Utiliza-se portanto, o novo sistema equivalente para o projeto do controlador para elevar o amortecimento do pólo N-NE. Os resultados no Matlab apresentam amortecimento de aproximadamente 9% para o modo de interesse. Porém, ao se transportar o controlador calculado no Matlab com o sistema reduzido para o PacDyn com o sistema completo, o amortecimento

do modo de oscilação N-NE é reduzido para níveis em torno de 0,1%, inferior inclusive ao amortecimento inicial.

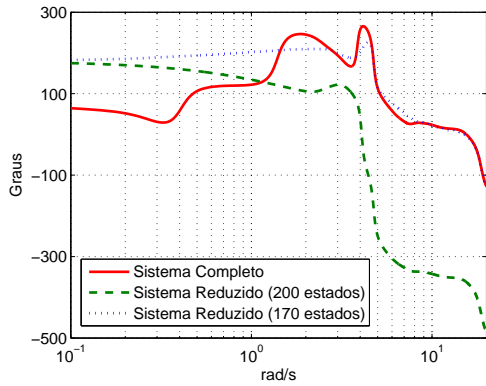
O comportamento descrito pode ser explicado pela presença de zeros a direita do eixo imaginário do plano complexo. A influência destes três zeros, além de não representarem fielmente as características do sistema real, podem estar limitando o ganho do controlador de modo a satisfazer o sistema reduzido podendo ser considerado ínfimo frente às necessidades do sistema completo.

A proposta deste capítulo era comparar o desempenho dos controladores em mais de um equipamento FACTS considerando os métodos de projeto centralizados, descentralizados coordenados e não coordenados.

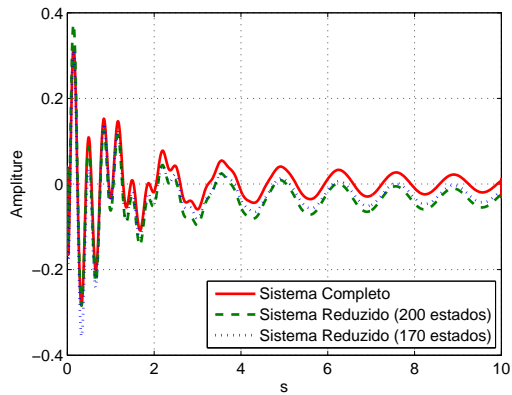
As descrições das seções 5.4 e 6.3.1 mostram que há uma representação adequada do SIN, através de um sistema reduzido, permitindo o projeto de controladores para mitigar as oscilações inter-áreas Norte e Sul através dos diversos métodos apresentados. O mesmo não acontece para o modo de oscilação N-NE. Após a identificação do melhor local para a instalação de um sinal adicional para elevar o amortecimento do modo N-NE, não foi possível obter um sistema reduzido capaz de reproduzir o SIN de maneira satisfatória. Desta forma não há condições para realizar o projeto para estas três modalidades de controladores, centralizado e descentralizado coordenado e não coordenado.



(a) Amplitude Diagrama de Bode



(b) Fase Diagrama de Bode



## 6.4 Conclusão

Para a elevação das condições de amortecimento do modo N-S do SIN, foram aplicados diferentes sinais adicionais ao SVC instalado em São Luis II calculados com os métodos de projeto de alocação de pólos, de minimização da abscissa espectral e da minimização da norma  $H_{\infty}$ .

Considerando atraso de  $300ms$  na recepção do sinal de entrada, o melhor resultado obtido para o amortecimento refere-se ao controlador que minimiza a norma  $H_{\infty}$ . O motivo para este resultado é a robustez conferida ao controlador obtido por este método de projeto.

Observa-se que, devido as características do sistema e das limitações do PacDyn, através do método de redução de ordem apresentado não é possível obter um sistema equivalente que represente de maneira adequada a função de transferência indicada para o projeto de um controlador que mitigue as oscilações N-NE. Desta forma não foi possível estudar e comparar o desempenho de controladores centralizados e descentralizados coordenados e não coordenados.

## 7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 7.1 Revisão e conclusões

Durante o desenvolvimento dos resultados estudou-se o efeito dos equipamentos FACTS para a mitigação de oscilações inter-áreas em sistemas de potência. Aplicações convencionais de sinais adicionais consideram somente os reguladores de tensão das máquinas síncronas para inclusão de PSS com o objetivo de redução das oscilações dos sistemas de potência.

