

DANIEL DOTTA

**CONTROLE HIERÁRQUICO USANDO SINAIS DE
MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA**

FLORIANÓPOLIS

2009

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

CONTROLE HIERÁRQUICO USANDO SINAIS DE
MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

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

DANIEL DOTTA

Florianópolis, Fevereiro de 2009

CONTROLE HIERÁRQUICO USANDO SINAIS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

DANIEL DOTTA

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor 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

Katia Campos Almeida, Ph.D
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Aguinaldo Silveira e Silva, Doutor
Presidente

Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Co-orientador

Glauco Nery Taranto, Doutor

Luiz Cera Zanetta Jr., Doutor

Antonio José Alves Simões Costa, Doutor

Alexandre Trofino Neto, Doutor

Para Nádía Orso, com a amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos podem não ser a parte mais importante do trabalho porém, com certeza, são a parte mais lida do documento.

Inicialmente gostaria de agradecer a minha família por todo o apoio dado ao longo de toda a minha carreira. O seu suporte foi fundamental para minha chegada até aqui.

Ao meu amigo Prof. Mario de Noronha Neto, pelas discussões e incentivo dados ao longo deste trabalho. Não poderia também esquecer do incentivo de Fabiano Ventura e Patrick Cruz.

Agradeço aos meus amigos e colegas de LabPlan, Adriano de Souza, Erlon C. Finardi e Marcelo N. Agostini, que em diferentes momentos deram a sua contribuição para a realização deste trabalho. Meus colegas de sala, Adriano e Erlon deram contribuições distintas no início e no final deste trabalho. Os dois com paciência tiraram minhas dúvidas nas suas respectivas áreas de atuação, dinâmica e otimização. Já o Marcelo foi meu parceiro de jornada durante todo o trabalho, discutindo resultados e agregando inteligência aos desenvolvimentos.

Aos colegas e amigos de pós-graduação Alexandre Fürstenberger, Alexandre Zucarato, Diego Issicaba, Edson Aranha, Gabriel Paim, Gelson Brigatto, Geraldo Kindermann, Geyson Brustolin, Gustavo Arfux, Fabiano Florisbal, Fabrício Takigawa, Fernando Prioste, Maurício Sperandio, Marina Souto, Marcelo Santos, Raphael Gonçalves, Ritchie Guder, Wilson Costa e Vitor Matos pela convivência e amizade. Ao amigo Miguel Moreto pela sua ajuda com o Latex.

Aos meus colegas e amigos de CEFET, Professores Everthon T. Sica, Rafael Nilson Rodrigues e Rubiara Cavalcante Fernandes. Gostaria de registrar um agradecimento especial ao Prof. Rafael pelo suporte dado na disciplina de Análise de SEE. Esse suporte me proporcionou tempo precioso nos momentos finais desta Tese. Ao Prof. Piara um sincero muito obrigado por toda a sua ajuda desde a minha chegada a instituição. Sua sensibilidade e senso de companheirismo são uma constante aula de convivência.

Aos meus orientadores, Prof. Aguinaldo Silveira e Silva e Prof. Ildemar Cassana Decker pela formação de qualidade.

Gostaria de ressaltar a contribuição do Prof. Alexandre Trofino Neto, que acabaram resultando na segunda parte deste trabalho. Apesar dos poucos encontros, o Prof. Trofino foi sempre

muito receptivo, dando contribuições significativas que alteraram o rumo dos desenvolvimentos.

Finalmente, agradeço aos membros da banca pelas contribuições dadas no momento da defesa. Em especial ao Prof. Simões Costa, pesquisador de notória excelência, leu com extremo cuidado o documento, apresentando contribuições que aumentaram o nível do trabalho.

”Primeiro eu acho, depois eu procuro.”

(Albert Einstein)

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

CONTROLE HIERÁRQUICO USANDO SINAIS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Daniel Dotta

Fevereiro / 2009

Orientador: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: PMU, Otimização, Controle Hierárquico.

Número de Páginas: 134

Os sistemas de medição fasorial sincronizada (SPMS) também conhecidos como *Wide-Area Measurement Systems* (WAMS) apresentam-se como um novo paradigma no processo de monitoração do sistema elétrico. Estes sistemas são capazes de medir fasores, distantes geograficamente, com taxas de amostragem muito superiores aos tradicionais sistemas SCADA. Por meio dos SPMS é possível realizar uma monitoração da dinâmica do sistema elétrico. Aplicações de monitoração que utilizem dados de SPMS vêm sendo bastante exploradas na área de sistemas de energia. Alguns operadores já contam com este sistema disponível na sala de controle.

Em termos de pesquisa, questiona-se de que maneira os dados de SPMS podem vir a melhorar o desempenho dinâmico do sistema elétrico. Diversos trabalhos são encontrados na literatura apresentando o seu potencial para a melhoria dos atuais esquemas de controle e proteção. O objetivo do presente trabalho é de investigar a potencialidade da utilização de dados fasoriais sincronizados na melhoria da estabilidade angular a pequenos sinais dos sistemas elétricos. Diferentes esquemas de controle são encontrados na literatura para este fim. Especificamente, neste trabalho, o objetivo principal é o de explorar um esquema de controle hierárquico constituído de duas camadas, sendo uma descentralizada (local) e outra centralizada (localizada no centro de operação).

O projeto de controladores hierárquicos considerando sinais de medição fasorial apresentam muitos desafios entre os quais a existência de atrasos no processo de medição e controle, controladores com realimentação de saídas de baixa ordem e seleção de pontos de medição e controle. Duas abordagens baseadas em métodos de otimização analíticos e paramétricos são apresentadas para a realização deste projeto. Como método analítico utiliza-se o do controle ótimo, e como método paramétrico o de busca direta e híbrido. Destaca-se a aplicação original do método híbrido, e que inclui o método do gradiente amostrado que apresenta potencial para o projeto de controladores centralizados na área de sistemas elétricos de potência. Adicionalmente, são também apresentados métodos para seleção de sinais adicionais e pontos de medição e controle, baseados em análise modal.

Finalmente, métodos explorados são aplicados para o projeto de controle hierárquico de dois sistemas elétricos de diferente porte. O desempenho do sistema é avaliado para diferentes perturbações e condições de operação.

HIERARCHICAL CONTROL USING SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS

Daniel Dotta

February / 2009

Advisor: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

Area of Concentration: Power Systems.

Keywords: PMU, Optimization, Hierarchical Control.

Number of pages: 134

Synchronized Phasor Measurement Systems (SPMS), also known as Wide-Area Measurement Systems (WAMS) are presented as a new paradigm for power system monitoring. These systems are enabling to measure phasors, remotely, with high sampling rates when compared with the traditional SCADA systems. With SPMS it is possible monitoring the power system dynamic performance. Currently, monitoring applications are available in the EMS (Energy Management Systems).

A challenge for power systems engineers is how the data captured by SPMS can be used to improve the power system dynamic performance. Many papers are found presenting contribution to the use of this technology to improve the traditional control and protection schemes in different power system applications. The main goal of this work is to study the utilization of phasor measurements to improve power system small-signal angular stability. Different schemes are found in the literature to reach this objective. In this work, it is emphasized the hierarchical control scheme, composed by two control levels: decentralized and centralized control.

The design of hierarchical control scheme using phasor measurement data presents many challenges such as: delay in measurements and control, output feedback controllers and selection of signals and points of measurements and control. Two approaches based on analytical and parametric optimization are used in this work. The analytical method considered is the traditional optimal control with structure constraints and the parametric methods are the direct search and hybrid algorithms. It is emphasized the original application of the hybrid method for the power system control design. Additionally, methods are presented to select signal and points for measurement and control. Finally, the methods are applied in the design of a central control in two test systems. The systems performance is assessed for different kinds of perturbations and system conditions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xxiii
LISTA DE TABELAS	xxv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Indústria de Energia Elétrica Contemporânea	1
1.2 Evolução da Filosofia de Operação de Sistemas de Energia Elétrica	2
1.3 Sistema de Medição Fasorial Sincronizada	3
1.4 Objetivo do Presente Trabalho	5
1.5 Descrição do Trabalho	5
1.6 Estrutura do Trabalho	7
2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA	9
2.1 Introdução	9
2.2 A Unidade de Medição Fasorial (PMU)	9
2.3 Concentrador de Dados	10
2.4 Canais de Comunicação	11
2.5 Base de Dados	11
2.6 Arquitetura Genérica de um SPMS	12
2.7 Aplicações	14
2.7.1 Brasil	16
2.7.1.1 Projeto ONS	16

2.7.1.2	Projeto MedFasee	16
2.8	Conclusões	17
3	MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO MEDIÇÃO FA- SORIAL SINCRONIZADA	19
3.1	Introdução	19
3.2	Conceito de Estabilidade Angular	19
3.3	SPMS para Melhoria da Estabilidade	20
3.3.1	Atraso no Sinal	21
3.4	Melhoria da Estabilidade Transitória usando SPMS	23
3.4.1	Controle de Emergência em Malha Fechada	24
3.4.2	Controle de Emergência em Malha Aberta	26
3.5	Melhoria da Estabilidade Angular a Pequenas Perturba-ções usando SPMS	27
3.5.1	Controle Descentralizado com Realimentação de Sinais Remotos	28
3.5.2	Controle Centralizado	29
3.5.3	Controle Hierárquico	29
3.5.3.1	Principais Desafios no Projeto de Controladores utilizando Sinais Remotos	30
3.6	Métodos de Projeto	31
3.6.1	Controle Ótimo	32
3.6.2	LMIs (Linear Matrix Inequalities)	32
3.6.3	Controle Preditivo	33
3.6.4	Métodos Evolucionários	34
3.7	Conclusões	35
4	ESTRUTURA E MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE	37
4.1	Introdução	37

4.2	Descrição da Estrutura de Controle	37
4.2.1	Controle Descentralizado	37
4.2.2	Controle Centralizado	38
4.2.3	Características do Controle Hierárquico	39
4.3	Requisitos de Projeto	41
4.3.1	Atrasos	41
4.3.2	Seleção de Sinais e Pontos de Controle e Medição	43
4.3.3	Realimentação de Saídas	43
4.4	Modelo do Sistema	44
4.4.1	Modelo do Sistema de Potência	44
4.4.2	Estrutura do Controle	45
4.4.3	Atrasos	46
4.5	Conclusões	48
5	SELEÇÃO DE SINAIS E PONTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE	49
5.1	Introdução	49
5.2	Alocação de PMUs para o Controle Centralizado	49
5.2.1	Sinais Adicionais	51
5.3	Seleção de Pontos de Medição e Controle	53
5.3.1	Algoritmo de Seleção de Barras	55
5.4	Seleção de Sinais Físicos	56
5.5	Conclusões	57
6	METODOLOGIAS DE PROJETO	59
6.1	Introdução	59
6.2	Análise de Métodos de Projeto	59
6.3	Métodos de Redução de Ordem	63

6.4	Método de Otimização Analítico	65
6.4.1	Método do Controle Ótimo Considerando Restrições Estruturais	65
6.4.1.1	Configuração do Controle	66
6.4.1.2	O sistema controlado	68
6.4.1.3	Descrição do Método	69
6.4.2	Aplicação do método de controle ótimo para o projeto do controle hierárquico	71
6.5	Métodos de Otimização Paramétricos	72
6.5.1	Conceitos Básicos e Formulação do Problema	73
6.5.1.1	Equações do Espaço de Estados	73
6.5.1.2	Função de Transferência	74
6.5.1.3	Controle Realimentado	75
6.5.1.4	Controle H_∞	76
6.5.1.5	Formulação do Problema	76
6.5.1.6	Controle Robusto	78
6.5.2	Métodos de Solução	78
6.5.2.1	Método de Busca Direta	79
6.5.2.2	Método do Gradiente Amostrado	81
6.5.2.3	Método Híbrido	82
6.5.3	Aplicação do métodos paramétricos para o projeto do controle hierárquico	83
6.5.3.1	Busca Direta	83
6.5.3.2	Método Híbrido	84
6.6	Conclusão	85
7	RESULTADOS OBTIDOS	87
7.1	Método Analítico	87
7.1.1	Sistema Teste Sul/Sudeste	87

7.1.1.1	Projeto do Controlador e Análise de Desempenho	88
7.1.1.2	Efeito do Atraso no Desempenho do Controlador	90
7.1.1.3	Robustez à perda de canais de comunicação	91
7.1.1.4	Robustez a alterações topológicas	92
7.1.1.5	Robustez a diferentes tempos de atraso	93
7.1.2	Sistema Teste Sul do Brasil	93
7.2	Seleção de sinais e pontos de medição e controle	95
7.2.1	Análises de Diferentes Sinais Físicos	96
7.2.2	Minimização da Redundância	98
7.3	Métodos Paramétricos	99
7.3.1	Método de Busca Direta	99
7.3.1.1	Sistema Teste Sul/Sudeste	99
7.3.2	Método Híbrido	102
7.3.2.1	Sistema Teste Sul/Sudeste	103
7.3.2.2	Sistema Teste Sul do Brasil	104
7.4	Conclusões	106
8	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
8.1	Principais Contribuições do Trabalho	111
8.2	Sugestão de Trabalhos Futuros	112
	Apêndice A – Métodos de Otimização de Busca Direta	115
A.1	Método da Bússola	115
A.2	Método Multi-Direcional	117
A.2.1	Descrição do Método	117
A.2.2	Aplicabilidade dos Métodos de Procura Direta	121
A.2.3	Limitações dos Métodos de Procura Direta	122

A.3	Implementação Computacional- Busca Direta	122
Apêndice B – Gradiente Amostrado	123
B.1	Implementação Computacional - Método Híbrido	125
Referências	127

LISTA DE FIGURAS

1	Visão geral de um SPMS	4
2	Estrutura de controle em dois níveis	5
3	Estrutura Básica da PMU	10
4	Funções básicas do PDC	10
5	Estrutura genérica de um SPMS	13
6	Estrutura de operação em tempo real com SPMS	13
7	Aplicações Variação Angular	15
8	Medidas fornecidas pela PMU	21
9	Estrutura de Controle Quase-Decentralizada	28
10	Estrutura de Controle Centralizada	29
11	Estrutura Hierárquica	30
12	Estrutura de Controle Hierárquica	38
13	Esquema de atuação do controle hierárquico	39
14	Margem de fase para diferentes atrasos	42
15	Resposta no tempo das aproximações de Padé (VAJTA, 2005)	47
16	Sistema em Malha Fechada	76
17	Sistema Equivalente Sul-Sudeste.	87
18	Simulação no domínio do tempo.	90
19	Degradação do Desempenho do Controlador.	91
20	Perda do Sinal (Itaipu).	92
21	Simulação no domínio do tempo - Avaliação de Robustez.	94
22	Equivalente do Sistema Sul do Brasil.	94

23	Simulação no domínio do tempo - Sistema Sul.	96
24	Desempenho dos Controladores.	98
25	Minimização da Redundância.	98
26	Simulação no domínio do tempo.	101
27	Simulação no domínio do Tempo - Robustez do Controle.	102
28	Simulação no domínio do tempo.	104
29	Análise de Robustez.	105
30	Simulação no domínio do tempo - Sistema Sul.	106
31	Compass Search aplicado a uma função bidimensional	116
32	Simplex original e sua reflexão	118
33	Simplex original com simplex refletido e sua expansão	118
34	Simplex original e sua contração	119
35	Comparação GS e Método Gradiente	124

LISTA DE TABELAS

1	Funções de Transferência das Aproximações de Padé	46
2	Glossário - Seleção de Pontos	55
3	Modos de Oscilação Dominantes - Caso Malha Aberta	88
4	Modo de Oscilação Dominante - Controle Descentralizado	89
5	Modos de Oscilação Dominante - Controle Hierárquico	89
6	Modos de Oscilação Dominantes	95
7	Observabilidade dos sinais ao modo de oscilação	97
8	Modos de Oscilação menos amortecidos	97
9	Modos de Oscilação Menos Amortecidos	100
10	Modos de Oscilação Menos Amortecidos	103
11	Modos de Oscilação Dominantes	105
12	Glossário	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Indústria de Energia Elétrica Contemporânea

Nos últimos 20 anos, observou-se, em muitos países, um maior interesse por parte dos governos, grandes industriais e investidores na reestruturação da indústria de energia elétrica no sentido do estabelecimento de ambientes de competição. Especificamente, nos países em desenvolvimento, as empresas públicas do setor elétrico foram privatizadas como pré-condição para que empréstimos fossem liberados por fundos internacionais, ou para atrair investimentos para o setor (DY-LIACCO, 2002). Em alguns países o processo de reforma praticamente se completou; em outros, propostas de desregulamentação estão sendo recomendadas ou mudanças significativas já foram realizadas, sem que todavia uma solução hegemônica, em termos do modelo da estrutura de mercado, tenha se consolidado. Nestes novos ambientes a ênfase das discussões estava, até pouco tempo atrás, concentrada nas questões econômicas, com os aspectos da estrutura do mercado, de contratos e de preços da energia ocupando a vanguarda. Por outro lado, os aspectos relacionados à complexidade da operação de sistemas desregulamentados também eram reconhecidos como um grande desafio (DY-LIACCO, 2002; BALLANCE et al., 2003). Como principais motivos citam-se a existência de um grande número de geradores independentes injetando potência na rede e competindo entre si, o aumento da geração distribuída, e a demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia. Além disso, a dificuldade em se planejar e expandir os sistemas de transmissão faz com que cada vez mais a rede opere perto dos seus limites de carregamento (BALLANCE et al., 2003).

Este cenário apresenta um grande contraste quando comparado com sistemas regulados e verticalizados, que tendiam a ser mais seguros por inúmeras razões (MORISON et al., 2004). A primeira é de que o sistema elétrico era projetado, construído e operado por monopólios (usualmente propriedades dos governos). O planejamento integrado assegurava que a geração e a transmissão cresceriam de acordo com a demanda. Com isso, limitavam-se a sobrecarga e as falhas dos equipamentos que poderiam levar a distúrbios no sistema. Os programas de manutenção eram em geral rigorosos. Na perspectiva da operação, a capacidade de prever as condições de operação do sistema eram simples devido à pouca quantidade de proprietários de geradores e transmissoras que operavam cooperativamente, de acordo com um cuidadoso plano de operação (MORISON et al., 2004). Como resultado, devido a robustez dos sistemas, os mesmos estavam expostos a poucos e eventuais distúrbios.

O blackout de 14 de Agosto de 2003 (NERC, 2004), que afetou aproximadamente 50 milhões de pessoas nos Estados Unidos e Canadá e blackouts ocorridos no mesmo período em diversos países (Brasil, Suécia, Alemanha, Itália, Suíça, Grécia, Rússia) motivaram discussões relacionadas à operação confiável e segura do sistema elétrico (KLUMP et al., 2005). Questões como o envelhecimento da infra-estrutura do setor e a necessidade de melhores ferramentas para a monitoração e controle que aumentem a confiabilidade e segurança da operação do sistema tornaram-se prioridade. Ferramentas como os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement Systems - SPMS*), que utilizam os avanços nas comunicações, computadores e na tecnologia de GPS (*Global Positioning System*), apresentam-se como uma tecnologia promissora para as novas necessidades de monitoração e gerenciamento da segurança de grandes sistemas (ANDERSSON et al., 2005). Esse sistema de medição destaca-se pelo uso das unidades de medição fasorial, mais conhecidas como PMUs (*Phasor Measurement Units*). Por utilizarem uma fonte eficaz de sincronização, fornecida pelo sistema GPS, as PMUs viabilizam a realização da medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes, com taxas de amostragem superiores ao sistema SCADA tradicional e com precisão angular adequada aos requisitos da maioria das aplicações de monitoração e controle. Os SPMS apresentam potencial de aplicação na indústria e podem contribuir para a melhoria da monitoração e da estabilidade do sistema elétrico (ANDERSSON et al., 2005). No entanto, devido ao caráter incipiente dessa tecnologia, esse potencial não é ainda bem conhecido e investigações são necessárias até a efetiva aplicação da tecnologia em escala industrial (ANDERSSON et al., 2005).

1.2 Evolução da Filosofia de Operação de Sistemas de Energia Elétrica

Historicamente, a evolução dos sistemas de energia elétrica e dos paradigmas de operação caminham juntos, em sinergia (FINK; SON, 1998). Até meados da década de 50, por exemplo, a filosofia de operação dominante baseava-se na atuação de esquemas de controles locais (regulação de tensão e velocidade, chaveamento e proteção). Com a expansão dos sistemas elétricos e de suas interligações surgiu o conceito de operação centralizada do sistema, o qual foi consolidado ao longo da década de 60, através do desenvolvimento de controles com características operativas de abrangência sistêmica (controle automático de geração e controle supervisorio) (SIMÕES-COSTA et al., 1995). Ao final da década de 60, questões relacionadas à segurança de operação dos sistemas, como consequência de blackouts ocorridos na costa leste americana, tornaram-se relevantes a ponto de provocar uma mudança significativa na filosofia de operação. A esta altura, o grau de interligação dos sistemas de potência era tal que a

tarefa dos operadores tornava-se crescentemente difícil sem a disponibilidade de ferramentas adicionais que processassem a grande quantidade de dados disponíveis de forma organizada. Coincidentemente, o mesmo período testemunhava um grande desenvolvimento na área de computação, com o surgimento dos minicomputadores, e também, na área de telecomunicações. A conjunção destes fatores, quais sejam, as dificuldades para a operação de sistemas de potência cada vez mais interligados e os importantes desenvolvimentos tecnológicos em computação e telecomunicações, propiciou o surgimento das funções ligadas à monitoração e análise de segurança. A evolução da capacidade dos computadores permitiu então a incorporação de aplicativos avançados de análise de redes elétricas que hoje caracterizam a operação em tempo real de sistemas de potência - configurador de redes, estimador de estados, análise de contingências, fluxo de potência, etc. Os sistemas de operação em tempo real passam então a ser denominados Sistemas de Gerenciamento de Energia (*Energy Management Systems*), freqüentemente referidos como EMS (SIMÕES-COSTA et al., 1995). Após os blackouts ocorridos no início deste século, novos questionamentos surgiram relacionados à segurança e à filosofia de operação. Uma das principais referências sobre o assunto é Andersson et al. (2005) onde as principais causas e os passos necessários para a redução do risco de blackouts são discutidos. Entre as conclusões deste documento destaca-se a necessidade da melhoria da informação em tempo real para facilitar o reconhecimento de situações de risco. No mesmo documento sugere-se a utilização de redes SPMS para a obtenção deste tipo de informação, dado que a mesma é por concepção projetada para a monitoração da dinâmica do sistema. Desta forma, situações de risco iminente de blackout poderiam ser detectadas com muito mais rapidez, já que, com monitoração da dinâmica do sistema melhores ferramentas de detecção podem ser desenvolvidas. No entanto, a tecnologia é ainda muito incipiente e novas pesquisas precisam ser realizadas até que objetivos como este sejam atingidos (ANDERSSON et al., 2005). As recomendações foram de encontro a uma das principais discussões realizadas pelos grupos de pesquisa em medição fasorial: a de como esta tecnologia será inserida na atual estrutura de operação em tempo real de sistemas de potência. Além disso, questões relacionadas à efetiva contribuição desta tecnologia dentro dos EMSs e sua possível aplicação no controle para a melhoria da estabilidade do sistema elétrico continuam em aberto.