A utilização de fatores de observabilidade e controlabilidade auxiliam na detecção de outros locais, que não aqueles onde há geradores instalados, para aplicações de técnicas de amortecimento de oscilações. Considerando a disponibilidade de um equipamento FACTS para instalação em qualquer ponto do sistema, este equipamento deverá ser mais eficaz no controle de oscilações do que a instalação de PSS. Considerando equipamentos FACTS já instalados no sistema, estes também podem ser utilizados para o controle de oscilações como complemento do controle realizado pelos PSS's.

A aplicação primária de equipamentos FACTS está associada ao controle de tensão e ao controle do fluxo de potência dos sistemas de transmissão. Estas aplicações sugerem que estes equipamentos sejam instalados em locais que confirmam elevada controlabilidade da tensão e do fluxo de potência. Como o agravamento das oscilações inter-áreas está relacionado à limitação da capacidade de transmissão entre as áreas envolvidas, há grande possibilidade de que algum equipamento FACTS instalado no sistema exerça elevada controlabilidade sobre o modo de oscilação de interesse. O mesmo não é válido para os reguladores de tensão das máquinas síncronas, que estão instaladas em regiões normalmente isoladas, distantes das principais linhas inter-áreas, o que limita os índices de controlabilidade das máquinas sobre os modos de oscilação inter-áreas.

A utilização de malhas de controle adicionais no equipamentos FACTS juntamente com técnicas de projeto de controladores robustos para a mitigação de oscilações de sistemas ampliam as possibilidades de controle dos modos de oscilação para além dos PSS das máquinas síncronas e aumentam a segurança de operação do sistema evitando a propagação de oscilações pouco amortecidas por longos intervalos de tempo.

Sobre o projeto de controladores, cabem alguns comentários. Primeiramente, foi observada a superioridade de um controlador robusto sobre controladores não robustos com a comparação de um controlador robusto que minimiza a norma  $H_\infty$  com os controladores não robustos que simplesmente

minimizam a abscissa espectral, ou que conferem amortecimento elevado ao sistema sem outro critério de projeto do controlador.

Como o sistema de potência é de ordem elevada, o projeto de controladores pode resultar em controladores também de ordem elevada ou em tempo de processamento demasiadamente grande. Para contornar este problema busca-se a redução destes sistemas de grande porte em um equivalente-modal de menor ordem. A dificuldade para encontrar este sistema equivalente pode inviabilizar a utilização dos métodos de projeto como os sugeridos nesta dissertação. Para contornar os problemas encontrados com a ordem de grandeza dos controladores, o pacote HIFOO apresenta uma solução para otimização de sistemas não convexos e não suaves que projeta um controlador com ordem fixa determinada pelo usuário.

Cabe ressaltar também que, o desempenho do controlador será melhor, quando maior forem os índices de controlabilidade e observabilidade do local onde será instalado o controlador adicional e do local onde se obtém o sinal de entrada deste mesmo controlador. Porém, a não consideração dos atrasos inerentes à transmissão dos sinais de entrada ou saída do controlador, reduz o desempenho do controlador e pode conduzir o sistema à situação indesejada de perda de estabilidade.

## 7.2 Propostas para trabalhos futuros

Visando a complementação deste trabalho, sugere-se o estudo aprofundado de uma forma de migração dos dados do sistema linearizado representados no PacDyn para o Matlab.

Como há técnicas de projeto de controladores robustos que fixam a ordem do controlador, independentemente da ordem da planta, e com a disponibilidade de *hardware* e *software* de alta capacidade, há de se estudar a possibilidade de projetar os controladores sem a necessidade de se reduzir a ordem do sistema original, neste caso o SIN.

Após o equacionamento da representação do sistema linearizado no Matlab, com ou sem redução de ordem, pode-se dar continuidade aos trabalhos com o projeto de controles centralizados, hierárquicos e descentralizados, coordenados ou não, que atuem sobre mais do que um modo de oscilação. Pode-se incluir o estudo da maximização do raio de estabilidade para comparação de controladores projetados com índices de robustez diferentes. Como a evolução dos sistemas de comunicações estão reduzindo os tempos de transmissão de sinais, na continuação dos trabalhos pode-se reduzir o tempo de atraso de transmissão de sinais de 300ms para 100ms e desta forma reduzir

a severidade da condição imposta para o projeto do controlador possibilitando a obtenção de resultados melhores.

Pode-se estudar a possibilidade da instalação de novos equipamentos FACTS definindo a melhor localização e levando em consideração as interações do novo equipamento com aqueles já instalados no sistema e as interações com os PSS's já sintonizados para a mitigação das oscilações inter-áreas.





## REFERÊNCIAS

FRANKLIN, Gene F. and Powell, David J. and Abbas, Emami-Naeini.

ABIDO, M. A. Power system stability enhancement using FACTS controllers: A review. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 34, n. 1B, p. 153–170, 2009.

ABOUL-ELA, M. et al. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 2, p. 767–773, may 1996.

ACHA, E. et al. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. [S.l.]: Newnes, 2002. 443 p.

ACHARYA, N.; SODE-YOME, A.; MITHULANANTHAN, N. Facts about flexible ac transmission systems (FACTS) controllers: Practical installations and benefits. *Proceeding of AUPEC Hobart*, Sep 2005.

ADAPA, R. et al. Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS). *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 4, p. 1848–1853, oct 1997.

ALMEIDA, K. C.; SILVA, A. S. *Relatório 1: Levantamento do uso de Equipamentos FACTS*. 2006. Projeto ONS-UFSC GAT-CT-177/06: Aplicação de Dispositivos FACTS para Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN.

ANGQUIST, L. STATCOM system for providing reactive and/or active power to a power network. 2010. Patent Application Publicaton No.: US 2010/0171472 A1.

BAMASAK, S.; ABIDO, M. Robust coordinated design of PSS & STATCOM controllers for damping power system oscillation. *Power Systems Computation Conference*, August 2005.

BEGOVIC, M. et al. Wide-area protection and emergency control. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 5, p. 876–891, may 2005.

BORGES, R. C. *Um algoritmo para sintonia de controladores robustos para amortecimento de modos intra-planta em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009.

- BRETAS, N.; ALBERTO, L. Coherency on electrical power systems. In: *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 157–162 vol.1.
- BURKE, J. V.; HENRION, D.; LEWIS, A. S. HIFFO - a Matlab package for fixed-order controller design and  $h_\infty$  optimization. *IFAC Symposium on Robust Control Design*, July 2006.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. A nonsmooth, nonconvex optimization approach to robust stabilization by static output feedback and low-order controllers. *IFAC Symposium on Robust Control Design*, p. 175–181, June 2003.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. Optimization and pseudospectra, with applications to robust stability. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, v. 25, n. 1, 2003.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. A robust gradient sampling algorithm for nonsmooth, nonconvex optimization. *SIAM Journal on Optimization*, v. 15, n. 3, p. 751–779, 2005.
- BURNETT R.O., J.; BUTTS, M.; STERLINA, P. Power system applications for phasor measurement units. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 7, n. 1, p. 8–13, jan 1994.
- CHANIOTIS, D.; PAI, M. Model reduction in power systems using krylov subspace methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 2, p. 888–894, may 2005.
- CHAUDHURI, B.; MAJUMDER, R.; PAL, B. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 4, p. 1971–1979, nov. 2004.
- CHOW, J. et al. Singular perturbation analysis of large-scale power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 12, n. 2, p. 117–126, 1990.
- CIGRÉ. *FACTS Overview*. [S.l.]: IEEE Power Engineering Society, 1995.
- DOTTA, D. *Controle Hierárquico Usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

- DOTTA, D.; SILVA, A. e; DECKER, I. Power system small-signal angular stability enhancement using synchronized phasor measurements. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 1 –8, jun 2007.
- ELANGOVA, S.; LIM, C. Efficient pole-assignment method for designing stabilisers in multimachine power systems. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, v. 134, n. 6, p. 383 –384, november 1987.
- FARSANGI, M.; SONG, Y.; LEE, K. Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 2, p. 1135 – 1143, maio 2004.
- FARSANGI, M. et al. Sequential design of decentralised control for FACTS devices in large power systems. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 150, n. 2, p. 162 – 168, 2003.
- FERRAZ, J.; MARTINS, N.; TARANTO, G. Simultaneous partial pole placement for power system oscillation damping control. In: *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, p. 1154 –1159 vol.3.
- F.M.KANDLAWALA; A.H.M.A.RAHIM. Power system dynamic performance with STATCOM controller. *IEEE Technical Exchange Meeting*, April 2001.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, D. J.; ABBAS, E.-N. *Feedback Control of Dynamic Systems*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1994. 798 p.
- GAMA, C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating experience with a tcsc. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, p. 1103 –1108.
- GAMA, C.; TENORIO, R. Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of tcscs. In: *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 1462 –1467.
- GOMES, S. J.; MARTINS, N.; PINTO, H. J. d. C. P. Utilização do método de nyquist para a estabilização de sistemas de potência envolvendo alocação de par de pólos complexos. *Proceedings of XII Congresso Brasileiro de Automática*, Setembro 1998.
- GOOI, H. et al. Coordinated multi-machine stabilizer settings without eigenvalue drift. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100, n. 8, p. 3879 –3887, aug. 1981.