1.3 Sistema de Medição Fasorial Sincronizada

Um sistema de medição fasorial sincronizada é constituído por (EHRENSPERGER, 2004; MARTINEZ et al., 2005):

- unidade de Medição Fasorial (UMF);
- concentrador de Dados;
- base de dados em tempo real e histórico;
- rede de comunicação.

O elemento de medição dos fasores é a Unidade de Medição Fasorial (UMF) ou *Phasor Measurement Unit* (PMU). Entretanto, a estrutura desse sistema também depende de outros equipamentos, como as estações de recepção do sinal de GPS, o concentrador de dados e os *links* de comunicação entre as PMUs e o concentrador. A estrutura geral de um sistema de medição de fasores pode ser representada pela ilustração da Figura 1.

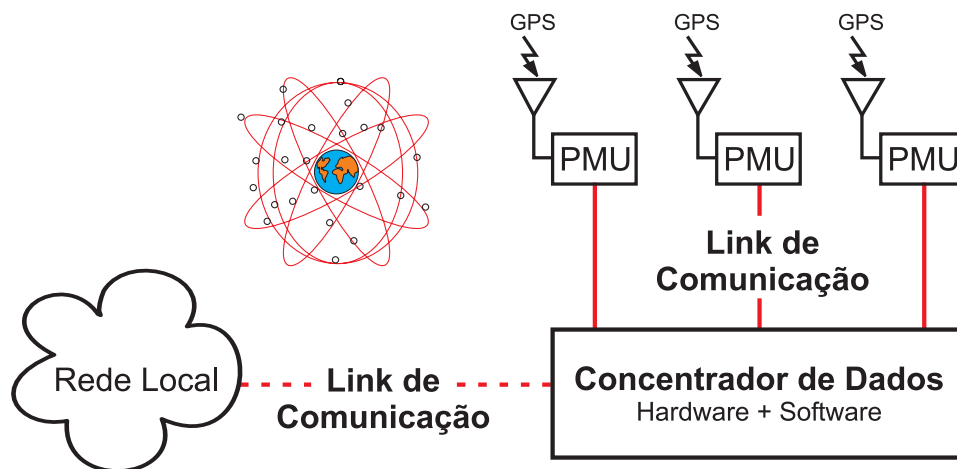


Figura 1: Visão geral de um SPMS

A recepção do sinal de um pulso por segundo, emitido pelo sistema GPS, fornece às PMUs o instante exato em que deve ser feita a aquisição dos dados de forma sincronizada. De modo geral, as grandezas amostradas constituem-se das tensões trifásicas nas barras e correntes trifásicas nas linhas, transformadores e alimentadores das subestações (EHRENSPERGER, 2004). A partir dos dados amostrados, as tensões e correntes complexas de sequência positiva são calculadas com base no mesmo instante de tempo utilizando-se, em geral, a Transformada Discreta de Fourier (EHRENSPERGER, 2004). Seguindo o formato determinado pelos padrões IEEE 1344 e IEEE C37.118, os fasores calculados pelas PMUs são enviados, por canais adequados de comunicação, ao concentrador de dados. Esse equipamento, por sua vez, reunindo as medidas de magnitude e ângulo das tensões nas barras, dispõe de um "retrato" do estado do sistema, em tempo real. O detalhamento dos principais componentes de um SPMS e as suas aplicações em SEE serão apresentados no Capítulo 2.

1.4 Objetivo do Presente Trabalho

O objetivo do presente trabalho é investigar a potencialidade da utilização de dados fasoriais sincronizados na melhoria da estabilidade angular a pequenos sinais dos sistemas elétricos. Os SPMS fornecem uma grande quantidade de informações sobre o comportamento dinâmico do sistema. A possibilidade de acesso a diversos sinais sincronizados e distantes geograficamente abre a possibilidade de estudos de novos esquemas de controle. Estes esquemas podem ser projetados com o objetivo de melhorar o desempenho dinâmico do sistema elétrico.

1.5 Descrição do Trabalho

O foco principal deste trabalho é o projeto e estudo de desempenho de um sistema de controle hierárquico para amortecimento de oscilações em sistemas de energia elétrica. Esse esquema de controle é apresentado na Figura 2.

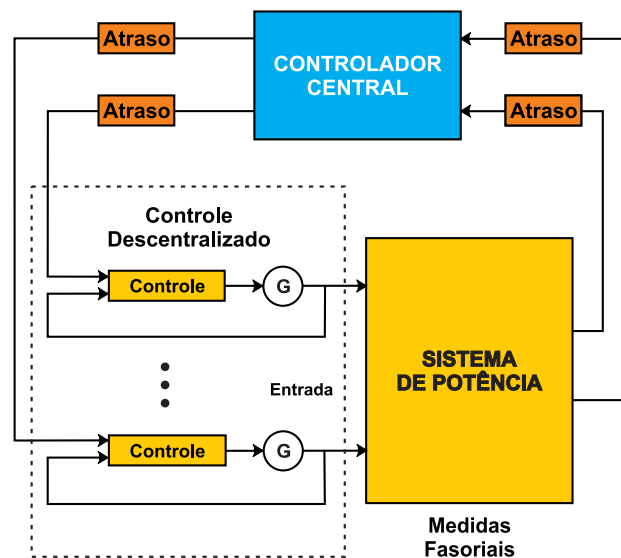


Figura 2: Estrutura de controle em dois níveis

Esse esquema de controle é concebido para trabalhar em sinergia com o tradicional controle descentralizado. Suas maiores vantagens são:

- melhoria do desempenho do sistema fornecida pelo controle descentralizado;
- em caso de falha do controle central, o controle descentralizado garante um desempenho mínimo;

- facilidade de ajuste do controle central, quando comparado com o controle descentralizado.

O projeto desse esquema de controle apresenta diversos desafios entre os quais se citam:

- seleção de pontos de medição e controle;
- consideração dos atrasos envolvidos no processo de medição e controle;
- projeto de controladores com realimentação dinâmica de saídas de baixa ordem;
- utilização de métodos de projeto multivariáveis;
- robustez diante de perturbações.

A análise e síntese de controladores com atraso é um problema difícil tanto do ponto de vista matemático como de engenharia prática (TANG; LUO, 1999). No caso do controle hierárquico, há a necessidade de considerar os atrasos na transmissão dos dados da PMU ao centro de controle e do centro de controle para o atuador. Como apresentado em (WU et al., 2004), os atrasos podem degradar o desempenho do controlador, chegando até mesmo a prejudicar a estabilidade do sistema. Neste trabalho, os atrasos foram modelados e incluídos no momento de projeto do controlador. Desse modo, alcançaram-se resultados superiores aos apresentados em (DOTTA et al., 2007).

Para o projeto do controlador central, considera-se um método tradicional já aplicado à área de sistemas de energia e métodos ainda pouco explorados, porém que apresentam grande potencial para o problema específico.

O método tradicional utilizado é baseado em controle ótimo sujeito a restrições estruturais. Esse método, utiliza a representação linear do sistema e na resolução da equação de Riccati, considera restrições de realimentação de saídas. Além disso, atrasos podem ser facilmente incorporados ao projeto. Controladores dinâmicos de baixa ordem podem ser projetados diretamente sem a necessidade de redução de ordem de alto grau.

Alternativamente aos métodos tradicionais baseados na equação de Riccati e LMIs (*Linear Matrix Inequalities*), métodos de busca direta e híbridos apresentam potencial e são pouco explorados na área de sistemas de energia. Esses métodos apresentam como principais vantagens a simplicidade de implementação e a capacidade de trabalhar com problemas não-convexos e não-suaves.

Adicionalmente, métodos são propostos para seleção de sinais e pontos de medição e controle. Com a expansão e disponibilidade de sinais de PMUs em centros de controle, surge a necessidade de ferramentas para filtrar informações relevantes. A grande questão é a de selecionar sinais e pontos de medição que apresentem a melhor observabilidade e controlabilidade de modos de oscilação com baixo amortecimento.

Os esquemas de controle projetados são simulados usando modelos lineares e não-lineares para a validação dos resultados. Dois sistemas-teste de diferentes portes são utilizados, e as variações de diversos parâmetros são considerados para a análise do comportamento dos controladores.

1.6 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, apresentam-se em detalhes os componentes de um sistema de medição fasorial sincronizada e suas potenciais aplicações. No Capítulo 3, apresentam-se os principais trabalhos encontrados na literatura que tratam da melhoria das estabilidade angular utilizando medição fasorial. No Capítulo 4 são discutidos os principais desafios para o projeto do controle hierárquico juntamente com a modelagem do sistema, atrasos e da estrutura de controle. No Capítulo 5 serão apresentados os métodos utilizados para seleção de pontos de medição e controle e avaliação de sinais adicionais para o controle central. No Capítulo 6, discutem-se os métodos de projeto disponíveis para o projeto de controle hierárquico. Adicionalmente, apresentam-se os métodos utilizados para o projeto do controlador. No Capítulo 7, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos apresentados nos Capítulos 5 e 6. Finalmente, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões do trabalho, juntamente com as principais contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

2.1 Introdução

O foco principal do presente Capítulo é a descrição dos aspectos principais de um SPMS. Esta descrição se faz necessária para o entendimento dos desenvolvimentos realizados no âmbito deste trabalho. A apresentação inicia com o detalhamento de cada um dos equipamentos que compõem um SPMS, bem como a estrutura organizacional, abordando a problemática da inserção dos SPMS na estrutura atual da operação em tempo real de sistemas de potência. Finalmente, apresenta-se um apanhado das aplicações mais utilizadas e algumas já disponíveis em centros de operação.

2.2 A Unidade de Medição Fasorial (PMU)

A PMU é o elemento base de um sistema de medição fasorial sincronizado. Essencialmente, a PMU é um dispositivo de medição de tensões e correntes alternadas, com uma referência temporal comum, obtida através de sinais via satélite (GPS). As medidas de tensão e corrente são processadas pela PMU e convertidas em fasores e, então, enviadas ao concentrador de dados a taxas que variam de 10 a 60 sincrofasores por segundo (BHARGAVA, 1999).

A Figura 3 representa a estrutura típica de uma PMU. O processo para a obtenção das medidas fasoriais inicia na etapa de filtragem, visando evitar os efeitos de *aliasing*¹. Na etapa posterior, os sinais de entrada de tensão e corrente são discretizados utilizando-se conversores analógico-digitais. A referência temporal de amostragem é dada através do receptor do GPS (Global Positioning System), que recebe sinais do tipo pulsos por segundo (PPS) os quais, em conjunto com oscilador do tipo "Phase-Locked", fornece os instantes de amostragem.

A etapa subsequente refere-se ao tratamento matemático das amostras por meio do microprocessador. Utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*), na sua forma recursiva, para converter amostras de tensão e corrente em fasores (EHRENSPERGER, 2004).

¹*aliasing*: criação de uma falsa frequência durante o processo de amostragem, devido à baixa taxa de amostragem. Para se evitar esse efeito, a taxa de amostragem, chamada de taxa de Nyquist, deve ser maior que o dobro da maior componente de frequência que se deseja medir.

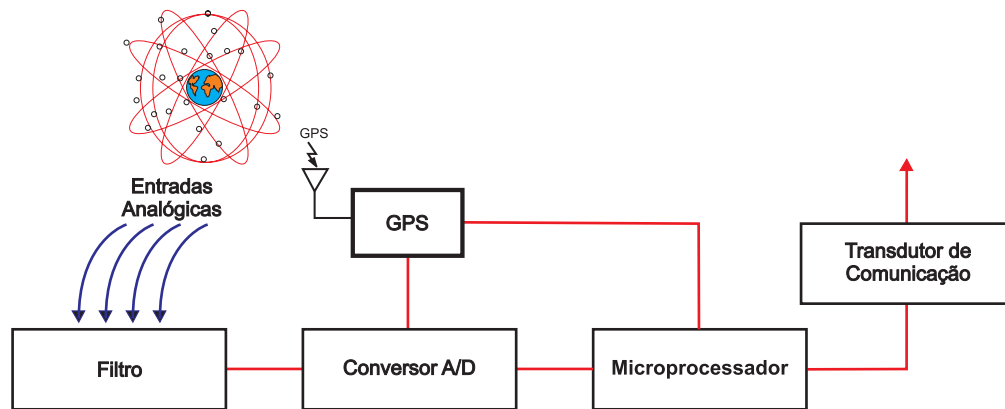


Figura 3: Estrutura Básica da PMU

2.3 Concentrador de Dados

O concentrador de dados, referido como PDC (Phasor Data Concentrator), tem a finalidade de: receber os fasores enviados pelas PMUs; verificar eventuais erros de transmissão; e organizar e disponibilizar dados para outras aplicações. A Figura 4 ilustra este processo.

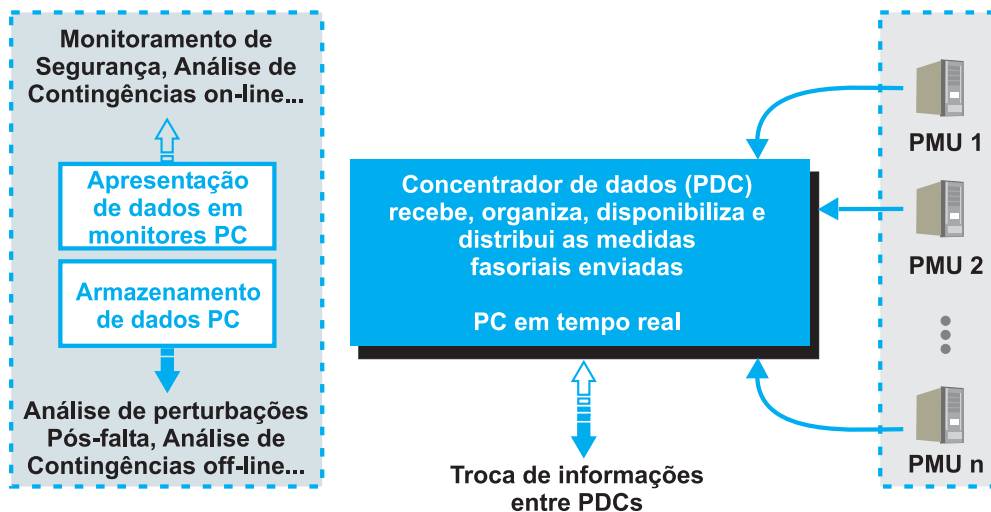


Figura 4: Funções básicas do PDC

Conforme Xie et al. (2006), as principais características que um PDC deverá ter para garantir um bom desempenho de um SPMS são:

- **simultaneidade:** receber, processar e disponibilizar os dados fasoriais simultaneamente;
- **robustez:** suportar falhas de hardware e software, armazenar de forma segura os dados fasoriais e, ainda, suportar falhas nos canais de comunicação sem perdas de dados;

- **expansibilidade:** suportar o aumento do processamento de dados, devido ao aumento no número de PMUs ;
- **rapidez:** manter o equilíbrio entre o tempo de acesso e a capacidade de armazenamento.

Atualmente, o formato dos dados transferidos entre PMUs e PDC é baseado no protocolo IEEE C37.118, aprovado em 2005, em substituição ao IEEE 1344, que era o padrão vigente até então.

2.4 Canais de Comunicação

Os canais de comunicação têm o objetivo bem definido de viabilizar a transferência de dados entre as PMUs e o PDC, bem como permitir a troca de informações entre PDCs de diferentes áreas. Podem ser utilizados, como sistemas de conexão entre as PMUs e os PDCs, links de fibra óptica, canais de microondas (YI et al., 2001), Power Line Communication (PLC), sistema de modems (LIU, 2002) e, até mesmo, a própria internet com o sistema de Virtual Private Network -VPN (MARTINEZ et al., 2005). Os protocolos de comunicação mais utilizados para a comunicação são TCP/IP e UDP/IP. A escolha do sistema de comunicação a ser utilizado está diretamente ligada à aplicação que está sendo considerada. Aplicações de monitoração não exigem uma taxa de transferência e segurança de recebimento exigida por uma aplicação de controle. No caso de aplicações de monitoração pode-se utilizar a internet como meio de comunicação entre as PMUs e o PDC.

No caso de aplicações de controle, Hu e Centeno (2006) sugerem o uso de fibra ótica dado a necessidade de minimizar a latência da rede. O atraso depende, fundamentalmente, do meio físico escolhido para a transmissão dos dados. A comunicação via satélite apresenta atrasos na faixa de $750ms$, enquanto a transmissão via fibra ótica é de $100ms$ (NADUVATHUPARAMBIL et al., 2002). Isto influencia diretamente o desempenho dos controladores. Para aplicações críticas como a de controle em tempo real, canais redundantes podem ser necessários, pois em caso de perda de um canal o outro poderá suprir esta deficiência.

2.5 Base de Dados

A base de dados é um importante componente, que tem como função principal coletar e arquivar os dados do PDC. Este processo pode afetar diretamente o desempenho do sistema

em tempo real. O problema do desempenho está diretamente relacionado ao tempo de leitura e escrita na base de dados.

Esse problema pode ser contornado usando-se uma base de dados em tempo real já que bases como esta fornecem a garantia de armazenamento de acordo com um intervalo de tempo pré-especificado. No entanto, há poucos fornecedores deste tipo de produto (HU; CENTENO, 2006).

Dado a carência de desenvolvimentos nesta área, Jinyu et al. (2003) relatam a necessidade do desenvolvimento de uma base de dados em tempo real para o projeto de um SPMS na China.

2.6 Arquitetura Genérica de um SPMS

A arquitetura é dividida em quatro camadas, como segue:

- **Camada 1, Aquisição de Fasores** - as PMUs são instaladas em subestações para medir tensão, corrente e frequência. PMUs podem ser programadas para armazenar dados selecionados por eventos como sub/sobre tensão e/ou frequência;
- **Camada 2, Gerenciamento de Dados** - O PDC coleta os dados enviados pelas PMUs e por outros PDCs e os correlaciona em uma configuração única de dados;
- **Camada 3, Serviço de Dados** - Esta camada inclui uma configuração de serviços requeridos para formatar os dados necessários a diferentes aplicações. A maior parte destes serviços esta relacionada à capacidade de fornecer dados em um formato próprio requisitado para uma determinada aplicação no intervalo de tempo necessário a execução da mesma. Esta camada também realiza o gerenciamento e monitoração dos pacotes recebidos verificando erros, perdas e sincronização;
- **Camada 4, Aplicações** - Camada onde as aplicações para operação em tempo real são executadas. Maiores detalhes destas aplicações são apresentadas no próximo capítulo.

A Figura 5 ilustra a arquitetura genérica do sistema.

Um outro ponto importante é a inserção desta tecnologia na atual estrutura de operação em tempo real de sistemas de potência. A Figura 6 ilustra a arquitetura atual de operação e uma proposta para a inserção desta tecnologia na indústria (MARTINEZ et al., 2005). Da análise da literatura constata-se que a inserção desta tecnologia vem sendo feita como um nível operacional emergente representado pelo Nível 4 da Figura 6. Esse nível não está sendo encarado como uma substituição dos níveis 2 e 3, mas como um complemento para os sistemas

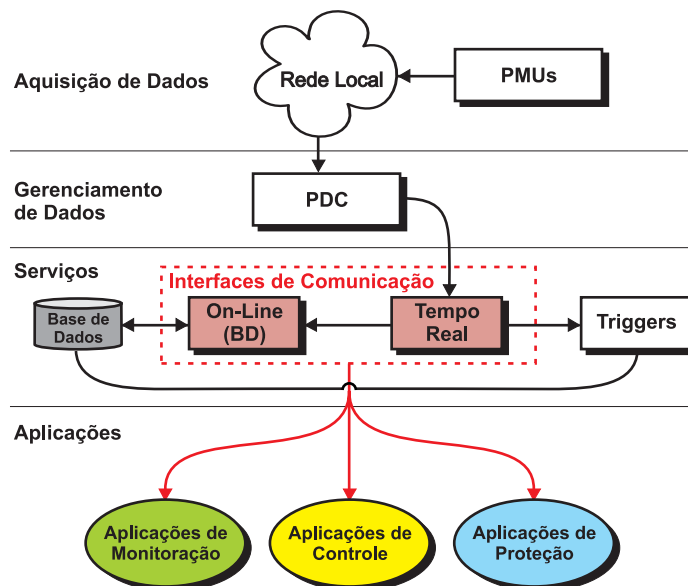


Figura 5: Estrutura genérica de um SPMS

SCADA/EMS. Esse novo nível também contaria com aplicações específicas principalmente nas áreas de monitoração, proteção e controle, em tempo real, de grandes áreas. As aplicações mais exploradas são discutidas na próxima Seção.

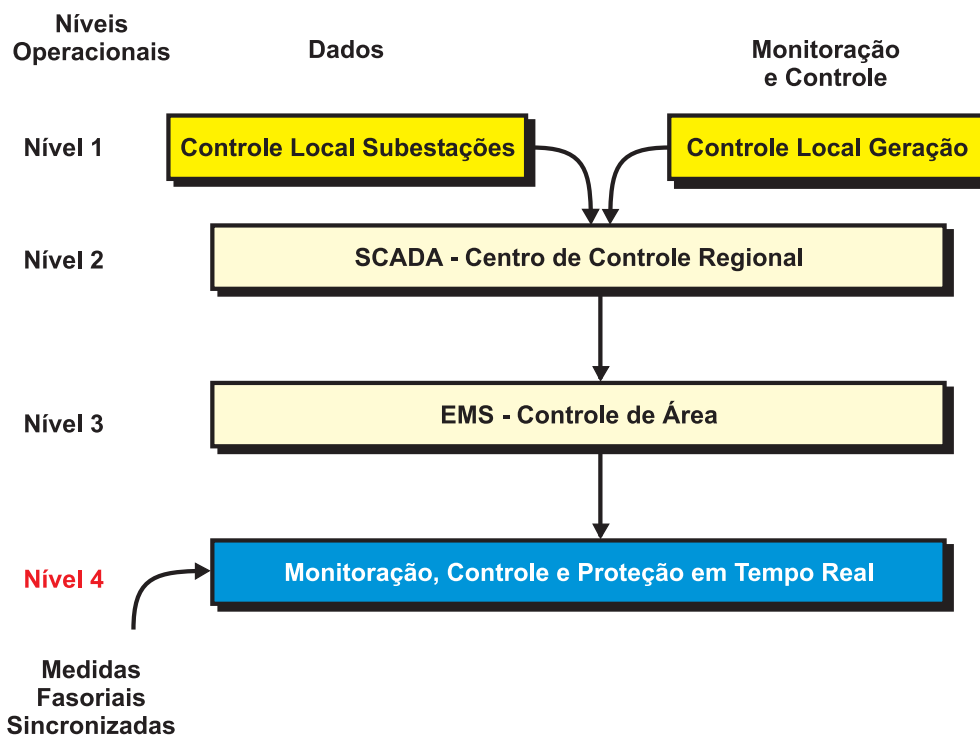


Figura 6: Estrutura de operação em tempo real com SPMS

2.7 Aplicações

O espectro de aplicação da tecnologia de medição fasorial, na área de sistemas de energia elétrica, é de elevada dimensão (CIGRE, 2007),(PHADKE, 2008),(XIE et al., 2006). Podem ser realizadas aplicações na área de monitoração em tempo real, análise de distúrbios, estimação de estados, melhoria de modelos e proteção sistêmica. Aplicações de controle para a melhoria da estabilidade angular, frequência e de tensão. A grande maioria dos desenvolvimentos na área de aplicações para medição fasorial sincronizada estão sob desenvolvimento ou vêm sendo planejadas para instalação (CIGRE, 2007). Dado o grande número de trabalhos sobre o tema, nesta seção apresentam-se as aplicações que encontram-se em estágio mais avançado de desenvolvimento e disponíveis em centros de operação (MARTINEZ et al., 2005)(XIE et al., 2006)(KLUMP et al., 2005)(BALLANCE et al., 2003) (DECKER et al., 2006)(PHADKE, 2008):

- monitoração de diferenças angulares;
- detecção de modos de oscilação;
- monitoração de distúrbios para análises off-line e melhoria de modelos.

A monitoração de diferenças angulares apresenta dados adicionais para o carregamento de uma linha de transmissão. Dependendo da condição de operação do sistema, informações complementares às fornecidas pelo estimator de estados são necessárias. Um exemplo de monitoração, em tempo real, dos ângulos é apresentada na Figura 7 (KLUMP et al., 2005). O objetivo da aplicação é o de nitidamente mostrar que a conexão entre as barras 5 e 8 não pode ser reestabelecida naquele momento. Essas barras apresentam uma significativa diferença angular apresentada em tons em contraste. A região com maior magnitude angular é apresentada em escuro, e a região com menores ângulos é apresentada em tom claro.

As aplicações para detecção de amortecimento e dos modos de oscilações utilizam o sincronismo e a alta resolução de tempo fornecidas pelo sistema SPMS. Essa aplicação requer algoritmos mais sofisticados de análise comparado com outras aplicações de monitoração ². Duas principais abordagens são utilizadas para tratar o problema: os métodos convencionais e os paramétricos (SANTOS, 2008). Os métodos convencionais são aqueles que fazem uso da transformada de Fourier e suas variantes para realizar a análise espectral.

A segunda abordagem é a dos métodos paramétricos, os quais tratam o problema a partir da determinação de um modelo que se aproxime do processo real, o que elimina a necessidade

²Em grande parte das aplicações de monitoração os dados são apresentados diretamente em tela sem a necessidade de grandes desenvolvimentos metodológicos

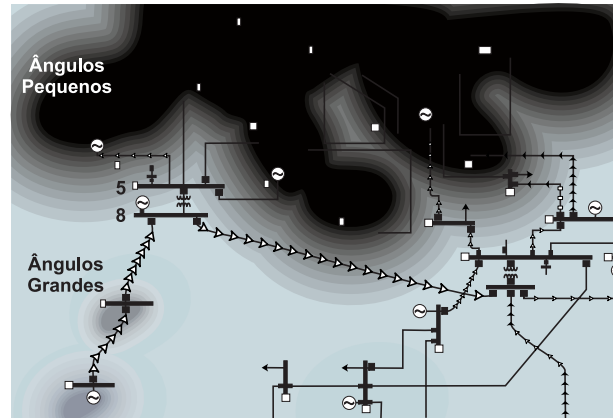


Figura 7: Aplicações Variação Angular

do emprego de janelas de tempo, reduzindo, assim, seus impactos de distorção. Dessa forma, a estimação espectral se resume em estimar os parâmetros do modelo assumido. As aplicações de detecção de modos de oscilação já estão em escala industrial e disponível em centros de operação da Austrália e do Reino Unido, como descrito em Wilson (2007).

As aplicações de monitoração *off-line* são geralmente usadas como ferramenta experimental e porta de entrada dessa tecnologia nos centros de operação. Devido à visão sistêmica, os dados armazenados auxiliam a monitoração e o entendimento de distúrbios ocorridos na rede elétrica.

Essas informações vêm sendo também usadas para detecção de erros e aprimoramento dos modelos de simulação. Discrepâncias entre os dados medidos e o reproduzido pelos modelos de simulação vêm sendo observados pelas empresas de energia do sistema oeste dos Estados Unidos (HAUER; BESHIR, 2000) e China (MIN, 2002). Um dos principais métodos, para o refinamento de modelos utilizados pelo WECC, consiste na utilização de dados de referência obtidos pela monitoração do comportamento do sistema em regime permanente, distúrbios ocorridos e teste de campo. Todos esses dados têm relevância e são utilizados juntamente com os dados colhidos pelo sistema de medição fasorial sincronizada.

Essas são as aplicações mais comuns encontradas na literatura, porém não as únicas. Uma grande diversidade de aplicações, estudos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos, nas mais diversas áreas, que consideram desde iniciativas acadêmicas até industriais. Os desenvolvimentos realizados, no Brasil, até o momento, serão apresentados na seqüência.

2.7.1 *Brasil*

No Brasil, são dois os principais projetos envolvendo o desenvolvimento de SPMSs: Projeto do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), ainda em fase de especificação; e o Projeto Medfasee. Esses projetos, embora tenham objetivos específicos distintos, compartilham do objetivo geral de contribuir para o desenvolvimento de SPMSs no Brasil, visando à melhoria do desempenho do Sistema Elétrico Brasileiro, do ponto de vista operacional e econômico (SANTOS, 2008).

2.7.1.1 **Projeto ONS**

O objetivo principal do projeto de medição fasorial do ONS é aumentar a confiabilidade do SIN, pelo uso da tecnologia de medição sistêmica para monitoramento e controle. Inicialmente, o objetivo desse projeto é dispor de uma infra-estrutura de medição sincronizada de fasores robusta, com disponibilidade adequada e segura para (ARAUJO et al., 2007):

- **implementar um sistema de registro de fasores** - tem o objetivo de registrar o desempenho dinâmico do SIN durante perturbações sistêmicas. É previsto o monitoramento de aproximadamente 58 estações;
- **aplicar a tecnologia de medição fasorial para dar suporte à decisão em tempo real** - visa à melhoria do processo de estimação de estados e o desenvolvimento de ferramentas para a visualização de grandezas em tempo real.

A definição das responsabilidades do ONS e dos Agentes, acerca desse projeto, foi regulamentada pela Resolução Normativa - ANEEL 170/2005. Como atribuições do ONS, as etapas de definição da Arquitetura do SPMS e os requisitos do sistema de comunicação, da quantidade e da localização das PMUs, do sistema de registro de fasores, já foi concluída. Atualmente, o projeto se encontra em processo de homologação e definição do cronograma de implantação das PMUs, nas instalações dos agentes (SANTOS, 2008).

2.7.1.2 **Projeto MedFasee**

O Projeto MedFasee teve início em 2003, por meio de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a empresa Reason Tecnologia e a FINEP (EHRENSPERGER, 2004). Um dos resultados do projeto foi o desenvolvimento de um protótipo de SPMS, constituído por três unidades de medição fasorial, instaladas nas capitais dos três estados do Sul

do Brasil (conectadas à rede de baixa tensão) e um concentrador de dados, localizado no Lab-Plan/UFSC. O protótipo se encontra em operação desde 2004, monitorando grandezas do sistema elétrico brasileiro (DECKER et al., 2004). Entre os objetivos futuros do projeto, estão o desenvolvimento de um protótipo de SPMS de abrangência nacional, com fins acadêmicos, e a continuidade dos desenvolvimentos metodológicos acerca das potenciais aplicações de SPMSs. Recentemente, foi posto em operação um novo protótipo de SPMS na empresa Eletrosul, constituído por quatro PMUs e um PDC. Esse protótipo está sendo desenvolvido no âmbito do projeto MedFasee-Eletrosul, por meio da parceria entre a Eletrosul Centrais Elétricas, a UFSC e a empresa Reason Tecnologia. Os objetivos iniciais são avaliar o desempenho do protótipo em operação e desenvolver aplicações de monitoramento e localização de faltas.

2.8 Conclusões

Neste Capítulo, foram descritos os resultados da revisão bibliográfica sobre o tema relacionado à estrutura do sistema de medição fasorial sincronizada. Com uma taxa de amostragem muito superior aos dos tradicionais sistemas SCADA/EMS (60 amostragens por segundo), os sistemas SPMS são capazes de fornecer, em tempo real, informações relevantes sobre o comportamento dinâmico do sistema.

A tecnologia apresenta os mais diferentes estágios de desenvolvimento, variando de acordo com as necessidades e problemas específicos dos sistemas elétricos locais. As aplicações com estágio avançado encontram-se na área de monitoração e, também, são utilizadas para assimilar e entender a potencialidade e limitações desta ferramenta. Aplicações na área de controle estão ainda em estágio de estudo e desenvolvimento e são o propósito da discussão do próximo capítulo.

3 MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR UTILIZANDO MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

3.1 Introdução

O crescimento da demanda e os processos de desverticalização das companhias de eletricidade de diversos países, por vezes, têm levado o sistema de transmissão a ser operado com altos níveis de carregamento e com baixas margens de segurança (BALLANCE et al., 2003). Na operação de sistemas com alto índice de carregamento, a monitoração da dinâmica adquire grande importância, exigindo elevada exatidão e altas taxas de atualização que os sistemas SCADA atuais não são capazes de fornecer (KLUMP et al., 2005). Os SPMS vêm a contribuir com a superação dessa dificuldade, por fornecerem a medida direta de fasores, em taxas superiores ao SCADA.

O objetivo principal deste Capítulo é o de discutir as aplicações de controle encontradas na literatura e que apresentam potencial para trazer melhorias ao desempenho dinâmico dos sistemas de potência do ponto de vista da estabilidade angular ¹. O Capítulo inicia-se com uma discussão sobre as principais contribuições para a melhoria da estabilidade angular possibilitada pela utilização dos SPMS. Na sequência, apresenta-se uma revisão das aplicações para estabilidade transitória e uma discussão das principais estruturas de controle viabilizadas com a utilização de sinais remotos para melhoria da estabilidade a pequenos sinais. O Capítulo é finalizado com uma discussão dos principais métodos encontrados, na literatura, para o projeto de esquemas de controle, para a estabilidade a pequenos sinais.

3.2 Conceito de Estabilidade Angular

Conceitos básicos de dinâmica de sistemas permitem classificar a estabilidade em termos da existência de um ponto de equilíbrio, estabilidade do ponto de equilíbrio e a região de atração do ponto de equilíbrio. A existência e estabilidade do ponto de equilíbrio está associado ao conceito de estabilidade a pequenos sinais e é um resultado básico da teoria de sistemas dinâmicos. Essa teoria assegura que, por meio das equações do sistema linearizado, pode-se determinar

¹Este trabalho está restrito a aplicações para melhoria da estabilidade angular. No entanto, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos considerando a aplicação de medição fasorial sincronizada para melhoria da estabilidade de tensão e de frequência, como descrito em Zima et al. (2005), CIGRE (2007)

qualitativamente o comportamento do sistema em torno de um ponto de operação. A dimensão da região de atração é determinada pela configuração do sistema, após uma grande perturbação, e está associado ao conceito de estabilidade transitória.

Tratando-se de sistemas elétricos, a estabilidade angular refere-se à capacidade das máquinas síncronas, pertencentes a um mesmo sistema, em permanecer em sincronismo após uma perturbação. Isso depende, fundamentalmente, da habilidade em manter/restaurar o equilíbrio entre torque magnético e mecânico de cada máquina do sistema. A instabilidade resultante ocorre na forma do aumento angular de alguns geradores levando à perda do sincronismo com relação ao resto do sistema. Seguindo a definição de estabilidade de sistemas dinâmicos, a estabilidade angular pode ser dividida em duas categorias (KUNDUR et al., 2004), são elas:

- Estabilidade Angular a Pequenos Sinais;
- Estabilidade Angular Transitória.

3.3 SPMS para Melhoria da Estabilidade

Por meio dos SPMS, sinais sincronizados com uma alta taxa de amostragem (60 amostras por segundo) podem ser medidos, em um determinado ponto, e enviados para processamento em um controlador localizado em uma subestação distante do local de medição, ou em um centro de operação do sistema elétrico. A possibilidade de acesso a diversos sinais sincronizados e distantes geograficamente abre a possibilidade de estudos de novos esquemas de controle para sistemas elétricos. A capacidade de medição de uma PMU é ilustrada na Figura 8. O conjunto de medidas disponibilizadas é composto pela magnitude de tensão na barra V_B e o ângulo θ_B , e medidas em linhas representadas pelas magnitudes e ângulos de corrente $I_1, I_2, I_3, I_L, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ e θ_L , onde o índice L designa carga local. A partir dessas medidas, outras grandezas podem ser facilmente calculadas, como potência elétrica ativa/reativa, e a frequência que pode ser calculada a partir da variação do ângulo da barra.

Grandezas, como o ângulo e a velocidade angular de uma máquina síncrona, importantes para a melhoria da estabilidade angular, podem também ser estimadas (ANGEL et al., 2007; HU; SUN Y., 2005). Interessantes inovações vêm sendo realizadas nesse sentido. Um novo conceito de PSS foi desenvolvido e implementado, em plataforma digital, em uma parceria da Hydro-Québec e a ABB. Esse produto usa um algoritmo para sintetizar a velocidade do rotor por meio de medidas das tensões e correntes terminais de um gerador (CIGRE, 2007; GRONDIN et al., 2003). Dessa forma, a velocidade do rotor poderia, também, ser utilizada como sinal de

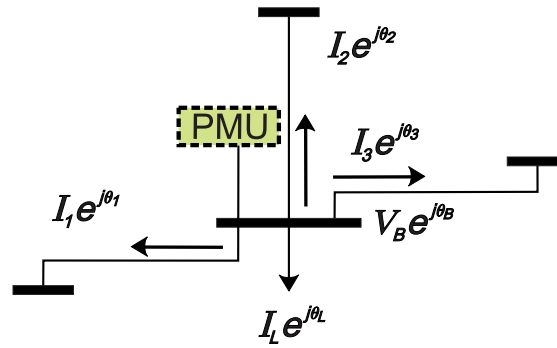


Figura 8: Medidas fornecidas pela PMU

controle.

3.3.1 Atraso no Sinal

Tratando-se de projetos de sistemas de controle, utilizando-se dados de PMUs, um fator importante a ser considerado é o atraso no processo de aquisição, transmissão e sincronização de dados. O processo de envio de um sinal medido, em uma PMU, até a sua chegada ao PDC consiste de três etapas principais. São elas:

- medição de processamento do sinal na PMU;
- transmissão do sinal;
- sincronização e processamento dos pacotes no PDC.

A estimação dos atrasos envolvidos nesse processo são de grande interesse, pois tem efeito direto nas aplicações de controle para sistemas elétricos. Nos primeiros trabalhos sobre o tema estava-se interessado em medir o atraso total desde o processo de medição até disponibilização do pacote no PDC (NADUVATHUPARAMBIL et al., 2002). Os trabalhos mais recentes têm por objetivo um estudo detalhado dos atrasos, discriminando o atraso em cada etapa do processo (STAHLHUT et al., 2008).

Um dos primeiros trabalhos a discutir essa questão é apresentado na referência Naduvathuparambil et al. (2002). Como trabalho pioneiro, o artigo apresenta os atrasos encontrados em diferentes meios físicos de transmissão de dados que podem ser usados em um SPMS. A discussão central é a de apresentar as vantagens e desvantagens de cada canal de transmissão. Os atrasos estimados variavam de acordo com o canal de transmissão e estavam na faixa de

100 – 700ms, respectivamente, canal de fibra óptica e comunicação via satélite. Esse atraso medido abrange todas as etapas do processo.

A estimativa de atrasos totais são também apresentados em Bruno et al. (2007) e Xie et al. (2006). Nesses dois trabalhos, os autores apresentam os atrasos totais obtidos em sistemas de medição fasorial instalados, respectivamente, no sistema elétrico italiano (BRUNO et al., 2007) e no sistema elétrico chinês (XIE et al., 2006). Os atrasos medidos abrangem todo o processo de medição até a sua disponibilização no PDC. Nos dois trabalhos, utilizam-se fibras óticas como meio físico e o atraso estimado é de 100ms.

Procurando-se entender melhor a natureza dos atrasos, no trabalho de Taylor et al. (2005), uma estimativa do atraso, em cada etapa do processo de envio do pacote, é apresentado, como segue:

- processo de medição (50ms);
- transmissão do sinal (33ms);
- processamento dos pacotes no PDC (33ms).

Um atraso total de na faixa de 116ms, foi estimado. Taylor et al. (2005) discutem a influência dos atrasos no desempenho do controlador apresentado. Para aplicações de controle, os atrasos desejados devem ser da menor ordem possível. Os autores apontam os canais de fibras óticas como a melhor alternativa para aplicações de controle, pois esses canais apresentam um menor tempo de transmissão do pacote.

Um trabalho recente e abrangente no tema é apresentado em Stahlhut et al. (2008). Nesse trabalho apresenta-se um estudo detalhado dos atrasos de transmissão para aplicações em *Wide-Area Control Systems* (WACS). A partir de uma bateria de medições realizadas, atrasos médios de 20ms, com um desvio padrão de 4.6ms, foram encontrados. Esses cálculos consideram somente atrasos no processo de envio do pacote abrangendo as camadas de hardware (fibra ótica) e software envolvidas no processo.

Da análise desse material, conclui-se que um atraso, na faixa de 100ms, pode ser considerado um boa estimativa para o projeto de controladores, usando sinais de medição fasorial. Essa faixa de atraso abrange o processo de medição na sua totalidade.

3.4 Melhoria da Estabilidade Transitória usando SPMS

Segundo Ernst e Pavella (2000), o problema de controle da estabilidade transitória pode ser dividido em duas partes: avaliação da instabilidade originada pela ocorrência de um distúrbio severo e a escolha de ações capazes de estabilizar o sistema. Dois tipos de controle podem ser utilizados:

- Controle Preventivo;
- Controle de Emergência.

No controle preventivo, as ações de controle são definidas com o objetivo de melhorar a segurança operacional do sistema elétrico em caso de detecção de uma condição operativa desfavorável. As ações de controle devem ser tomadas no sentido de aumentar a margem de segurança do sistema. Nesse sentido, simulações no domínio do tempo da dinâmica do sistema são realizadas para a identificação de distúrbios severos e ações de controle são determinadas para a melhoria da estabilidade do sistema em caso de contingências críticas. O redespacho de potência é uma das ações mais consideradas. A decisão de executar ou protelar a ação de controle depende, em geral, do engenheiro de operação em tempo real.

O controle de emergência, por outro lado, tem por objetivo realizar ações de controle após a ocorrência de um distúrbio severo. As ações de controle podem ser definidas em tempo real (controle em malha fechada) ou avaliadas previamente por meio de simulações *off-line* (controle de malha aberta).

A principal contribuição das redes SPMS é o de permitir a evolução dos esquemas de controle de emergência baseados em eventos, para sistemas que seguem a resposta dinâmica do sistema, dada a disponibilidade de informações em tempo real. Em contraste com sistema de controle de emergência atuais, os sistemas baseados em medição fasorial utilizam sensores estrategicamente posicionados para monitorar a resposta do sistema quando submetido a eventuais distúrbios. Tem-se, então, um sistema de controle realimentado em que as ações de controle são determinadas e quantificadas pela observação da resposta do sistema.