GUIMARÃES, C. H. C. et al. Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por posicionamento parcial de par de pólos complexos conjugados. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, p. 1661 – 1666, Set. 2000.

GUMUSSOY, S.; OZBAY, H. Remarks on strong stabilization and stable h infin; controller design. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 50, n. 12, p. 2083 – 2087, dec. 2005.

GYUGYI, L.; SCHAUDER, C. D.; SEN, K. K. Static synchronous series compensator: A solid-state approach to the series compensator of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 406 – 417, January 1997.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Undesrtandin FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. 452 p.

HU, Z.; MILANOVIC, J. The effectiveness of wam based adaptive supervisory controller for global stabilization of power systems. *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, p. 1652 –1659, jul. 2007.

KAMWA, I.; GRONDIN, R.; HEBERT, Y. Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 1, p. 136 –153, feb 2001.

KUMAR, B.; SINGH, S.; SRIVASTAVA, S. Placement of FACTS controllers using modal controllability indices to damp out power system oscillations. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 1, n. 2, p. 209 –217, march 2007.

KUMKRATUG, P. Improving power system transient stability with static synchronous series compensator. *American Journal of Applied Sciences*, v. 8, n. 1, p. 77 – 81, January 2011.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. — p. THE EPRI, Power System Engineering Series.

LEFEBVRE, S. Tuning of stabilizers in multimachine power systems. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-102, n. 2, p. 290 –299, feb. 1983.

- LEIRBUKT, A. et al. Wide area monitoring experiences in norway. *Power Systems Conference and Exposition*, p. 353 –360, oct 2006.
- LIRIO, F.; GOMES, S.; WATANABE, E. Coordinated controller design of multiples SVCs using detailed s-domain modeling. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, June 2007.
- MACKENROTH, U. *Robust Control Systems. Theory and Case Studies*. [S.l.]: Springer, 2004. 536 p.
- MANSOUR, Y. Competition and system stability-the reward and the penalty. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 228–234, Feb 2000.
- MARTINS, N. The dominant pole spectrum eigensolver. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 1, p. 245 – 254, feb 1997.
- MARTINS, N.; LIMA, L. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. In: *Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 74 –82.
- MESSINA, A. R.; PÉREZ, M. A.; HERNÁNDEZ, E. Co-ordinated application of FACTS devices to enhance steady-state voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 25, n. 4, p. 259 – 267, 2003.
- NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M.; FELIACHI, A. Communication delays in wide area measurement systems. *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, p. 118 – 122, 2002.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. *Numerical Optimization*. [S.l.]: Springer, 1999. 634 p.
- OKOU, F.; DESSAINT, L.-A.; AKHRIF, O. Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, v. 20, n. 3, p. 1465 – 1477, aug 2005.
- ONS. *Casos de Referência - Diretrizes para a Operação Elétrica Mensal*. nov 2010. [http://www.ons.org.br/operacao/regime\\_permanente.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/regime_permanente.aspx).

- ONS. *Casos de Referência - Diretrizes para a Operação Elétrica Mensal*. nov 2010. [http://www.ons.org.br/avaliacao\\_condicao/casos\\_perturbacoes.aspx](http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_perturbacoes.aspx).
- ONS. *PAR - Plano de Ampliação e Reforços*. nov 2010. [http://www.ons.org.br/plano\\_ampliacao/plano\\_ampliacao.aspx](http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx).
- PADIYAR, K. R. *HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions*. [S.l.]: New Age International, 2007. 302 p.
- PANDA, S.; R.N.PATEL; N.PADHY. Power system stability improvement by TCSC controller employing a multi-objective genetic algorithm approach. *International Journal of Intelligent Systems and Technologies*, p. 266 – 273, Fall 2006.
- PEREZ, M.; MESSINA, A.; FUERTE-ESQUIVEL, C. Application of FACTS devices to improve steady state voltage stability. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 1115 –1120.
- PHADKE, A. Synchronized phasor measurements-a historical overview. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, v. 1, p. 476 – 479, oct. 2002.
- PUPIN, C. E.; PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Atuação do (sssc) na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. *Anais da VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - VIII CBQEE*, p. 1 – 6, 2009.
- QUINTERO, J.; VENKATASUBRAMANIAN, V. A real-time wide-area control framework for mitigating small-signal instability in large electric power systems. *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2005.
- RAMASWAMY, G. et al. Synchrony, aggregation, and multi-area eigenanalysis. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 4, p. 1986 –1993, nov. 1995.
- RAMÍREZ, J. et al. FACTS-based stabilizers coordination. *Electrical Power and Energy System, Ed. ELSEVIER*, v. 24, p. 233–243, 2002.
- RAO, C. S.; NAGARAJU, S. S.; RAJU, P. S. A hybrid genetic-simulated annealing approach to TCPS based hydrothermal system under open market system. *ICGST-ACSE Journal*, v. 7, n. 2, p. 25 – 31, November 2007.