Os desafios para o projeto de controladores em malha fechada, usando sinais de medição fasorial, estão relacionados aos atrasos no processo de envio dos sinais e ao uso de algoritmos de controle capazes de sintetizar a ação de controle em tempo real. Este último é o maior desafio dada a alta dimensão do sistema e o tempo reduzido de tomada de decisão.

Devido aos desafios de grande magnitude, trabalhos na área de controle de emergência em malha fechada são escassos. Na próxima Seção, apresentam-se os trabalhos encontrados na literatura que tratam dessa questão utilizando dados de medição fasorial sincronizada.

3.4.1 Controle de Emergência em Malha Fechada

Proposto em Taylor et al. (2005), o sistema WACS (*Wide-Area stability and voltage Control System*) consiste de uma plataforma rápida e flexível para rejeição de geração e chaveamento de compensadores de reativo para a melhoria da estabilidade transitória. Para atingir esse objetivo, utiliza-se medição fasorial da seqüência positiva, comunicação por fibra óptica (diretamente com as subestações de 500 kV), um computador para controle em tempo real e canais de comunicação para rejeição de geradores e chaveamento de banco de capacitores/indutores em linhas de 500 kV (TAYLOR et al., 2005).

O sistema WACS aparece como uma alternativa aos tradicionais sistemas de controle de emergência, citados na literatura como Special Protection Schemes (SPS). Os SPSs são baseados na detecção direta de distúrbios pré-definidos e atuam por meio de lógicas pré-definidas. Taylor et al. (2005) relatam que as principais desvantagens dos tradicionais SPSs são: capacidade de controlar somente eventos pré-definidos, complexidade e relativo alto custo.

Em contraste com os SPSs, os sistemas baseados em WACS utilizam sensores estrategicamente posicionados para monitorar a resposta do sistema quando submetido a eventuais distúrbios. WACS é um sistema de controle realimentado em que as ações de controle são determinadas e comandadas pela observação da resposta do sistema. Ações de controle, como rejeição de geradores e chaveamentos de bancos de capacitores, são tomadas quando necessário.

Nesse sistema, medições fasórias selecionadas a partir do conjunto de PMUs instaladas na BPA foram utilizadas. Como atuadores, utilizam-se os sistemas de *transfer-trip* dos SPSs existentes na BPA. O novo desenvolvimento desse projeto é o controlador em tempo real. Para a operacionalização desse sistema, necessitam-se algoritmos para detecção e mitigação dos distúrbios severos.

Dois algoritmos são atualmente utilizados para a detecção de distúrbios em tempo real (TAYLOR et al., 2005). O primeiro método desenvolvido (V_{magQ}) é baseado na observação de magnitudes de tensão e na potência reativa dos geradores, já que esta última é uma indicação do nível de carregamento do sistema de potência. Um segundo método (V_{mag}) baseado somente na magnitude da tensão foi posteriormente desenvolvido e apresentava-se mais rápido e simples que o primeiro. Entretanto, após a recente troca dos sistemas de controle de tensão de gerado-

res, que fazem parte do experimento, verificou-se que os dois métodos apresentam velocidades semelhantes.

Taylor et al. (2005) apresentam uma breve justificativa teórica do algoritmo Vmag. Esse algoritmo relaciona a variação na tensão de determinadas barras do sistema durante um evento à severidade do distúrbio. Especificamente, quando as tensões permanecem abaixo de certo limite ou quando os erros das tensões ultrapassam valores pré-especificados, diferentes ações de controle são iniciadas para mitigar o distúrbio. Os autores mostram que afundamentos nos valores da tensão indicam a proximidade da trajetória do sistema do limite da região de atração do corrente ponto de operação. Quando a trajetória permanece dentro da região de atração, o sistema permanece estável e cumpre o principal objetivo do controle WACS. De outra forma, se a trajetória do sistema é levada para fora da região de atração, o sistema torna-se transitoriamente instável. Novas experiências em laboratório vêm sendo feitas para a melhoria do sistema. No futuro, a equipe deseja comercializar um sistema de controle que possa substituir os tradicionais SPSs.

Em Ernst e Pavella (2000), apresenta-se uma ferramenta para medição do grau de estabilidade angular, utilizando o critério das áreas iguais (expressando o balanço entre energia acelerante e desacelerante), para o controle de emergência utilizando dados de medição fasorial. Inicialmente, os autores descrevem o método SIME (*Single Machine Equivalent*) e que é utilizado para a implementação do algoritmo de controle de emergência. O método desenvolvido é denominado SIME Emergencial e conta com medidas em tempo real, após a ocorrência da contingência, para a avaliação e execução das ações de controle de emergência, para a manutenção da integridade do sistema. Especificamente, a metodologia consiste na predição, por meio da expansão em série de Taylor, do valor dos ângulos dos geradores em um tempo determinado após a ocorrência da perturbação (tipicamente 100ms), correspondente ao período pós-falta. Os geradores com maiores aberturas angulares são selecionados como candidatos ao conjunto de máquinas críticas, responsáveis pela perda de sincronismo do sistema. A determinação das margens de estabilidade é então realizada com o método SIME, com a respectiva construção de um equivalente máquina barra infinita (OMIB) a partir das medidas obtidas em tempo real. Para as contingências que conduzem o sistema à instabilidade, seleciona-se, dentre os geradores pertencentes ao conjunto de máquinas críticas, o número mínimo necessário a ser retirado de operação, de modo a garantir a estabilidade do sistema. Todo o desenvolvimento parte do princípio de que as variáveis necessárias à implementação da metodologia podem ser obtidas por medição fasorial, localizada em cada planta de geração, e pela instalação de alguns processamentos adicionais para a determinação de ângulos, velocidades e acelerações dos geradores. Como desvantagens desse método destacam-se a necessidade de correta identificação dos gera-

dores críticos para a construção do equivalente máquina barra infinita e a seleção adequada dos geradores a serem retirados de operação.

Bruno et al. (2007) apresentam um sistema de controle em tempo real baseado na resposta do sistema. O esquema proposto segue os desenvolvimentos apresentados em Taylor et al. (2005). O controle atua no sistema por meio de dispositivos FACTS e corte de carga. As ações de controle são tomadas após a solução de um problema de otimização dinâmica não-linear usando o método do lagrangeano aumentado. Os autores relatam a dificuldade de operacionalizar o controle em tempo real, dado o porte do problema e o tempo necessário ao processamento do algoritmo em tempo real. Os autores seguem investigando melhores técnicas para reduzir o tempo de atuação do controle.

3.4.2 Controle de Emergência em Malha Aberta

Nesse esquema de controle as ações são definidas a priori por meio de simulações *off-line*. Wang et al. (2004) descrevem um SPS para prevenir blackouts no sistema elétrico de Taiwan utilizando medição fasorial. O sistema elétrico de Taiwan é dividido em duas partes: o norte de Taiwan é uma área predominantemente de geração e o sul uma área predominantemente de carga. As duas áreas são conectadas por linhas de EHV (*Extra High Voltage*) que, juntamente com determinados geradores, são monitorados por PMUs que enviam dados para o centro de controle do sistema. Essas medidas servem de entrada para um algoritmo de predição da instabilidade que aciona o SPS. Quando ocorrem eventos no sistema, os geradores que oscilam coerentemente são reduzidos a um equivalente máquina barra infinita. A identificação dos grupos de geradores que oscilam coerentemente é baseada em simulações *off-line*. As ações de controle consistem de rejeição de carga e geração e são determinadas com base no critério das áreas iguais para o equivalente utilizado. Conforme o tamanho da área desacelerante necessária, a estabilidade do sistema mais ou menos carga ou geração é cortada.

Um sistema *on-line* de controle da estabilidade transitória é apresentado em (LI et al., 2005). Esse sistema tem como base um SPMS, com nove PMUs, localizado na província de Jiangsu na China. O estimador de estados foi alterado para processar medidas fasoriais com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Com um tempo menor no processo de estimação de estados, aplica-se uma metodologia de avaliação da estabilidade transitória em tempo real usando-se simulações no domínio do tempo. Os resultados obtidos com esses processamentos são utilizados para melhorar o ajuste do controle de emergência daquele sistema e das ações a serem realizadas com o controle preventivo.

3.5 Melhoria da Estabilidade Angular a Pequenas Perturbações usando SPMS

Em se tratando de estabilidade angular a pequenas perturbações, um dos problemas mais relevantes está relacionado aos efeitos do controle de excitação no amortecimento de oscilações que caracterizam o fenômeno da estabilidade. Esse efeito tem sido uma preocupação permanente, e a sua ocorrência encontra-se no fato de que, sob condições de operação com carga pesada e sistema externo fraco, o amortecimento gerado pelo regulador automático de tensão (RAT) pode ser negativo (DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Dentre as ações empreendidas, inicialmente, para neutralizar as causas do amortecimento negativo, podem ser citadas a redução do ganho transitório dos reguladores (DEMELLO; CONCORDIA, 1969) ou a redução dos limites de transferência de potência. Ambas são altamente indesejáveis, porquanto reduzem os limites da estabilidade ou são economicamente pouco convenientes.

Grandes SEEs tipicamente apresentam múltiplos modos de oscilação inter-área, os quais estão associados com a dinâmica dos fluxos inter-área e envolvem grupos de máquinas oscilando entre si. Com a desregulamentação dos sistemas de energia elétrica, a transferência de energia por linhas de longa distância está aumentando, sem a adição de novas linhas, causando o aparecimento de modos inter-área com baixo amortecimento. Incidentes com aparecimento de modos de oscilação pouco amortecidos e com origem desconhecida estão agora ocorrendo em sistemas tradicionalmente bem amortecidos. Como resultado, muitos operadores de rede estão procurando adicionar dispositivos suplementares de amortecimento para incrementar a segurança do sistema (CHOW et al., 2000).

O dispositivo tradicional para amortecimento dessas oscilações é o *Power System Stabilizer* (PSS), que fornece um controle suplementar atuando no controle de tensão dos geradores (KUNDUR, 1994). A utilização de sinal suplementar derivado da velocidade, frequência, potência elétrica ou potência de aceleração, na excitação das máquinas síncronas, tem sido até agora a melhor maneira de aumentar o amortecimento positivo do sistema (PENA, 1992). Nos últimos anos, o uso de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) vem se tornando uma prática comum em SEE para o aumento da capacidade de transmissão do sistema (CHAUDHURI et al., 2004a). Sistemas de transmissão HVDC, os quais têm uma característica de resposta rápida, podem também ser usados para o amortecimento de oscilações (HUANG; XU, 2004). Estudos na área de modulação de potência ativa também vêm sendo considerados (SAMUELSSON, 2001; KAMWA et al., 1999).

Um cenário comum aos projetistas é que o número de modos inter-área dominantes no sistema é muito maior que o de dispositivos de controle disponíveis. Esses dispositivos podem controlar múltiplos modos desde que o sinal medido contenha informações com relação aos mesmos. Dessa forma, a aplicação clássica do PSS medindo sinais e amortecendo oscilações localmente, e talvez adicionando amortecimento a um modo de oscilação inter-área, não é suficiente. Novas estruturas de controle, capacitadas a processar informações de modos remotos, são necessárias para o amortecimento de múltiplos modos (CHOW et al., 2000).

As principais estruturas de controle consideradas na literatura são quase-decentralizada, centralizada e hierárquica. Na seqüência, essas estruturas são descritas em detalhes.

3.5.1 *Controle Descentralizado com Realimentação de Sinais Remotos*

Nesse tipo de estrutura o controlador, localizado na planta, é alimentado por um sinal local e por um sinal remoto. Os dois sinais são processados localmente no dispositivo e um sinal de controle é gerado. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 9.

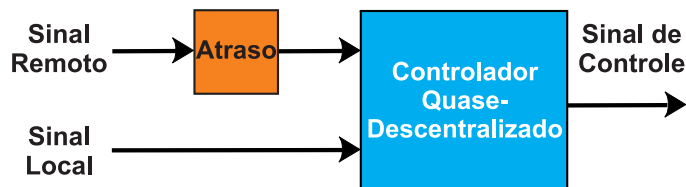


Figura 9: Estrutura de Controle Quase-Decentralizada

Nesse tipo de estrutura, o atraso a ser modelado está relacionado a uma medida remota. Em relação ao projeto, podem ser considerados métodos de projeto SISO (*Single Input Single Output*) (CHOW et al., 2000), em que os sinais são combinados de modo que um único sinal de entrada chegue até o controlador, ou MISO (*Multi Input Single Output*), em que os sinais de entrada são processados no próprio controlador (síntese do sinal de controle), resultando em um único sinal de saída (CHAUDHURI et al., 2004a; MARINI, 2005). Na literatura, encontram-se trabalhos que procuram explorar a aplicabilidade desse tipo de controlador no sistema, usando dados remotos de PMU. Diversos dispositivos são explorados como PSS (SAMUELSSON et al., 2002; CHOW et al., 2000; MARINI, 2005; CHEN et al., 2006), FACTS (CHAUDHURI et al., 2004b; CHAUDHURI et al., 2004a) e HVDC (HUANG; XU, 2004).

3.5.2 Controle Centralizado

Nesse tipo de estrutura, o controlador, situado em um local central (subestação, centro de operação), é alimentado por sinais remotos. Os sinais são processados no controlador central e enviados diretamente à planta localizada remotamente. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 10. Nesse caso, cada sinal de controle é o resultado do processamento dos diversos sinais medidos, caracterizando uma estrutura de controle multivariável (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Nas seguintes referências, encontram-se detalhes do projeto de controladores centrais utilizando medição fasorial sincronizada (WU; HEYDT, 2003; WU et al., 2004).

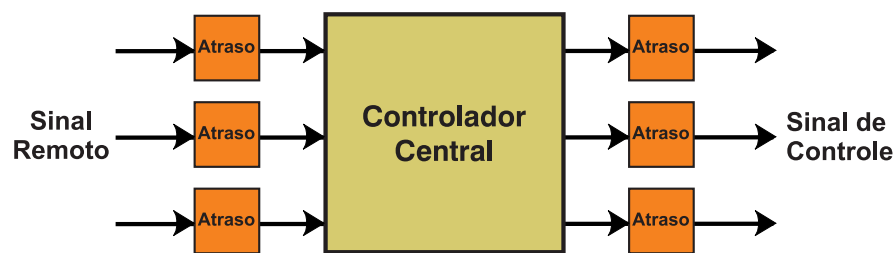


Figura 10: Estrutura de Controle Centralizada

3.5.3 Controle Hierárquico

Esse tipo de estrutura de controle é uma combinação da convencional estrutura descentralizada de controles locais com um controle central alimentado por sinais remotos. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 11. Os sinais são processados no controlador central e enviados à planta. Na planta, os sinais do controle central são combinados com os sinais do controlador local, aumentando a capacidade de controle do sistema. No controle central, cada sinal de controle é o resultado do processamento dos diversos sinais medidos caracterizando uma estrutura de controle multivariável (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Trabalhos ilustrando o projeto do controle hierárquico, utilizando PSSs podem ser encontrados em Kamwa et al. (2001), Ni et al. (2002), Okuo et al. (2005), Okou et al. (2005), Dotta et al. (2007), Hu e Milanovic (2007), Zhang e Bose (2008) e, para modulação de carga ativa, em Kamwa et al. (1999). No entanto, estruturas de controle que considerem atrasos e métodos de controle multivariável para o projeto dos controladores são considerados somente em Okuo et al. (2005), Okou et al. (2005), Wu et al. (2004), Dotta et al. (2007).

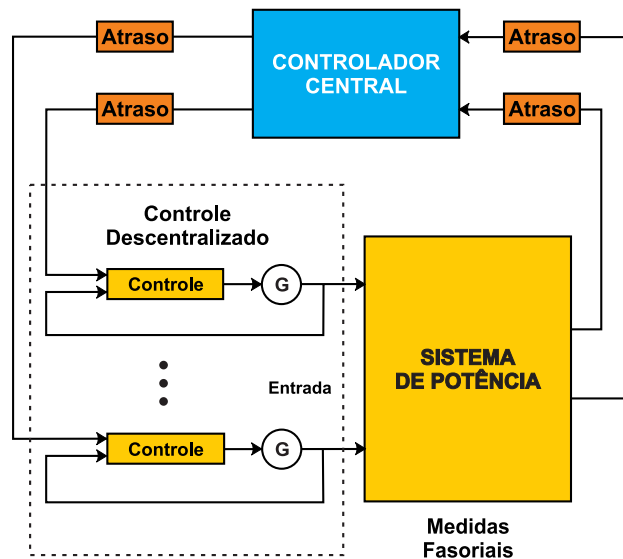


Figura 11: Estrutura Hierárquica

3.5.3.1 Principais Desafios no Projeto de Controladores utilizando Sinais Remotos

O projeto das estruturas de controle descritas apresentam diversos desafios em comum, a saber:

- atrasos na transmissão dos sinais remotos;
- utilização de conceitos e métodos de projeto de sistemas multivariáveis;
- assegurar a robustez à perda de canais de comunicação, variação no tempo de comunicação e mudanças na configuração do sistema.

A questão comum e relevante relacionada a todas as arquiteturas é a consideração dos atrasos nos canais de comunicação. A introdução de atrasos na malha de controle tem efeito desestabilizante, reduzindo a efetividade do controle (WU et al., 2004). Os atrasos podem, em alguns casos, levar o sistema à instabilidade (WU et al., 2004). No caso dos sistemas elétricos, a robustez do projeto deve ser levada em conta dadas às frequentes variações de configuração que ocorrem durante a operação. Os controladores devem ser robustos o suficiente para garantir a estabilidade dos sistemas em diferentes condições de operação.

A primeira arquitetura (controle descentralizado com sinais remotos), ilustrado na Figura 9, tem como vantagem a possibilidade de conexão direta dos sinais medidos remotamente ao PSS local. Isso poderia reduzir o custo do sistema já que o PDC seria eliminado nessa configuração. No entanto, tem como principal desvantagem a grande vulnerabilidade quando há perda do

sinal remoto, podendo até mesmo levar o sistema à instabilidade, como relatado em Chow et al. (2000).

A segunda arquitetura (controle centralizado), ilustrado na Figura 10, apresenta maior observabilidade já que utiliza sinais de diversos pontos do sistema. No entanto, em caso de problemas no controlador central o sistema elétrico ficaria exposto, já que não haveria nenhuma outra camada de controle para assegurar o amortecimento do sistema.

Já, a abordagem hierárquica, ilustrado na Figura 11, é a que apresenta o maior potencial de aplicação em SEE, pois agrega os benefícios do controle central juntamente com a consideração de uma camada de controle de retaguarda. Essa camada de retaguarda é formada pelo controle descentralizado, que atuaria garantindo um mínimo desempenho do sistema em caso de falha no controle centralizado. Há poucos estudos abordando esse tema (OKUO et al., 2005; WU et al., 2004) que considerem os atrasos de comunicação no momento da realização do projeto. Além disso, nenhuma delas apresenta um estudo mais elaborado abordando questões como seleção de sinais, minimização da redundância de medidores, avaliação do desempenho do sistema quanto à perda de canais de comunicação, variação de atraso no canal de comunicação e mudanças de ponto de operação. Dada a potencialidade desse esquema de controle, o foco principal deste trabalho está na investigação da capacidade do mesmo na melhoria da estabilidade dos sistemas elétricos.

3.6 Métodos de Projeto

Embora, para sistemas monovariáveis, o método clássico (domínio da frequência) seja plenamente justificado (PENA, 1992) (como o caso do controle local), em sistemas de múltiplas entradas e saídas os critérios de desempenho a serem satisfeitos são diferentes, dada a complexidade da dimensão dos processos e o acoplamento entre entradas e saídas (PATEL; MUNRO, 1982).

Em sistemas elétricos de potência, este aspecto tem uma importância fundamental. A grande extensão territorial destes sistemas, principalmente quando há predominância de geração de origem hidráulica, geralmente afastada dos centros de carga, fazem com que a sua estabilidade dinâmica fique deteriorada. A solução clássica, embora muitas vezes resolva satisfatoriamente o problema, pressupõe um projeto de natureza seqüencial baseado em técnicas derivadas do caso máquina-barras infinita.

As ferramentas disponíveis na teoria de controle multivariável aplicadas a sistemas de grande porte, apresentam vantagens dada sua capacidade de tratar o problema de forma global.

Levando em consideração as interações dinâmicas, gerando-se um projeto de natureza coordenada, cuja solução ótima no sentido de minimizar um determinado índice de desempenho ou função-custo.

Os esquemas de controle hierárquico apresentam múltiplas entradas e saídas, caracterizando um problema de Controle Multivariável. Para o projeto desses controladores, além de métodos de projeto multivariáveis, deve-se também considerar a restrição de realimentação de saídas. Essa restrição é altamente recomendável, já que o modelo matemático do sistema de potência apresenta um elevado número de estados e que dificilmente poderiam ser medidos e processados pelo sistema de controle em sua totalidade.

O objetivo dessa Seção é o de apresentar os principais métodos encontrados na literatura que podem ser aplicados para o projeto do controlador central. Os métodos são apresentados como segue.

3.6.1 Controle Ótimo

Na literatura, encontram-se diversas metodologias de projetos baseados em controle ótimo na área de sistemas de potência (HIRANO et al., 1990; SIMÕES-COSTA et al., 1995; SIMÕES-COSTA et al., 1997). Métodos baseados em controle ótimo apresentam a possibilidade da incorporação de atrasos, no momento da realização do projeto, e a consideração de restrições estruturais como a realimentação de saídas e descentralização (SIMÕES-COSTA et al., 1995). Essa abordagem permite que controladores dinâmicos com realimentação de saídas de baixa ordem possam ser considerados. O desempenho do sistema pode ser configurado pelas matrizes **Q** e **R**, onde são atribuídos pesos, respectivamente, aos estados e do esforço de controle. O projeto do controle hierárquico utilizando controle ótimo e incluindo os atrasos no momento da realização do projeto pode ser encontrado em Dotta et al. (2009).

3.6.2 LMIs (*Linear Matrix Inequalities*)

As LMIs são uma poderosa ferramenta para a resolução de problemas de controle baseadas em métodos numéricos robustos e eficientes (BOYD et al., 1994). Entre as principais vantagens da utilização de LMIs estão a capacidade de incorporação de incertezas e limites de desempenho no momento do projeto. A consideração desses itens permite a obtenção de controladores robustos a variações de parâmetros com o desempenho pré-especificado. Adicionalmente, métodos bem conhecidos baseados na minimização da norma H_2 e na minimização da norma H_∞ podem também ser expressos como LMIs.

Dada a sua potencialidade, esse método é intensivamente explorado por pesquisadores na área de sistemas elétricos (SCAVONI et al., 2001). Há diversos trabalhos considerando a aplicação de LMIs, para a implementação de controladores descentralizados e centralizados (BOUKARIM et al., 2000; NI et al., 2002; CHEN et al., 2006; RAMOS et al., 2004; HU; MILANOVIC, 2007; ZHANG; BOSE, 2008), utilizando realimentação de saídas para sistemas elétricos. Especificamente, para o projeto de controle hierárquico considerando sinais de PMUs, esse método é o mais empregado. Nos trabalhos citados, os autores se utilizam da abordagem LMI apresentada em Chiali e Gahinet (1996) para o projeto do controlador. No entanto, a principal desvantagem dessa abordagem é que o controlador projetado tem a mesma ordem da planta, dificultando a sua aplicação em sistemas de potência. Pode-se projetar o controlador com restrições de baixa ordem o que resulta em um problema de otimização não-convexa e de difícil solução (BOUKARIM et al., 2000). A solução típica para esse problema é a aplicação de redução de ordem da planta para se projetar um controlador da mesma ordem. Em seguida, aplica-se a redução de ordem no controlador obtendo, assim, um controlador factível do ponto de vista prático (HU; MILANOVIC, 2007; SANCHEZ-GASCA; CHOW, 1996; ZHANG; BOSE, 2008; BOUKARIM et al., 2000).

3.6.3 *Controle Preditivo*

O Controle Preditivo Baseado em Modelo (CPBM) é uma das técnicas de controle moderno e eficaz para aplicações industriais. O métodos de projeto suporta sistemas monovariáveis e multivariáveis, realimentação de saídas e pela própria definição dos algoritmos, sistemas que apresentam atrasos. O CPBM não é uma estratégia de controle específica, mas é o nome dado a um conjunto de métodos de controle que foram desenvolvidos considerando idéias comuns. As características comuns desses sistemas de controle são basicamente:

- usam um modelo explícito do processo para prever a saída do mesmo num determinado horizonte;
- calculam as ações de controle para todo o horizonte de tempo a partir da minimização de uma determinada função objetivo;
- utilizam horizonte deslizante, para cada período de amostragem, o horizonte é deslocado um passo à frente, aplicando-se unicamente a ação de controle daquele instante.

As diferenças entre os diversos algoritmos existentes estão relacionadas, basicamente, à forma de escolher os modelos para o processo e perturbações, ao tipo de função objetivo e restrições usadas para o cálculo da lei de controle. Essas diferentes opções de modelo, função

objetivo e método para cálculo da lei de controle geram as diversas versões de controladores propostos na literatura (CAMACHO; BORDONS, 2003).

Trabalhos na área de controle preditivo aplicados a sistemas de potência podem ser encontrados em Barreiros et al. (1998), Zima e Andersson (2003), Chaudhuri et al. (2004b), Okuo et al. (2005). Na referência Okuo et al. (2005), o método de controle preditivo é aplicado ao projeto do controle hierárquico considerando atrasos totais de 400ms.

3.6.4 Métodos Evolucionários

Recentemente, técnicas baseadas em algoritmos genéticos (AG) e *Particle Swarm Optimization* (PSO) têm se destacado entre os vários métodos modernos baseados em heurística (PANDA; PANDHY, 2007). Essas técnicas têm popularidade, pois podem resolver problemas de otimização com múltiplos pontos de mínimo, considerando funções não-contínuas e não-diferenciáveis.

O algoritmo genético é um método estocástico de busca global, inspirado na teoria da evolução, proposta por Charles Darwin, no Século XIX, em sua clássica obra "*On the Origin of the Species*", impondo o princípio de sobrevivência do mais apto, a fim de produzir soluções melhores a cada geração (GOLDBERG, 1989). Ou seja, a cada geração, uma nova população de indivíduos é criada a partir de informações genéticas dos melhores indivíduos da geração anterior, selecionados a partir de um critério específico. A idéia do algoritmo é codificar soluções potenciais, para um dado problema em uma estrutura simples (cromossomo), e aplicar a ela operadores de recombinação, de forma a preservar a informação crítica. Cada cromossomo consiste em um número de gene, sendo cada gene composto por bits. Os AGs são capazes de pesquisar e encontrar mínimos locais ou globais, mas têm um custo computacional alto, tendo em vista, a necessidade da avaliação da totalidade da população a cada iteração do algoritmo. Uma alternativa para suplantarmos essa desvantagem é o método do PSO.

Particle Swarm Optimization (PSO) é um dos últimos métodos evolucionários de otimização (UYSAL; BULKAN, 2008). É uma técnica baseada em populações, originalmente, proposta em Kennedy e Eberhart (1995). A PSO surgiu de experiências com algoritmos modelados a partir da observação do comportamento social de determinadas espécies de pássaros. Sendo um algoritmo evolucionário, os membros de um algoritmo PSO tendem a seguir o líder do grupo, isto é, aquele que apresenta o melhor desempenho.

O PSO compartilha muitos pontos em comum com o AG. Ambos os algoritmos iniciam com um grupo aleatório de população; têm valores de aptidão para evoluir a população; atualizam a

população e procuram pelo valor ótimo usando técnicas baseadas no acaso; e não têm garantia de sucesso (UYSAL; BULKAN, 2008).

Entretanto, o PSO é claramente diferente de outros métodos evolucionários, já que não usa operações de filtragem (como crossover e mutação), e os membros de toda a população são mantidos ao longo da procura, compartilhando informações entre os indivíduos.

A aplicação de métodos de AG para a melhoria do amortecimento do sistema elétrico é apresentado em Bomfim et al. (2000). O método foi utilizado para o projeto de PSS para sistema de grande porte. Os autores relatam a necessidade do uso de computação paralela para a melhoria do tempo computacional. Uma comparação de AG e PSO para o projeto de um TCSC é apresentado em Panda e Pandhy (2007). Como principal conclusão destaca-se o melhor desempenho computacional do método baseado em AG. Por outra lado, o PSO alcança o resultado final com um número menor de gerações.

3.7 Conclusões

O objetivo principal deste Capítulo foi o de apresentar as principais aplicações de controle encontradas na literatura usando medição fasorial sincronizada. As aplicações apresentadas estão restritas à melhoria da estabilidade angular (transitória e pequenos-sinais)². A principal contribuição das redes SPMS, para a melhoria da estabilidade angular, é a sincronização e a alta taxa de amostragem, dados comparados com o sistema SCADA. Essa alta taxa de amostragem possibilita a inédita capacidade de observação da dinâmica do sistema.

Com relação à estabilidade transitória, muda-se o paradigma do controle de emergência voltado a eventos para o baseado na resposta dinâmica do sistema. Os principais benefícios desse novo paradigma estão na tomada da decisão em tempo real, avaliando-se as condições de operação do sistema elétrico. Tem-se o objetivo de minorar as desvantagens dos tradicionais esquemas de proteção baseados em estudos *off-line* de eventos pré-definidos que não consideram o estado real dos sistemas. Como principal desafio dessa área, cita-se a necessidade de melhores métodos para o projeto de ações de controle em tempo real. O desafio está diretamente relacionado às características de grande porte do sistema e o tempo de tomada da decisão.

Considerando a estabilidade a pequenos-sinais, diversas estruturas de controle podem ser concebidas usando dados de PMU. Os principais desafios dessa área são o amortecimento de modos de oscilação que podem aparecer durante a operação em tempo real. Todas as estruturas

²Uma referência para aplicações nas áreas de estabilidade de tensão e frequência, podem ser encontradas em Zima et al. (2005), CIGRE (2007).

apresentadas trazem contribuições para a melhoria do desempenho do sistema, no entanto, o esquema de controle hierárquico apresenta um alto potencial comparado aos demais. Esse esquema trabalha em sinergia com a atual estrutura de controle descentralizada do sistema, complementando a sua atuação. Em caso de falha no controle central o controle descentralizado garante um desempenho mínimo para o sistema. Outra grande vantagem do controle hierárquico é a de que o controle central deverá estar localizado no centro de operação do sistema (COS), facilitando a reconfiguração do sistema de controle em caso de mudanças bruscas no ponto de operação. Dada a potencialidade do controle hierárquico para a melhoria da operação do sistema elétrico e considerando todos os desafios de um projeto desse porte, propõe-se, no âmbito deste trabalho, a investigação desse esquema de controle. No próximo Capítulo, apresenta-se em detalhes, a estrutura desse esquema de controle, juntamente com a discussão dos principais desafios de projeto do referido esquema de controle.

4 ESTRUTURA E MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

4.1 Introdução

Neste Capítulo apresenta-se a estrutura do controle proposto e a modelagem do sistema elétrico para o projeto do controle hierárquico, usando-se dados de medição fasorial sincronizada. O objetivo desse controle é melhorar o desempenho dinâmico do sistema em comparação ao tradicional controle descentralizado. Como discutido no Capítulo 3, esse esquema de controle apresenta forte potencial de aplicação na indústria de energia elétrica.

O Capítulo inicia-se com uma descrição da metodologia proposta, ressaltando as vantagens e desafios deste projeto. Logo, em seguida, realiza-se a descrição dos modelos utilizados que servirão para o projeto do controlador central, que será apresentado no Capítulo 6.

4.2 Descrição da Estrutura de Controle

O presente trabalho tem como proposta principal projetar e implementar uma estrutura de controle hierárquico em dois níveis. O primeiro nível consiste de uma estrutura descentralizada, com medições locais, agindo localmente no sistema de excitação da máquina síncrona. Esse é o sistema convencional de controle utilizado na indústria. O segundo nível atua como um nível superior otimizando a operação do controle descentralizado. Esse controle é projetado utilizando-se a abordagem de controle centralizado, onde todas as entradas contribuem para o cálculo do esforço de controle. Essa estrutura é apresentada na Figura 12. Os níveis que compõem o controle hierárquico são descritos a seguir.

4.2.1 Controle Descentralizado

O controle descentralizado é largamente utilizado na indústria de energia elétrica. Esse esquema tradicional de controle utiliza sinais medidos em um ponto próximo ao atuador. Os sinais mais utilizados são a velocidade do gerador, a potência elétrica e a potência acelerante. O sinal medido é processado, e um sinal de controle é aplicado localmente na planta. Os tradicionais dispositivos de controle local para amortecimento de oscilações são os PSSs e os dispositivos FACTSs. Dado o custo elevado dos dispositivos FACTS, quando comparados aos PSSs, este último é o mais utilizado.

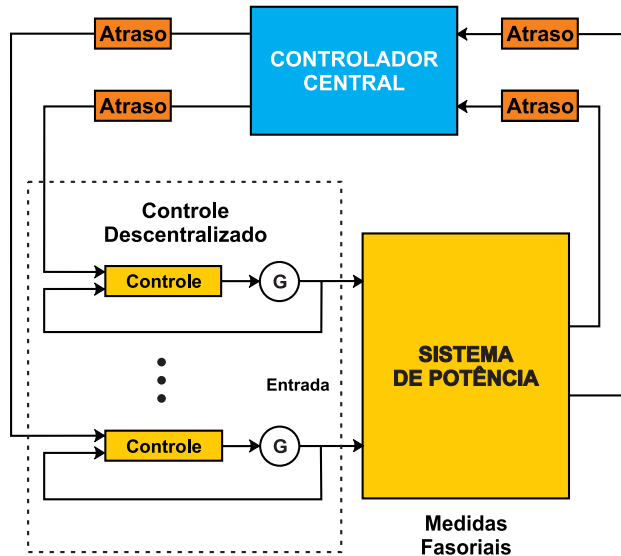


Figura 12: Estrutura de Controle Hierárquica

Considerando a sua característica de atuar localmente, os controladores descentralizados são mais efetivos para o amortecimento de modos de oscilações locais. Na presença de modos de oscilação inter-área esse tipo de controle pode não ser tão efetivo, já que as informações com relação a esses modos podem não estar disponíveis localmente. No controle hierárquico, essa deficiência é suprida pelo controle central que utiliza informações de diversos pontos, ao longo da rede, obtendo uma visão global do sistema. Esse controle será discutido em detalhes como segue.

4.2.2 Controle Centralizado

O projeto de controladores centralizados não é uma novidade na área de sistemas de energia elétrica (SANCHEZ-GASCA et al., 1989). Esse controlador atua a partir de uma "visão" global do sistema elétrico. Devido às limitações práticas, principalmente relacionadas à falta de um sistema de aquisição de dados, em tempo real, para grandes áreas, ele foi relativamente abandonado nas últimas décadas. O surgimento da tecnologia de medição fasorial venceu essa limitação permitindo a sua implementação prática. Considerando a estrutura hierárquica, o controle centralizado consiste de um controlador projetado para otimizar o desempenho do sistema de uma forma global. O sistema de medição fasorial fornece medidas de pontos distantes, geograficamente, do sistema e, por sua característica multivariável, a ação de controle é projetada considerando o cruzamento dessas informações. Por ser um controlador global, o controle central apresenta efetividade para o amortecimento de modos de oscilação inter-área. Esses modos são caracterizados pelas oscilações entre si, de conjuntos de máquinas pertencentes a

diferentes áreas do sistema elétrico. Como o controle descentralizado, geralmente, garante um amortecimento mínimo, o controle central deve atuar melhorando a dinâmica do sistema ou, em outras palavras, otimizando o desempenho global. Da mesma forma que o controle local, a saída do controlador central atuaria no sistema de excitação das máquinas aptas a receber o sinal do controle centralizado. O esquema é apresentado na Figura 13.

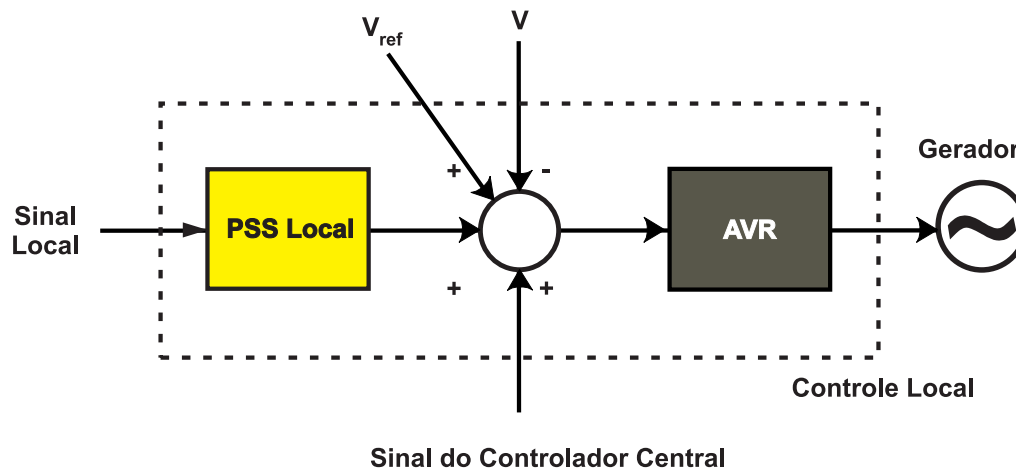


Figura 13: Esquema de atuação do controle hierárquico

Da análise da revisão bibliográfica, verifica-se que a estrutura de controle hierárquico, utilizando PSSs para o amortecimento de oscilações, proposta pela primeira vez em Sanchez-Gasca et al. (1989), pode ser agora viabilizada utilizando-se dados de medição fasorial sincronizada. No presente trabalho, a escolha dessa estrutura foi balizada nas seguintes considerações:

- robustez da estrutura quanto à perda de canais de comunicação;
- garantia de mínimo desempenho quando da perda do controle central;
- facilidade de instalação e configuração de um controle centralizado no centro de operação;
- não-necessidade de reconfiguração de PSSs locais, nos casos de alterações significativas na rede elétrica.

4.2.3 Características do Controle Hierárquico

Como apresentado anteriormente, o controle hierárquico apresenta um grande potencial de aplicação na indústria de energia elétrica. Ele pode melhorar o desempenho do controle descentralizado, melhorar o amortecimento dos modos inter-área e, no caso de falha do controlador central, o controle descentralizado atuaria assegurando um mínimo desempenho para o sistema.

No entanto, somente essas vantagens não são suficientes para motivar a instalação desse esquema de controle. A principal discussão com relação ao esquema de controle hierárquico é o da demonstração da sua superioridade comparado ao tradicional esquema de controle descentralizado. Somente a justificativa de melhoria de amortecimento de modos inter-área não é suficiente. A melhoria no amortecimento dos modos inter-área pode também ser alcançada considerando somente o esquema descentralizado. Para tanto, métodos multivariáveis de projeto para controladores descentralizados podem ser utilizados. O ajuste coordenado de PSSs é assunto bastante discutido e sua efetividade já foi apresentada em diversos trabalhos (SIMÕES-COSTA et al., 1997) (BOMFIM et al., 2000) (PELLANDA et al., 2006).

Deseja-se destacar que o ajuste coordenado do controle descentralizado é eficiente podendo levar maiores amortecimentos, quando comparados com o controle central. Com o controle descentralizado bem ajustado a justificativa de inclusão de um controle centralizado é difícil de ser sustentada, se somente o critério de amortecimento for considerado. Em experiências realizadas no âmbito deste trabalho o ganho em termos de amortecimento é de cerca de 3% a 4%, quando da inclusão do controle central em sistemas com ajuste coordenado.

Embora o ajuste coordenado de controladores seja efetivo, há uma restrição prática a ser considerada nesse problema. O ajuste coordenado de PSSs é de difícil implementação prática, pois considera dispositivos de controle distribuídos ao longo do sistema e de propriedade de diferentes empresas. Além disso, os pontos de controle a serem ajustados variam com a configuração do sistema, o que dificulta a escolha de pontos preferenciais de ajuste. Na operação, em tempo real, podem surgir modos de oscilações mal amortecidos restringindo a operação do sistema elétrico. O ajuste coordenado de PSSs não pode ser feito rapidamente devido ao tempo para a solicitação de ajuste ao agente proprietário do gerador e a disponibilidade da equipe técnica desse para efetuar as alterações no atuador.

Destaca-se também que dependendo da estrutura de mercado vigente o agente gerador pode não ter interesse em efetuar o ajuste necessário, pois a partir de análise econômica, a configuração, em restrição operativa, pode lhe ser favorável. Esses atrasos e interesses contrários podem restringir a operação, em tempo real, limitando, por exemplo, a transferência de potência entre subsistemas.

Na configuração proposta no presente trabalho, o controle centralizado é instalado no centro de operação do sistema elétrico. Na presença de modos de oscilação mal amortecidos, na operação, em tempo real, o controle central pode ser facilmente reajustado pelo operador sem a necessidade de contatos intermediários. O Operador tem o interesse e deve fazer o possível para minimizar o custo operativo do sistema. Logo, é o maior interessado em todo o processo, eli-

minando discussões econômicas e financeiras com os agentes. Dessa forma, o amortecimento do sistema pode ser otimizado, diminuindo as restrições operativas em tempo real.

4.3 Requisitos de Projeto

Neste trabalho, o projeto do controle descentralizado não é considerado. A idéia básica é que essa camada já esteja configurada, evitando, assim, o processo de reajuste. O desafio do projeto aqui consiste na síntese de um controlador central com múltiplas entradas e saídas, em que os principais desafios a serem considerados são:

- seleção de sinais adicionais e minimização de sinais redundantes;
- projeto de controlador multivariável com realimentação de saídas, sendo o controlador de ordem inferior ao da planta;
- tratamento dos atrasos de tempo tanto na medição quanto na ação do controlador;
- robustez do projeto frente à perda de canais de comunicação;
- efetividade do projeto, fornecendo ao sistema elétrico ganhos reais de estabilidade que permitam uma operação mais segura e econômica.

Nesta Seção, serão discutidos os principais desafios para o projeto do controle hierárquico, destacam-se os atrasos na medição e ação de controle; projeto de um controlador com realimentação de saídas de baixa ordem ¹; e métodos para seleção de sinais e localização de pontos de medição e controle.

4.3.1 *Atrasos*

Atrasos estão presentes em diversas aplicações práticas na área de engenharia (CAMACHO; BORDONS, 2003) e diversas pesquisas são realizadas considerando esse tema. Até recentemente, na área de sistemas de energia elétrica, o atraso no processo de controle era ignorado, pois os controladores estudados eram predominantemente locais e apresentavam atrasos muito pequenos comparados com as constantes de tempo dos processos.

¹Controlador de baixa ordem refere-se a um controlador de ordem menor que a da planta.

No entanto, no caso dos controladores centralizados, a consideração dos atrasos, no momento do projeto, torna-se relevante. No âmbito deste trabalho, consideram-se os atrasos referentes ao transporte de informação no processo de medição da grandeza elétrica, realizado pela PMU, e o atraso no processo de envio da ação do controlador até a planta.