- REDDY, A. V. et al. New approach for the design of pole placement power system stabilizers. In: *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 324–327.
- REDDY, I. P.; RAM, B. S. STATCOM with flc for damping of oscillations of multi machine power system. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, v. 11, n. 1, p. 10–15, 2010.
- ROBAK, S.; RASOLOMAMPIONONA, D.; JANUSZEWSKI, M. Damping of power swings using a FACTS device of the TCPS type: modelling and laboratory experiments. *International Journal of Electrical Engineering Education*, v. 44, n. 3, p. 263–279, September 2007.
- ROMMES, J.; MARTINS, N. Efficient computation of multivariable transfer function dominant poles using subspace acceleration. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 4, p. 1471–1483, nov. 2006.
- SAGASTIZÁBAL, C.; SOLODOV, M. An infeasible bundle method for nonsmooth convex constrained optimization without a penalty function or a filter. *SIAM Journal on Optimization*, SIAM, v. 16, n. 1, p. 146–169, 2005.
- SAMUELSSON, O. et al. Power system damping in iceland based on phasor measurements. *Power Systems and Communication Systems Infrastructures for the Future*, Sep 2002.
- SAVELLI, D. *Síntese De Sinais E Escolha De Estrutura De Controladores De Sistemas Elétricos De Potência Interligados Considerando Robustez A Perturbações Externas*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2007.
- SEETHALEKSHMI, K.; SINGH, S.; SRIVASTAVA, S. Wide-area protection and control: Present status and key challenges. *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay*, p. 169–175, Dec 2008.
- SILVA, D. *Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema de Fluxo de Potência Ótimo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- SIMÕES, A. M. et al. Robust design of a tscs oscillation damping controller in a weak 500-kv interconnection considering multiple power flow scenarios and external disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 1, p. 226–236, Feb. 2009.

- SNYDER, A. et al. Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 2, p. 1009–1014, 2000.
- STEFANI, R. T. et al. *Design of Feedback Control Systems*. [S.l.]: Saunders College, 1994. 836 p.
- TREFETHEN, L. N.; EMBREE, M. *Spectra and pseudospectra. The behavior of nonnormal matrices and operators*. [S.l.]: pub-PRINCETON, 2005. 624 p.
- TREHAN, N. Operating power system under reduced generation availability. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, v. 2, p. 1400–1404, 2002.
- TRUDNOWSKI, D. Order reduction of large-scale linear oscillatory system models. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 1, p. 451–458, feb. 1994.
- UZUNOVIC, E. *EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers*. Tese (Doutorado) — University of Waterloo, 2001.
- VAJITA, M. Some remarks on padé-approximations. *3th TEMPUS-INTCOM symposium*, sep 2000.
- VITTAL, V. Consequence and impact of electric utility industry restructuring on transient stability and small-signal stability analysis. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 196–207, Feb 2000.
- WANG, H. Interaction analysis and co-ordination of svc voltage and damping control. In: *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 361–365.
- WESTERMANN, D.; SAUVAIN, H. Experience with wide area monitoring and FACTS control in a real time simulator. *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, p. 1–6, jun 2005.
- WILSON, R. E. Satellite synchronized measurements confirm power equation. *Potentials, IEEE*, v. 13, n. 2, p. 26–28, apr. 1994.
- WU, H.; WANG, Q.; LI, X. Pmu-based wide area damping control of power systems. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, p. 1–4, oct 2008.



XIE, X. et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT 2004)*., v. 1, p. 222 – 227, apr 2004.

YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 1998.

ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K. *Robust and Optimal Control*. [S.l.]: Prentice Hall, 1996. 596 p.