Os atrasos têm um efeito danoso ao desempenho do sistema diminuindo a sua margem de fase. Este efeito piora com o aumento do atraso no transporte do sinal. Como exemplo, considere um controlador com uma função de transferência dada por $C(s)$ projetado para estabilizar um sistema em malha aberta cuja função de transferência é $G(s)$. A função de transferência em malha aberta é representada por $C(s)G(s)e^{-Ts}$, onde T representa o atraso no processo. A resposta em frequência da fase desse sistema, considerando diferentes valores de T é apresentado na Figura 14 (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

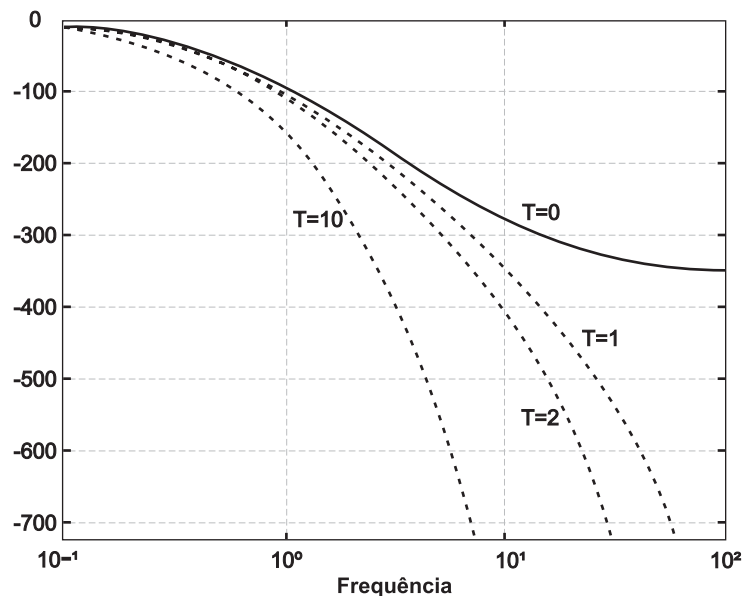


Figura 14: Margem de fase para diferentes atrasos

Observa-se, na Figura 14, a diminuição da margem de fase com o aumento de T . A diminuição da margem de fase tem um efeito direto no desempenho do controlador. Isso é mais proeminente em sistemas em que o atraso é dominante, ou seja, maior que duas vezes a constante de tempo equivalente do processo (NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007). Nos processos considerados neste trabalho, o atraso não é dominante. No entanto o interesse não é exclusivamente estabilização do sistema mas também a melhoria do seu desempenho, a partir do amortecimento fornecido pelo controle descentralizado. Dessa forma, os atrasos são um dos principais desafios a serem considerados.

4.3.2 Seleção de Sinais e Pontos de Controle e Medição

Atualmente verifica-se um aumento do número de PMUs instaladas no sistema elétrico, o que implica diretamente no volume de informações coletadas. Duas questões relevantes estão relacionadas a esse tema, a da escolha dos sinais físicos e a dos pontos de medição e controle. Com a utilização da PMUs, o número de sinais físicos tradicionalmente considerados aumenta, pois a informação do ângulo está agora disponível. Dentre os sinais coletados, alguns são produtos diretos das PMUs (ângulos, magnitudes de tensão e corrente) e outros apresentam diferentes níveis de processamento para serem obtidos (velocidade angular do gerador, potência elétrica e frequência). A escolha deverá levar em consideração a facilidade de obtenção do sinal a partir daqueles medidos pelas PMUs e a quantidade de informação com relação ao modo de oscilação a ser amortecido.

Outra questão de relevância é a escolha dos pontos de medição e controle, a qual terá impacto direto sobre o custo do sistema de transmissão de dados. Para o caso de controle central, canais dedicados deverão ser considerados devido à característica crítica do controle. Com canais dedicados, a possibilidade de congestionamento da rede diminui e conseqüentemente o atraso na transmissão dos dados. Como já mencionado, o meio físico também influencia nos atrasos. Dessa forma, canais de fibra ótica devem ser considerados. Esses canais, geralmente, têm custo elevado, o que, em determinados casos, pode inviabilizar a instalação do controle central. É necessária uma metodologia para a seleção dos pontos que trazem a maior quantidade possível de informação com um número mínimo de canais. Além disso, um certo nível de redundância deverá ser considerado, para o caso de perda de canais de comunicação.

4.3.3 Realimentação de Saídas

Entre os maiores desafios para o projeto do controle hierárquico está o projeto do controlador central. Esse controlador poderia ser facilmente projetado considerando-se as técnicas de realimentação de estados. Neste tipo de projeto todos os estados do sistema estão disponíveis e são utilizados para o projeto do controlador. No caso dos sistemas de potência nem todos os estados estão disponíveis e dada a característica de grande porte do problema (elevado número de estados) é inviável realizar a realimentação de todos eles. Dessa forma, a consideração da restrição de realimentação de saídas é de extrema importância. Uma das principais abordagens, para o tratamento dessa questão, é o de projetar controladores com realimentação de saídas considerando observadores (CHIALI; GAHINET, 1996). Nessa abordagem, uma parte dos estados é medida e os demais são estimados utilizando-se técnicas de observadores. Assim, temos uma

realimentação intrínseca dos estados que não estão sendo medidos. Para o caso de sistemas de energia elétrica, a principal restrição é relativa à alta dimensão dos controladores considerados, fato que inviabilizaria a sua aplicação prática.

Dada a alta dimensão das plantas consideradas, o projeto do controlador central tem que considerar a restrição de realimentação de saídas juntamente com a síntese de controladores de baixa ordem. Neste trabalho, a denominação controladores de baixa ordem é relativa à classe dos controladores de ordem menor que a da planta. Esse problema é considerado como um dos maiores desafios da teoria de controle. Um interessante trabalho, para melhor compreender as definições e os desafios matemáticos de problemas de controle, é apresentado em Blondel e Tsitsiklis (2000).

No presente trabalho, busca-se explorar métodos de otimização analíticos e paramétricos para a resolução deste problema. Restrições de realimentação de saídas e controladores de baixa ordem são consideradas. Os métodos e as estratégias, para resolver tal problema, considerando essas restrições, são discutidos, em detalhes, no Capítulo 6.

4.4 Modelo do Sistema

Nesta seção é apresentado o modelo geral do sistema de potência e os demais modelos que necessitam ser representados no projeto do controle hierárquico. A descrição dessa modelagem é organizada em subseções como segue.

4.4.1 *Modelo do Sistema de Potência*

O sistema de potência é descrito por um conjunto de equações algébrico-diferenciais, as quais descrevem os geradores, as cargas e os FACTS conectados em uma rede:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (4.3)$$

onde \mathbf{x} é o vetor de estados, \mathbf{z} é o vetor das variáveis algébricas, \mathbf{u} é o vetor de entrada, \mathbf{y} é o vetor de saída e \mathbf{f} , \mathbf{g} , \mathbf{h} são as funções não lineares. Um modelo linearizado pode ser obtido e sendo representado por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_1 \mathbf{x} + \mathbf{J}_2 \mathbf{z} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{J}_3 \mathbf{x} + \mathbf{J}_4 \mathbf{z} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{z} \quad (4.6)$$

onde \mathbf{B} é a matriz de entrada, \mathbf{u} é o vetor das variáveis de entrada, $[\mathbf{C}_1 \ \mathbf{C}_2]$ é a matriz de saída e \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 e \mathbf{J}_4 são sub-matrizes da matriz jacobiana do sistema.

As variáveis algébricas \mathbf{z} podem ser eliminadas, e o sistema de potência pode ser representado por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (4.8)$$

4.4.2 Estrutura do Controle

A estrutura de controle centralizada ²é descrita por uma matriz de funções de transferência representado por:

$$\mathbf{PSS}(s) = \begin{bmatrix} pss_{11}(s) & \dots & pss_{1l}(s) \\ pss_{21}(s) & \dots & pss_{2l}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ pss_{m1}(s) & \dots & pss_{ml}(s) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

onde l é o número de entradas e m é o número de saídas. A realização do controlador no espaço de estados é representada por:

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{u}_c \quad (4.10)$$

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \quad (4.11)$$

onde \mathbf{x}_c é o vetor de estados do controlador, \mathbf{u}_c é o vetor dos sinais estabilizantes, \mathbf{y}_c é o vetor das saídas do controlador.

²Essa modelagem pode também ser utilizada para o controle descentralizado

4.4.3 Atrasos

O uso de medição fasorial implica na transmissão dos sinais remotos adquiridos pelas unidades de medição fasorial para o controlador central e a transmissão do sinal de controle para os atuadores remotos. Esses atrasos devem ser incorporados ao modelo do sistema elétrico.

$$G_{TD}(s) = e^{-sT} \quad (4.12)$$

onde T é o atraso.

Tratando-se de sistemas lineares, o atraso pode ser modelado pela aproximação de Padé. Usualmente, a aproximação de primeira ordem é dada pela seguinte função de transferência:

$$R_{P1}(s) = \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s} \quad (4.13)$$

Essa aproximação apresenta uma resposta na frequência adequada, no entanto, esse tipo de representação apresenta um degrau em $t = 0$, devido ao mesmo grau do numerador e do denominador da função de transferência. Dessa forma, em $t = 0$, o modelo apresentará um sinal de resposta o que considerando sistema em atraso é indesejável. Em uma modelagem fiel este sinal só deveria aparecer com o respectivo atraso a ser considerado.

Em Vajta (2005), foi apresentada uma proposta de modelagem que tem como objetivo manter a boa resposta em frequência da modelagem de Padé, melhorando a resposta temporal em $t = 0$. O autor destaca que, com o aumento do grau da função de transferência, melhor é a representação do atraso. Como desvantagem, haverá um conseqüente aumento na dimensão do sistema devido ao número de estados inseridos pelo alto grau do polinômio característico. Neste trabalho, uma solução de compromisso, entre o número de estados e a fidelidade do modelo, foi empregada. Para tanto, utilizou-se uma aproximação de segunda ordem, para melhorar o desempenho da função de primeira ordem e não introduzir um elevado número de estados quando incorporado à planta. A Figura 15 mostra a resposta ao degrau das duas aproximações de segunda ordem sugeridas em Vajta (2005) e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Funções de Transferência das Aproximações de Padé

$R_{1,2}(s)$	$R_{2,2}(s)$
$\frac{6-2Ts}{6+4Ts+(sT)^2}$	$\frac{12-6Ts+(sT)^2}{12-6Ts+(sT)^2}$

Observando-se a Figura 15, nota-se uma nítida melhora na resposta temporal, quando considera-se a função de transferência $R_{1,2}(s)$. Essa foi, então, a função escolhida para re-

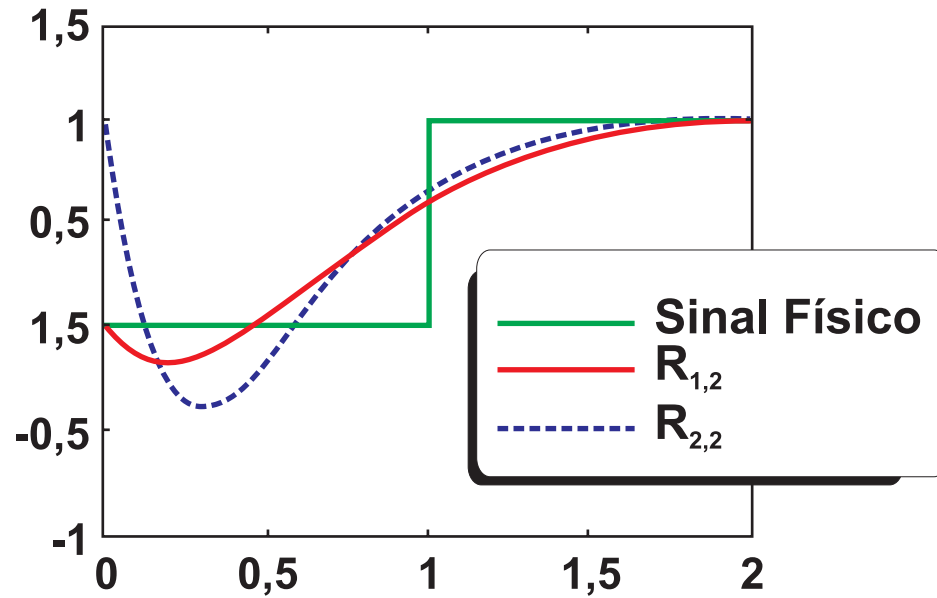


Figura 15: Resposta no tempo das aproximações de Padé (VAJTA, 2005)

presentar o atraso neste trabalho. A representação dessa função de transferência, no espaço de estados, é dada por:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_d \quad (4.14)$$

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{D}_d \mathbf{u}_d \quad (4.15)$$

onde \mathbf{x}_d é o vetor de estados do atraso, \mathbf{u}_d é o vetor de entrada, \mathbf{y}_d é o vetor de saída e as matrizes \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d e \mathbf{C}_d são as realizações, na forma observável, dada por (6.16)-(6.21).

Como já mencionado a dinâmica dos atrasos precisa ser incorporada à representação do sistema elétrico no espaço de estados. Os atrasos, no envio do sinal de controle para o sistema elétrico podem ser incluídos, usando-se (4.7)-(4.8) e (4.14)-(4.15). Assim, as matrizes do sistema são agora dadas por:

$$\mathbf{A}_{in} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}\mathbf{C}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_d \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{in} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{D}_d \\ \mathbf{B}_d \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{C}_{in} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}] \quad (4.17)$$

O atraso, no processo de medição e transmissão, poderá ser incluído usando-se (4.14)-(4.15) levando para uma nova definição das matrizes do sistema (4.7)-(4.8):

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{in} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_d \mathbf{C}_{in} & \mathbf{A}_d \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{in} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{D}_d \mathbf{C}_{in} \quad \mathbf{C}_d] \quad (4.19)$$

Destaca-se aqui a facilidade para a consideração de atrasos de diferentes valores, bastando para isso variar o parâmetro T definido na Tabela 1. Pode-se também considerar, dependendo o caso, diferentes atrasos para os sinais de entrada ou saída e até mesmo atrasos diferentes para cada canal de transmissão.

4.5 Conclusões

Neste Capítulo, apresentou-se o esquema de controle explorado neste trabalho. O objetivo principal do controle hierárquico é o de melhorar o desempenho dinâmico do sistema elétrico considerando sinais de medição fasorial sincronizadas. Os principais desafios desse projeto são, respectivamente, a seleção de sinais e pontos de medição e controle; e os atrasos e o projeto de um controlador de realimentação de saídas de baixa ordem.

A modelagem dos elementos relevantes, no projeto do controlador hierárquico, já foram considerados. Dessa forma, apresentou-se a modelagem do sistema elétrico, dos controladores e dos atrasos envolvidos no processo. Nos próximos capítulos, serão apresentados os métodos aplicados para o projeto do controle hierárquico. A primeira questão a ser abordada está relacionada à escolha dos sinais e pontos de controle e medição. Os métodos aplicados, para a solução dessa questão, serão apresentados no próximo Capítulo.

5 SELEÇÃO DE SINAIS E PONTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

5.1 Introdução

A estrutura de controle proposta no presente trabalho exige a determinação da localização dos atuadores e sensores no sistema a ser controlado. Devido à característica de grande porte do sistema elétrico e do número de PMUs instaladas, métodos precisam ser estudados para esse fim. Como exemplo da dimensão dos SPMS instalados no mundo hoje, cita-se o caso do sistema elétrico americano, que, neste ano, já conta com mais de 200 PMUs instaladas e em operação (PHADKE, 2008).

O presente Capítulo tratará do problema do posicionamento e da seleção de sinais provenientes de sistema de medição fasorial sincronizada. Determinar os pontos de medição e controle e os sinais que trazem a maior quantidade de informação possível a respeito de um determinado modo de oscilação é o objetivo central das técnicas a serem apresentadas neste Capítulo. Essa questão é importante dado o volume de informação envolvido e o impacto no custo de instalação e operação dos canais dedicados de fibra ótica.

Nesse sentido, apresenta-se neste Capítulo o algoritmo de alocação de PMUs desenvolvido por Marini (2005). O método é alterado para o problema do controle central e a consideração de controladores de mínima redundância usando índices modais de controlabilidade e observabilidade.

Adicionalmente à seleção dos pontos, destaca-se o elevado número de medidas que podem ser utilizadas como sinais adicionais no controlador central. Sinais de ângulo são um produto direto da medição fasorial e uma opção alternativa aos sinais de velocidade angular e de potência elétrica. Estes últimos são tradicionalmente utilizados nos controles locais. Métodos para determinar quais desses sinais apresentam maior observabilidade e/ou controlabilidade a um determinado modo de oscilação será, também, assunto deste Capítulo.

5.2 Alocação de PMUs para o Controle Centralizado

A pesquisa relacionada à alocação de PMUs acompanha o desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial (BALDWIN et al., 1993),(BEGOVIĆ; PHADKE, 1990). Devido ao custo do equipamento, no início das primeiras instalações de PMUs, no sistema elétrico, as pesquisas

estavam direcionadas a selecionar as barras candidatas a receber esse equipamento. Naquele momento o interesse principal era o de escolher os pontos ótimos de alocação de PMUs, limitando o número de unidades a serem instaladas no sistema. Para tanto, um critério de alocação deve ser pré-especificado de acordo com a aplicação alvo: estimação de estados, controle da estabilidade transitória, monitoração de modos de oscilação etc. Após a definição do critério, buscava-se maximizar a quantidade de informações adquiridas com o conjunto de medidas obtidas (KAMWA; GRONDIN, 2002),(MARINI, 2005).

Atualmente, com a crescente evolução da tecnologia de medição fasorial, constata-se um aumento no número de PMUs instaladas no sistema elétrico. Isso se deve principalmente à facilidade de incorporação dessa funcionalidade em dispositivos de proteção (relés digitais) e registradores digitais de perturbação. Com a evolução dos micro-processadores e o conseqüente aumento na capacidade de processamento, esses elementos podem facilmente desempenhar outras funcionalidades e a sua funcionalidade-fim. A função de PMU vem sendo então inserida nesses equipamentos e comercializada como sendo uma vantagem adicional do equipamento. Dessa forma, além dos tradicionais equipamentos de PMU instalados na rede, tem-se, ainda, uma série de outros dispositivos que podem realizar essa função. Com o passar do tempo e a conseqüente compra e/ou substituição de velhos equipamentos, um grande número de PMUs estarão instaladas no sistema com capacidade de enviar dados ao centro de controle. O volume de informações disponíveis em termos de sinais físicos e pontos de medição é agora elevado, mudando o paradigma existente no passado. Assim, são necessários métodos para filtragem das informações relevantes para a aplicação considerada. Felizmente, os métodos de seleção baseados em otimização, propostos no passado, podem ser agora utilizados, bastando somente, modificar sua função objetivo.

Especificamente, no caso do controle central, o interesse é o de amortecer modos de oscilações inter-áreas. Esses modos são causados por oscilações entre grandes grupos de geradores e têm efeitos em todo o sistema elétrico. Essas oscilações envolvem geradores de uma área oscilando contra geradores de outra área. Os modos de oscilação inter-área envolvem oscilações de todos os geradores no sistema. No entanto, há geradores ou barras em que esses modos podem ser melhor controlados e observados do que em outras barras. Os pontos de melhor controle e observação são os candidatos naturais a participar do controle central. A seleção dessas barras é de extrema importância econômica, pois tem impacto direto na instalação de canais dedicados para transmissão dessa informação ao controle central.

5.2.1 Sinais Adicionais

Os sinais adicionais são aqueles utilizados como sinais de entrada para os dispositivos que tem por objetivo melhorar o amortecimento do sistema elétrico (PSSs e FACTS). Os SPMS disponibilizam diferentes tipos de grandezas elétricas que podem ser utilizadas como sinais adicionais pelo controle central. O objetivo principal desta Seção é o de discutir os principais sinais adicionais utilizados na indústria, além da síntese desses, a partir de dados de medição fasorial sincronizada.

Na literatura, os principais sinais usados na entrada dos PSSs são (KUNDUR et al., 2004):

- velocidade angular do eixo;
- potência elétrica;
- potência de aceleração;
- frequência terminal.

A velocidade angular vem sendo utilizada com sucesso para a estabilização de oscilações em unidades hidráulicas desde a década de sessenta (KUNDUR et al., 2004), tendo como principal desvantagem estar associada aos efeitos degradantes causados por oscilações torcionais. Este efeito é especialmente importante quando consideram-se unidades térmicas devido à complexa estrutura mecânica do eixo do rotor. Esta estrutura consiste de diferentes massas como as seções da turbina, rotor do gerador, acoplamentos e excitação da máquina síncrona. Para evitar problemas com modos torsionais, filtros são instalados para este fim. Apesar de ser o sinal mais citado na literatura como sinal de entrada para o controle central, o sinal de velocidade não é um produto direto da medição fasorial sincronizada. No entanto ele pode ser estimado a partir da medição terminal de corrente e tensão do gerador. Dado o interesse pela estimação desse sinal a partir de dados terminais da máquinas, trabalhos vêm sendo desenvolvidos nesse sentido (ANGEL et al., 2007; HU; SUN Y., 2005) e um produto comercial capaz de realizar tal tarefa já está disponível no mercado (CIGRE, 2007; GRONDIN et al., 2003).

O sinal de frequência vem sendo utilizado como sinal estabilizante em várias aplicações. Como no caso dos PSSs, baseados em velocidade, filtros para os modos torsionais são necessários quando utilizados em turbinas térmicas (KUNDUR, 1994). A grande vantagem do sinal de frequência quando comparado com o sinal de velocidade, é a sua sensibilidade a oscilações do rotor. Essa sensibilidade aumenta, quando a interligação com o sistema de transmissão torna-se mais fraca (aumento da reatância série). Assim, com o sinal derivado da frequência,

fica mais fácil de se ajustar o ganho do estabilizador para condições de interligações fracas (LARSEN; SWANN, 1981), nessas condições, o PSS tem sua atuação ressaltada.

O sinal de potência elétrica é menos afetado pelos modos torcionais e elimina a necessidade de grandes avanços de fase exigidos pelo sinal de velocidade. Dessa forma, ele geralmente necessita de um único estágio de atraso de fase e o filtro para modos torcionais, necessário ao sinal de velocidade pode ser eliminado. Entre as desvantagens do sinal de potência elétrica, destacam-se as condições de operação em subfrequência. Nesse caso, há elevação rápida de geração devido a atuação dos reguladores de velocidade e conseqüentemente uma redução no nível de tensão do sistema. A variação rápida de potência pode, devido à realimentação negativa do sinal de potência elétrica, reduzir, ainda mais, a tensão produzindo então um efeito desestabilizante. Do ponto de vista da medição fasorial, esse sinal pode ser facilmente estimado a partir dos fasores de tensão e corrente do sistema.

O uso de sinais baseados na potência acelerante são mais vantajosos que os derivados da velocidade e potência elétrica, principalmente por não exigirem funções de avanço de fase. Com relação ao sinal de velocidade, ele apresenta as vantagens do uso da potência elétrica. Comparando-o com o sinal de potência elétrica, a potência acelerante apresenta como vantagem o uso da informação da potência mecânica, o que reduz os problemas relacionados a tomadas de carga relatados anteriormente (SILVA; SIMÕES-COSTA, 2004). A medição direta do sinal de potência mecânica é difícil. No entanto, ela pode ser sintetizada a partir do sinal de velocidade angular e potência elétrica. Dessa forma, a estimativa desse sinal é mais trabalhosa quando comparada aos demais, podendo inclusive introduzir atrasos no processo de medição.

No âmbito deste trabalho, são considerados três sinais para a avaliação de sua aplicabilidade para o controle centralizado. O primeiro consiste no sinal de velocidade angular, que foi escolhido por ser o mais empregado quando se considera o projeto do controle hierárquico e pode ser estimado por meio das correntes e tensões terminais da máquina. O sinal de potência elétrica é escolhido por ser facilmente calculado, usando-se sinais de PMU, e por ser fisicamente diferente do sinal de velocidade. Como terceiro sinal a ser investigado, optou-se pelo sinal de ângulo de barra. Esse não foi utilizado como sinal estabilizante, dada a dificuldade de obtê-lo no passado. Atualmente, este sinal é um produto direto da medição fasorial e merece uma investigação com relação a sua aplicabilidade no controle centralizado. Apesar de suas inúmeras vantagens, os sinais de frequência e potência acelerante foram preteridos neste trabalho. O sinal de frequência apresenta propriedades semelhantes ao sinal de velocidade angular e ângulo, que já serão avaliados. A potência acelerante é resultado da combinação dos sinais de velocidade angular de potência elétrica, já considerados no escopo da avaliação.

5.3 Seleção de Pontos de Medição e Controle

Nesta Seção, um algoritmo, para seleção de pontos de medição e controle baseado em índices de observabilidade e controlabilidade, é apresentado. O método foi inicialmente apresentado em (KAMWA; GRONDIN, 2002), onde foi aplicado para a resolução do problema de alocação de PMUs baseado na resposta dinâmica do sistema. Simulações no tempo são realizadas, e os dados são coletados para a formação de uma matriz de informação que é o ponto de partida para as análises de observabilidade e controlabilidade. Uma extensão desse método é apresentada em (MARINI, 2005) para a melhoria da estabilidade angular a pequenas perturbações. Esse método também foi utilizado para o problema de alocação de PMUs, porém, diferentemente do proposto por (KAMWA; GRONDIN, 2002), o método de (MARINI, 2005) é baseado na análise modal do sistema. Como o método foi pouco explorado, o objetivo neste trabalho é testá-lo em aplicações de controle para sistemas elétricos de potência.

O problema de otimização pode ter duas funções objetivo:

- maximização do conteúdo de informação a partir de um conjunto sinais;
- minimização da redundância da informação contida em um conjunto de PMUs candidatas.

Considerando o sistema linear descrito pelas equações (4.7)-(4.8) e a transformação de similaridade, representada pela matriz \mathbf{T} , onde $\mathbf{x} = \mathbf{T}\mathbf{x}_t$ e \mathbf{T} é a matrix dos autovalores à direita da matriz \mathbf{A} , o sistema linear pode ser redefinido como segue:

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{B}_t \mathbf{u} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_t \mathbf{x}_t \quad (5.2)$$

onde \mathbf{A}_t é uma matriz diagonal composta pelo autovalores de \mathbf{A} , e as matrizes \mathbf{B}_t e \mathbf{C}_t são as matrizes de controlabilidade e observabilidade do sistema. Assim sendo, cada estado do sistema é associado a um modo, e as matrizes \mathbf{B}_t e \mathbf{C}_t correspondem, respectivamente, às contribuições, de cada modo, à entrada e saída do sistema.

Define-se o vetor $\mathbf{z}_i = [\bar{c}_{m1} \dots \bar{c}_{mk}]$, onde $\bar{c}_{m1} \dots \bar{c}_{mk}$ são os índices de observabilidade e controlabilidade, extraídos de \mathbf{C}_t ou \mathbf{B}_t , respectivamente, e relacionados com os modos de interesse $\lambda_1, \dots, \lambda_k$, como o vetor associado ao sinal medido na barra i . Os vetores \mathbf{z}_i , obtidos dos índices de observabilidade e controlabilidade, são usados para construir a matrix \mathbf{Z}_B , onde cada coluna

da matriz é representada por \mathbf{z}_i^T . A matrix \mathbf{Z}_B é composta pelos índices de observabilidade e controlabilidade do sistema e é chamada de matrix de informação ¹.

Para medir o conteúdo da matriz de informação \mathbf{Z}_B , um índice de medição da quantidade de informação será utilizado. O índice de quantidade de informação (**QI**), dado por $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_B)$, é definido pela Equação (5.3):

$$\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_B) = \det(\mathbf{Z}_B^T \mathbf{Z}_B)^{1/n_b} \quad (5.3)$$

onde

$$\mathbf{Z}_B^T \mathbf{Z}_B = \begin{bmatrix} z_1 z_1^T & \dots & z_1 z_n^T \\ z_2 z_1^T & \dots & z_2 z_n^T \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_n z_1^T & \dots & z_n z_n^T \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

O índice **QI** é utilizado porque apresenta uma interpretação interessante com relação à matrix de informação \mathbf{Z}_B . Os elementos diagonais crescem com o conteúdo modal dos modos de oscilação de interesse (HENICHE; KAMWA, 2002). Os elementos fora da diagonal $\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_j$ diminuem quando os vetores \mathbf{z}_i e \mathbf{z}_j , referentes às barras i e j , tendem à ortogonalidade. Com a diminuição dos elementos fora da diagonal o determinante $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_B)$ aumenta, aumentando assim a magnitude do índice **QI**.

A utilização desse índice é uma medida direta do conteúdo modal e correlação entre barras. Um algoritmo baseado em otimização voráz (*Greedy Optimization*), detalhado em Kamwa e Grondin (2002), pode ser utilizado juntamente com o índice **QI**, para maximizar ou minimizar o conteúdo de informação de um sistema. A aplicação desse algoritmo para o problema da alocação de PMUs foi intensamente explorado no trabalho de Marini (2005).

No presente trabalho, o objetivo é avaliar a efetividade desse algoritmo para a sua aplicação na seleção de pontos de medição e controle para o controle central. Duas abordagens podem ser consideradas para essa questão. A primeira é a de selecionar um número máximo de pontos, que apresentam as melhores condições de observabilidade e controlabilidade, a partir de um conjunto de barras candidatas \mathbf{B}_C . A segunda abordagem é a de encontrar o controlador que apresente a configuração mínima para o sistema especificado (mínima redundância). Esse controlador de configuração mínima não considera canais redundantes e deve apresentar desempenho semelhante ao controlador que considera todos os pontos de medição candidatos. A difi-

¹Para cada caso observabilidade ou controlabilidade, calcula-se uma matriz de informação específica para esse fim.

culdade dessa abordagem é selecionar a tolerância mínima ε que representa essa configuração. O valor dessa tolerância é baseado no valor do índice **QI**, denotado por $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_B)$. Com a adição de uma determinada barra, no conjunto considerado, o índice aproxima-se de zero quando a nova barra traz informações redundantes às pertencentes ao conjunto inicial. Esse controlador não é interesse prático, pois, em caso de falha de canais de comunicação, o seu desempenho estará comprometido. No entanto, considera-se um teste relevante para a capacidade do método. O algoritmo utilizado em (MARINI, 2005) foi alterado e é apresentado na próxima Seção.

5.3.1 Algoritmo de Seleção de Barras

O objetivo principal do algoritmo é o selecionar as barras (pontos) com melhor capacidade de observação e controle para um modo de oscilação especificado. Deseja-se maximizar a informação medida a partir de um conjunto de barras candidatas. Os principais passos desse algoritmo são apresentados como segue:

Tabela 2: Glossário - Seleção de Pontos

B_C : Conjunto de barras candidatas	Z_{BC} : Matrix de Informação
η_{\max} : Número máximo de pontos	$\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_{BC})$: Índice QI
η_c : Número de barras candidatas	l : Iteração corrente
z_l : Índice de observabilidade/controlabilidade	n_l : Número de barras na iteração
ε : Tolerância especificada (determinante próximo de zero)	

Algoritmo:

1. Definir o conjunto de barras candidatas, $\mathbf{B}_C = \{\mathbf{B}_{C1}\mathbf{B}_{C2}\dots\mathbf{B}_{Cn}\}$;
2. Escolher o número máximo de PMUs a serem selecionadas $\eta_{\max} < \eta_c$. Para o caso de configuração mínima, selecionar o conjunto de pontos que atendam à tolerância ε especificada;
3. Entre as barras selecionadas, escolher a que apresenta o melhor índice de observabilidade/controlabilidade;
4. Faça $\eta_l = 0$
5. Enquanto $\eta_l < \eta_{\max}$, para o caso de configuração mínima $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_{BC}) < \varepsilon$;
 - a. Para $l = 1, 2, \dots, \eta_{\max}$;
 - b. Construir a matriz de informação, $\mathbf{Z}_{BC} = \{\mathbf{z}_1\mathbf{z}_2\dots\mathbf{z}_l\}$;

- c. Medir o conteúdo da informação usando o índice **QI**, dado por $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_{\mathbf{Bc}}) = \det(\mathbf{Z}_{\mathbf{B}}^T \mathbf{Z}_{\mathbf{B}})^{1/n_b}$;
6. Entre os índices calculados, escolha o que apresenta maior valor $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_{\mathbf{Bc}})$. A barra que apresentar o maior valor de $\mathfrak{S}(\mathbf{Z}_{\mathbf{Bc}})$ é selecionada e retirada do conjunto inicial;
7. Os η_{\max} pontos selecionados representam a solução do problema. Para o caso de configuração mínima, os η pontos selecionados que atendem à tolerância mínima ε são a solução do problema;

Como apresentado, esse algoritmo é baseado na análise modal. A principal crítica aos métodos baseados em análise modal é que tais métodos não são eficientes quando sinais de diferentes magnitudes e significados físicos são considerados no processo de seleção (ZHANG; BOSE, 2008). Para contornar esse problema, um algoritmo baseado em medidas geométricas foi implementado para avaliação de quais sinais podem ser utilizados no controle central. Esse algoritmo pode ser utilizado em conjunto com o apresentado nesta Seção, verificando-se, em um conjunto de sinais, quais apresentam a melhor observabilidade e controlabilidade de um modo de oscilação especificado. Esse algoritmo é apresentado na Seção 5.4.

5.4 Seleção de Sinais Físicos

A maioria dos métodos para selecionar a localização e os sinais estabilizantes para PSS e FACTS são baseados na análise de controlabilidade e observabilidade (MARTINS; LIMA, 1990; ZHANG et al., 1998). Esses métodos são derivados da teoria linear de controle modal e calculam medidas baseadas nos resíduos dos autovalores. A limitação desses métodos está no fato de que somente podem ser aplicados para sinais de mesmo tipo. Essa abordagem apresenta um problema de escala quando se compara sinais de diferentes significados físicos, como potência (MW), frequência (Hz), velocidade gerador (rad/s) e ângulo (rad) (KAMWA et al., 2001). Para contornar essa deficiência, o método usado em Heniche e Kamwa (2002), baseado em medidas geométricas modais, é o mais adequado para comparar sinais de diferentes significados físicos com respeito a um determinado modo (ZHANG; BOSE, 2008).

A razão principal para a aplicação desse método, no âmbito do presente trabalho, é a sua utilização para a avaliação dos sinais adicionais aplicados ao controle centralizado. Como já comentado, o método das medidas geométricas pode também ser utilizado como uma camada de seleção de sinais para o método de seleção de pontos de medição e controle.

Considerando o sistema linear representado em (4.7)-(4.8) e supondo-se que a matriz **A** com **n** autovalores distintos ($\lambda_k, k = 1, \dots, n$) e as matrizes correspondente aos autovetores à di-

reita e à esquerda, dados por T and Ψ . As medidas geométricas de controlabilidade \mathbf{m}_{ci} e observabilidade \mathbf{m}_{oj} , associadas aos modo k são (HENICHE; KAMWA, 2002):

$$\mathbf{m}_{ci}(\mathbf{k}) = \cos(\alpha(\Psi_k, b_i)) = \frac{|b_i^T \Psi_k|}{\|\Psi_k\| \|b_i\|} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{m}_{oj}(\mathbf{k}) = \cos(\theta(T_k, c_j)) = \frac{|c_j T_k|}{\|T_k\| \|c_j\|} \quad (5.6)$$

com b_i a i th coluna da matrix de entrada \mathbf{B} (correspondente a i th entrada) e c_j a j th linha da matriz de saída \mathbf{C} (correspondente a j th saída) e $|z|$ e $\|z\|$ são o módulo e a norma Euclidiana de z , respectivamente; $\alpha(\Psi_k, b_i)$ é o ângulo geométrico entre o vetor de entrada i e o k th autovetor à esquerda, enquanto $\theta(T_k, c_j)$ é o ângulo geométrico entre o vetor de saída j e o k th autovetor à direita.

Geometricamente, a observabilidade pode ser interpretada como o cosseno do ângulo entre os vetores c_j^T e T_k . Se o cosseno desse ângulo é próximo de zero, c_j^T e T_k , são praticamente ortogonais o que indica uma baixa observabilidade do modo em questão. Essa interpretação também pode ser usada para a controlabilidade.

Portanto, quanto maior a abertura angular entre os vetores, melhor será a observabilidade e/ou controlabilidade do modo de oscilação especificado. O princípio geral do método é indicar quanto o n -ésimo modo do sistema é observado ou controlado a partir das saídas e entradas especificadas no sistema.

A idéia geral desse procedimento é selecionar um grupo de sinais de mesma magnitude, que apresentem boa observabilidade comparada a outros sinais de diferentes significados físicos. Após a seleção dos sinais, um algoritmo de minimização da redundância de informação, baseado em análise modal, pode ser aplicado para a seleção dos locais de medição e controle apresentados na Seção anterior.

5.5 Conclusões

O objetivo principal deste Capítulo é apresentar os métodos utilizados para a análise de sinais físicos e seleção de pontos de medição e controle utilizados neste trabalho. Com o aumento do número de PMUs instaladas no sistema e o conseqüente aumento no número de sinais coletados, métodos são necessários para filtrar a informação relevante fornecida pelo sistema de medição fasorial sincronizada. Da revisão bibliográfica realizada, três sinais foram apontados como candidatos à participação no controle central. Os sinais escolhidos são o de velocidade

angular, ângulo de barra e potência elétrica. A escolha foi principalmente baseada na facilidade de obtenção do sinal a partir do sistema de medição fasorial.

Um método para seleção de pontos de medição e controle baseado na proposta de Marini (2005) foi apresentado. O objetivo principal da aplicação desse método, neste trabalho, é o de usá-lo em conjunto com os métodos de projeto aqui implementados. Quando se consideram sinais de diferentes magnitudes e significados físicos, não se recomenda o uso de métodos baseados em análise modal. Para contornar essa dificuldade, um método baseado em medidas geométricas proposto por Heniche e Kamwa (2002) é apresentado. Esse método pode ser utilizado em conjunto com o de análise modal para auxiliar na escolha dos sinais físicos que participarão do controle central. Neste trabalho, ele é usado para avaliar os sinais físicos adicionais escolhidos para o projeto do controle central. Os métodos utilizados para o projeto do controlador central serão apresentados no próximo Capítulo.

6 METODOLOGIAS DE PROJETO

6.1 Introdução

O presente Capítulo tratará dos métodos de projeto considerados neste trabalho. O principal desafio é o de projetar controladores com realimentação de saídas para sistemas de grande porte, incorporando atrasos no momento do projeto. Foram consideradas duas linhas de investigação com métodos de otimização analíticos e paramétricos. O método analítico aplicado é o método do controle ótimo baseado na solução da equação de Riccati. Como métodos paramétricos utilizam-se os métodos de otimização por busca direta e gradiente amostrado. Dada a natureza de grande porte dos sistemas, métodos de redução de ordem são utilizados em conjunto com os métodos de projeto.

O Capítulo inicia com uma descrição dos principais métodos de projeto encontrados na literatura e que podem ser aplicados para o projeto do controle hierárquico. Métodos de redução de ordem, utilizados neste trabalho, serão descritos e, logo em seguida, o método do controle ótimo será apresentado, além de a sua aplicação para o problema do projeto do controle centralizado. Na sequência, os métodos de otimização paramétrica utilizados serão apresentados. Esses métodos são apropriados para o tratamento de funções não-suaves e não-convexas.

6.2 Análise de Métodos de Projeto

A partir da década de 80, após os avanços da teoria de controle, ficou claro que alguns problemas são difíceis de se resolver na prática e, muito provavelmente, de difícil resolução formal. Entre os desafios citados em Blondel e Tsitsiklis (2000), destaca-se o considerado neste trabalho, que consiste em projetar controladores onde a ordem do controlador é fixada como sendo menor que a ordem da planta.

O caso limite dessa questão são os controladores de ordem zero, conhecidos como realimentação estáticas de saídas. Nesse caso, dadas as matrizes **A**, **B** e **C** do sistema linear apresentado em (4.7)-(4.8), procura-se determinar um ganho **K** tal que o sistema em malha fechada (**A** + **BKC**) seja estável. Apesar das numerosas contribuições, desde o começo da década de 60, uma resposta satisfatória para esse problema ainda não foi encontrada (BLONDEL; TSITSIKLIS, 2000). Esse problema é várias vezes citado como um dos problemas em aberto na teoria de sistemas de controle (BLONDEL et al., 1995). Adicionalmente, apesar de várias tentativas, não está claro

se esse problema é NP-hard ¹.

Dada a importância prática do problema de realimentação de saídas, diferentes abordagens vem sendo utilizadas para tratá-lo. Considerando métodos analíticos, a primeira abordagem é baseada na resolução da equação algébrica de Riccati, que esteve muito em voga até o surgimento das LMIs. As LMIs foram popularizadas na década de 90, sendo aplicadas nas mais diferentes áreas da engenharia. Nas LMIs, um conjunto de equações lineares de igualdade e desigualdade são resolvidas por meio do método de otimização de pontos interiores. A grande vantagem dessa abordagem é a obtenção de um controle que assegura o ótimo global para o sistema. Para a utilização desse método, o sistema e suas restrições precisam ser modelados por equações lineares afins. Uma outra exigência, referente ao algoritmo de pontos interiores, é a de que o problema seja convexo.

Para o caso das LMIs, essa é a principal barreira para a sua aplicação para o caso do controlador com realimentação de saídas de baixa ordem, já que para esse problema não apresenta uma formulação convexa. Nos últimos anos, os esforços realizados foram no sentido de encontrar uma formulação convexa para esse problema, para então aplicar o método baseado em LMIs.

Em Scherer (1995), Scherer (1999), Scherer (2000), controladores são desenvolvidos para sistemas de ordem completa. O problema é reduzido para LMIs considerando a teoria de estabilidade de Lyapunov e as matrizes de parâmetros do controlador. A desvantagem dessa abordagem é a presença das variáveis de Lyapunov que crescem quadraticamente com o tamanho do sistema. A consequência é que os tradicionais BMI (*Bilinear Matrix Inequalities*) e LMI "solvers" sucumbem quando a planta é de alta ordem. Esse é especificamente o caso dos sistemas elétricos.

Para contornar esse problema, novas linhas de investigação vêm sendo propostas na literatura. Essas novas abordagens apresentam uma linha de investigação alternativa. Com as LMIs, a consideração da convexidade do problema é algo fundamental para a aplicação do método. As pesquisas estavam direcionadas a buscar soluções para tornar o problema de realimentação de saídas, que naturalmente é não-convexo, em um problema convexo. Nas novas linhas de investigação, procura-se não alterar a não-convexidade do problema, e, sim, tratá-lo como tal. Dessa forma, métodos de otimização que tratem de problemas não-convexos são considerados. Entre essas linhas, destacam-se os métodos de otimização de busca direta, que são melhor conhecidos por técnicas de otimização sem o uso explícito de derivadas. Os métodos de busca direta foram formalmente propostos e largamente aplicados na década de 60. Entretanto, a par-

¹Problema cuja solução se obtém em tempo polinomial.

tir da década de 70, foram abandonados pela comunidade científica tendo em vista a falta de ferramentas de análise matemática. Apesar disso, alguns pesquisadores continuaram a utilizar esses métodos por serem fáceis de programar e alguns deles bastante confiáveis. Na última década, esses métodos foram retomados, em parte pelo surgimento de melhores métodos de análise matemática, além do interesse de uso em algoritmos preparados para computação paralela e distribuída (KOLDA et al., 2003).

Burke et al. (2002) propõem uma alternativa aos métodos de busca direta para a otimização de funções não-suaves e não-convexas. Esse novo algoritmo, chamado de gradiente amostrado ou *gradient sampling*, utiliza a informação de gradientes "amostrados" próximos à iteração atual para definir a sua direção de busca. Esse método é projetado para tratar funções não-convexas e não-suaves e pode ser utilizado em conjunto com outros algoritmos para melhorar o seu desempenho computacional (método híbrido). Esses algoritmos não garantem ótimo global como no caso das LMIs, no entanto, são capazes de encontrar ótimos locais que satisfazem os requisitos de projeto do controlador objeto deste trabalho.

Como comentado no Capítulo 3, vários métodos são propostos na literatura e podem ser considerados para o projeto de controlador hierárquico. Do ponto de vista do problema de otimização os métodos apresentados no Capítulo 3, podem ser classificados como métodos analíticos ou paramétricos. Entende-se como métodos analíticos, aqueles baseados na otimização de uma equação fechada, seja ela a equação de Riccati, ou de Lyapunov (BOYD et al., 1994). Métodos de projeto baseados em LMIs e de controle ótimo (LQR) são considerados métodos analíticos porque sua solução depende da resolução de uma equação formulada para o problema. Os métodos paramétricos são aqueles formulados para a otimização de um determinado índice ou norma explícita. Podem ser considerados índices e/ou normas de desempenho das mais variadas naturezas. Entre estes métodos citam-se a maximização do amortecimento, minimização da norma H_∞ e a minimização da parte real dos autovalores.

Destaca-se que na literatura a classificação dos métodos em analíticos ou paramétricos não é clara (BOYD et al., 1994) (WHIDBORNE et al., 1996) (KAMWA et al., 2000). Alguns autores classificam como métodos analíticos somente aqueles que são previsíveis quanto ao esforço computacional e número de iterações necessárias para encontrar a solução. Desta forma, métodos baseados em controle ótimo e LMIs não poderiam ser classificados como analíticos, pois o esforço computacional e o número de iterações exigido, para sistemas de alta ordem é de difícil previsão (BOYD et al., 1994). Kamwa et al. (2000) classificam o método de controle ótimo como sendo de otimização paramétrica, pois a sua solução está condicionada ao encontro de uma matrix de ganhos que minimize a equação de Riccati. Em Whidborne et al. (1996), os auto-

res definem métodos de otimização analítica como aqueles que não tem um índice explícito de desempenho em malha fechada. Métodos de otimização paramétrica são definidos como aqueles que apresentam um índice explícitos de desempenho em malha fechada (WHIDBORNE et al., 1996). A consideração de índices de desempenho explícitos facilita a otimização de vários critérios em um único problema de otimização, permitindo assim a consideração de problemas multi-objetivo. Whidborne et al. (1996) definem, como otimização paramétrica, algoritmos que considerem problemas multi-objetivo.

Embora a classificação desses métodos não esteja de forma clara na literatura, neste trabalho, a classificação de Whidborne et al. (1996) será utilizada. São considerados métodos analíticos aqueles baseados na solução de uma equação fechada, e métodos paramétricos aqueles baseados na otimização de um índice explícito. Como exemplos de métodos analíticos, citam-se o do controle ótimo e das LMIs. Como otimização paramétrica, pode-se citar os algoritmos evolucionários, preditivo e métodos de otimização por busca direta e dos gradientes amostrados.

Como método analítico escolheu-se o método de controle ótimo baseado na resolução da equação generalizada de Riccati. A principal vantagem desse método é permitir o projeto de controladores de baixa ordem com realimentação de saídas. Destaca-se, também, que esse método não havia sido aplicado para a resolução do problema do controle hierárquico, sendo necessária a investigação do seu potencial de aplicação.

Os métodos paramétricos escolhidos para aplicação neste trabalho são os métodos de busca direta e do gradiente amostrado (*gradient sampling*). Esses métodos apresentam os requisitos necessários para esse projeto e, adicionalmente, haviam sido pouco explorados na área de controle de sistemas elétricos. A capacidade de tratar problemas de otimização não-suaves e não-convexos, como o caso do projeto do controle central, são uma indicação da sua potencialidade de aplicação. Um destaque especial é dado ao método do gradiente amostrado que ainda não foi aplicado ao projeto de controladores na área de sistemas de energia elétrica. Deseja-se também contribuir para a apresentação deste método. Outros métodos paramétricos, como os métodos evolucionários e o controle preditivo, podem ser utilizados. Esses métodos são largamente explorados na literatura e devido ao tempo de consecução desta tese, eles não farão parte deste estudo.

Devido à característica de grande porte dos problemas na área de sistemas de energia elétrica, métodos de redução de ordem necessitam ser aplicados em conjunto com os métodos de projeto. Dessa forma, são apresentados os métodos de redução de ordem usados neste trabalho. O Capítulo segue, então, com a apresentação do método analítico utilizado. Finalizando o

Capítulo, apresentam-se os métodos paramétricos.

6.3 Métodos de Redução de Ordem

Tratando-se de problemas de grande porte, como o caso dos sistemas elétricos, o uso de métodos de redução de ordem que capturem as dinâmicas essenciais do sistema se fazem necessários. No caso do controle centralizado, o objetivo principal é o amortecimento de modos de oscilação inter-área. Isso se dá principalmente pela capacidade de observabilidade e controlabilidade desses modos pelo controle central (ZHANG; BOSE, 2008). Para o projeto desse controlador, um modelo de ordem reduzida do sistema, que captura as dinâmicas essenciais associadas a esses modos, facilita a aplicação deste método de projeto. Para ambos os métodos a grande vantagem é a melhoria do processo de convergência. Especificamente para o caso do projeto usando controle ótimo, destaca-se a facilidade para a escolha das matrizes de peso, dada a diminuição no número dos estados considerados.

Neste trabalho, aplicou-se o método de redução de ordem para o projeto do controlador hierárquico, o método utilizado é baseado no balanceamento modal apresentado em Moore (1981). A abordagem proposta em Moore (1981) é baseada na representação do sistema permitindo a identificação dos estados fracamente acoplados com as entradas e saídas do sistema.

Estados fracamente acoplados são entendidos como aqueles que dificilmente podem ser controlados ou observados a partir dos pontos de entrada e saída do sistema em questão. Como estes estados são dificilmente controlados ou observados, eles podem ser descartados para a obtenção do modelo de ordem reduzida, que captura as características do sistema original do ponto de vista de entradas e saídas.

Para os métodos de projeto considerados neste trabalho, a escolha do método de redução de ordem não tem a mesma importância, como para o caso de projeto via LMIs. Nas LMIs, o método de redução de ordem é parte essencial do projeto, pois a ordem do controlador obtida dependerá diretamente da ordem da planta.

Neste trabalho utiliza-se redução de ordem em conjunto com todos os métodos de projeto explorados. No entanto, o seu uso é restrito à melhoria do processo de convergência do método de projeto considerado e não está atrelado à ordem do controlador a ser projetado. Desta forma, utiliza-se o método de redução baseado em balanceamento modal onde somente os estados pouco controláveis ou observáveis do ponto de vista das entradas e saídas do sistema são retidos.

Para o caso específico, considera-se o modelo linear invariante no tempo do sistema elétrico:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}\end{aligned}\quad (6.1)$$

com os gramianos de controlabilidade e observabilidade, dados respectivamente por \mathbf{W}_c e \mathbf{W}_o . Sendo a transformação de similaridade dada por $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{T}\mathbf{x}$, onde \mathbf{T} é a matriz de transformação, resulta em um modelo equivalente, dado por:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{\mathbf{x}}} &= \mathbf{TAT}^{-1}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{TBu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{CT}^{-1}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{Du}\end{aligned}\quad (6.2)$$

onde os gramianos de controlabilidade e observabilidade são dados, respectivamente por:

$$\bar{\mathbf{W}}_c = \mathbf{T}\mathbf{W}_c\mathbf{T}^t \quad (6.3)$$

$$\bar{\mathbf{W}}_o = \mathbf{T}^{-t}\mathbf{W}_o\mathbf{T}^{-1} \quad (6.4)$$

O objetivo principal do método é encontrar uma transformação de similaridade que iguale os gramianos de observabilidade (\mathbf{W}_o) e controlabilidade (\mathbf{W}_c), tal que $\bar{\mathbf{W}}_c = \bar{\mathbf{W}}_o = \mathbf{diag}(\mathbf{g})$, onde o vetor \mathbf{g} contém a quantidade de energia de cada estado, do ponto de vista de entrada e saída. Um algoritmo que calcula a transformação balanceada no espaço de estados é usado para determinar a matriz \mathbf{T} . Esse algoritmo é baseado no cálculo dos fatores de Cholesky, sendo apresentado em detalhes em Laub et al. (1987).

Com a informação da quantidade de energia correspondente de cada estado armazenada do vetor \mathbf{g} , deve-se estabelecer um critério para seleção, separando-se os estados em dois grupos distintos. Os estados com maior energia são separados e armazenados em um vetor \mathbf{x}_1 e os estados com menor energia e que devem ser eliminados são representados pelo vetor \mathbf{x}_2 . Assim, o sistema linear é dividido em duas partes, como apresentado abaixo.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{Du} \quad (6.6)$$

Como a energia dos estados representados em \mathbf{x}_2 é baixa, a derivada de \mathbf{x}_2 é considerada zero. A equação resultante é manipulada de tal forma que o vetor \mathbf{x}_2 possa ser escrito em função

de \mathbf{x}_1 . Substituindo-se essa equação do sistema linear acima, tem-se, como resultado, o sistema de ordem reduzida, representado por:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = [\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{22}^{-1}\mathbf{A}_{21}]\mathbf{x}_1 + [\mathbf{B}_1 - \mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{22}^{-1}\mathbf{B}_2]\mathbf{u} \quad (6.7)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2\mathbf{A}_{22}^{-1}\mathbf{A}_{21}]\mathbf{x}_1 + [\mathbf{D} - \mathbf{C}_2\mathbf{A}_{22}^{-1}\mathbf{B}_2]\mathbf{u} \quad (6.8)$$

Para os casos específicos que apresentam modos com baixo amortecimento fracamente acoplados do ponto de vista de entradas e saídas, são utilizados métodos que evitam o balanceamento modal. Neste trabalho, o método apresentado em Sanchez-Gasca e Chow (1996) foi também implementado para contornar esse problema.

6.4 Método de Otimização Analítico

Nesta Seção, apresenta-se o método analítico escolhido para a aplicação para o projeto do controle hierárquico. Esse método é baseado na solução da equação generalizada de Riccati. O método de controle ótimo é descrito como segue:

6.4.1 Método do Controle Ótimo Considerando Restrições Estruturais

As ferramentas disponíveis na "Teoria de Controle Ótimo" aplicadas a sistemas de grande porte, apresentam vantagens, dada a sua capacidade de tratar o problema de forma global. Levando-se em consideração as interações dinâmicas, gera-se um projeto de natureza coordenada, cuja solução é ótima no sentido de minimizar um determinado índice de desempenho ou função-custo. Se o índice é do tipo quadrático nos estados e nos controles, o problema de Controle Ótimo é chamado de Problema do Regulador Linear Quadrático, (PRLQ) tratado amplamente na literatura (PENA, 1992), (FREITAS, 1995), (SIMÕES-COSTA et al., 1997), (DOTTA et al., 2007).

A justificativa de por que o PRLQ é de ampla utilização, deriva do fato de reduzir o problema do projeto à escolha das matrizes de peso \mathbf{Q} e \mathbf{R} que permitem definir o índice de desempenho. A escolha dessas matrizes nem sempre é simples, mas, como apresentado em Pena (1992), as informações disponíveis do modelo e as características desejáveis quanto ao desempenho dinâmico são de grande ajuda em sua determinação. O processo de redução de ordem também auxilia na escolha dessas matrizes de peso. Neste caso, como o sistema é reduzido ficam evidenciados quais os estados devem ser ponderados com o objetivo de melhorar o amor-

tecimento do sistema.

O método foi originalmente apresentado em Geromel (1987) e foi aplicado para o projeto de estabilizadores locais de sistemas de potência em Freitas (1995), Simões-Costa et al. (1997). A aplicação desse método, para o controle centralizado é parte deste trabalho sendo objeto da publicação apresentada em Dotta et al. (2007). Esse método tem como vantagem principal a capacidade de considerar restrições práticas que podem inviabilizar a execução do projeto, como, por exemplo, realimentação de saídas e descentralização. Além disso, permite que o controlador seja projetado com realimentação dinâmica, isto é, representado por uma matriz de funções de transferência dada por (4.9). O sistema a ser controlado é apresentado na próxima Seção.

6.4.1.1 Configuração do Controle

O controle a ser projetado foi apresentado em (4.9), em que a função de transferência $pss_{ij}(s)$ considerada é de segunda ordem. Entretanto, funções de ordens mais elevadas ou realimentação estática poderiam ter sido utilizadas. A estrutura das funções de transferência é dada por:

$$pss_{ij}(s) = K_c \frac{1 + bs + as^2}{1 + cs + ds^2} \quad (6.9)$$

Essa estrutura permite pólos e zeros reais e complexos. Para a aplicação do método, a equação (4.9) precisa estar na forma canônica observável (PENA, 1992). A realização observável utilizada é descrita em Patel e Munro (1982). A matriz $\mathbf{PSS}(s)$ pode ser escrita como:

$$\mathbf{PSS}(s) = \mathbf{G}_{pss} + \mathbf{D}_{pss} \quad (6.10)$$

onde \mathbf{G}_{pss} é estritamente própria e \mathbf{D}_{pss} é uma matriz constante. Dado que as entradas de \mathbf{G}_{pss} sejam dados por:

$$g_{ij}(s) = \frac{h_{ij}(s)}{d_i(s)} \quad (6.11)$$

onde $d_i(s)$ e $h_{ij}(s)$ são dados por

$$d_i(s) = s^{r_i} + a_{r_i}^i s^{r_i-1} + \dots + a_0^1 \quad (6.12)$$

$$h_{ij}(s) = h_{r_i-1}^{ij} s^{r_i-1} + h_{r_i-2}^{ij} s^{r_i-2} + \dots + h_0^{ij} \quad (6.13)$$

com $i = 1 \dots m$ e $j = 1 \dots l$.

A realização observável do controlador no espaço de estados é representada por:

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{u}_c \quad (6.14)$$

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \quad (6.15)$$

onde \mathbf{x}_c é o vetor de estados do controlador, \mathbf{u}_c é o vetor dos sinais estabilizantes, \mathbf{y}_c é o vetor das saídas do controlador e as matrizes \mathbf{A}_c , \mathbf{B}_c e \mathbf{C}_c são dadas por:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_l \end{bmatrix}, \quad (6.16)$$

onde

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0^i \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1^i \\ 0 & 1 & \dots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -a_{r_i-2}^i \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{r_i-1}^i \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

para $i = 1 \dots l$,

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_l \end{bmatrix}, \quad (6.18)$$

onde

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} h_0^{i1} & h_0^{i2} & \dots & h_0^{im} \\ h_1^{i1} & h_1^{i2} & \dots & h_1^{im} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{r_i-1}^{i1} & \dots & \dots & h_{r_i-1}^{im} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

para $i = 1 \dots l$,

$$\mathbf{C}_c = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2 \quad \dots \quad \mathbf{C}_l], \quad (6.20)$$

onde

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & e_i \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

para $i = 1 \dots l$, e e_i é a i^{th} coluna da matrix identidade \mathbf{I}_l .

Como descrito em Pena (1992) a vantagem de se utilizar a forma canônica observável é que, se os pólos das sub-matrizes de (4.9) são fixados, então as matrizes \mathbf{A}_c e \mathbf{C}_c são conhecidas, facilitando a aplicação do método. Essa forma é conveniente para a aplicação em métodos de projeto de controladores.

6.4.1.2 O sistema controlado

Para a aplicação desse método, é necessária a transformação de um problema de realimentação dinâmica de saídas em um problema de realimentação estática de saídas. Isso pode ser feito usando um sistema aumentado, o qual incorpora a dinâmica do controlador (PENA, 1992),(FREITAS, 1995).

Usando (4.7)-(4.8) para representar o sistema de potência, e incluindo-se a dinâmica dos compensadores dados por (6.14)-(6.15), o sistema em malha fechada pode ser representado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{D}_c\bar{\mathbf{C}} & \bar{\mathbf{B}}\mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c\bar{\mathbf{C}} & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Definindo-se as matrizes

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} & \bar{\mathbf{B}}\mathbf{C}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{B}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_a = [\bar{\mathbf{C}} \ \mathbf{0}] \quad \mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_c \\ -\mathbf{B}_c \end{bmatrix}$$

e o vetor de estados aumentado $\mathbf{x}_a = [\mathbf{x}^T, \mathbf{x}_c^T]^T$, um sistema aumentado pode ser definido por

$$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a + \mathbf{B}_a \mathbf{u}_a \quad (6.23)$$

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a \quad (6.24)$$

e o sistema a ser controlado considerado em (6.22) corresponde ao sistema aumentado representado por (6.23)-(6.24), com realimentação de saídas $\mathbf{u}_a = -\mathbf{G}_a \mathbf{y}_a$ ou $\mathbf{u}_a = -\mathbf{G}_a \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a$.

Se a forma canônica de observabilidade é usada para representar o controlador em (6.14)-(6.15) e se os pólos do PSSs são fixados, as matrizes \mathbf{A}_a , \mathbf{B}_a e \mathbf{C}_a são conhecidas. As matrizes \mathbf{D}_c e \mathbf{B}_c , correspondentes aos ganhos e zeros dos PSSs, devem ser determinadas a partir dos ganhos estáticos. Assim, o problema da dinâmica do compensador se reduz a um problema de realimentação estática de saídas.

A realimentação dinâmica fornece uma maior liberdade ao projetista já que, além do ganho, pode-se configurar os pólos e zeros do controlador. Nesse método, a estrutura das funções de transferência que compõem o controlador podem também ser de primeira ou de segunda ordem. Adicionalmente, o método permite, com facilidade, a incorporação de atrasos no projeto, como detalhado em 4.4.3.

6.4.1.3 Descrição do Método

O objetivo principal do método é a determinação do ganho estático \mathbf{G}_a . No caso em específico, o problema deve ser resolvido considerando-se restrições estruturais de saída como apresentado em (GEROMEL, 1987). Formula-se, então, um problema que consiste em determinar uma estratégia de controle que minimiza um índice quadrático de desempenho (Regulador Linear Quadrático - LQR):

$$J(\mathbf{x}_a, \mathbf{u}_a) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}_a^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_a + \mathbf{u}_a^T \mathbf{R} \mathbf{u}_a) dt \quad (6.25)$$

onde uma matriz positiva semi-definida \mathbf{Q} (estados) e uma matriz positiva definida \mathbf{R} (controle) são as matrizes de peso. Destaca-se aqui que o índice quadrático de desempenho não é um índice explícito do desempenho e depende fortemente da definição das matrizes de peso. Destaca-se também que não há garantias de que haja uma melhora efetiva do amortecimento dos modos, pois o método não tem por objetivo maximizar um índice específico e sim um funcional representado pela equação 6.25.

A matriz de realimentação de estados é apresentada em (6.26), na qual restrições como realimentação de saídas podem ser incluídas.

$$\mathbf{F}(\mathbf{K}) = \mathbf{0} \quad (6.26)$$

Para realimentação de saídas, a equação (6.26) é dada por (SIMÕES-COSTA et al., 1997)

$$\mathbf{F}(\mathbf{K}) = \mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{C}_a^T (\mathbf{C}_a \mathbf{C}_a^T)^{-1} \mathbf{C}_a) = \mathbf{0} \quad (6.27)$$

e a matrix de ganhos constantes \mathbf{G}_a é dada por

$$\mathbf{G}_a = \mathbf{K}\mathbf{C}_a^T(\mathbf{C}_a\mathbf{C}_a^T)^{-1}\mathbf{C}_a \quad (6.28)$$

A solução do problema de controle ótimo com restrições estruturais de realimentação de saídas é obtida por meio de *Equação Generalizada de Riccati* (GEROMEL, 1987):

$$\mathbf{A}_a^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_a - \mathbf{P}\mathbf{B}_a\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_a^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} + \mathbf{L}^T\mathbf{R}\mathbf{L} = \mathbf{0} \quad (6.29)$$

onde \mathbf{L} é a matriz usada para incluir a restrição de realimentação de saídas. A imposição de restrições estruturais desvia a solução do ponto ótimo global encontrado considerando-se a formulação irrestrita.

O algoritmo generalizado, para a solução do problema de controle ótimo, com restrições de realimentação de saída, é apresentado em Geromel (1987), e reproduzido a seguir.

Algoritmo de Solução:

1. Faça $i = 0$ e $\mathbf{P}_i \geq 0$, onde $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}^*$ é a solução da equação convencional de Riccati, e $\mathbf{L}_0 = 0$;
2. Determine $\mathbf{L}_{i+1} = \mathbf{F}(\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_a^T\mathbf{P}_i)$ com \mathbf{F} definido de acordo com as restrições consideradas;
3. Defina $\mathbf{Q}_{i+1} = \mathbf{Q}_i + \mathbf{L}_{i+1}^T\mathbf{R}\mathbf{L}_{i+1}$ e resolve-se seguinte equação de Riccati:

$$\mathbf{A}_a^T\mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{P}_{i+1}\mathbf{A}_a - \mathbf{P}_{i+1}\mathbf{B}_a\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_a^T\mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{Q}_{i+1} = \mathbf{0}$$

4. Se $\|\mathbf{L}_{i+1} - \mathbf{L}_i\|_e \leq \varepsilon$, para $\varepsilon \leq 0$ é suficiente pequeno, vá para o passo 5; senão faça $i = i + 1$ e vá para o passo 2;
5. Determine o ganho \mathbf{K} por

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}_a^T\mathbf{P}_i - \mathbf{L}_{i+1}$$

então, a matrix \mathbf{G}_a pode ser determinada por (6.28).

O resultado desse algoritmo é usado para determinar a matrix de ganhos de realimentação de saídas \mathbf{G}_a . Os parâmetros desconhecidos de $\mathbf{PSS}(s)$ são os elementos das matrizes \mathbf{B}_c e \mathbf{D}_c . Essas matrizes são determinadas usando:

$$\mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_c \\ -\mathbf{B}_c \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

Em Simões-Costa et al. (1997), mostra-se que a esparsidade das matrizes que representam o sistema elétrico pode ser explorada nesse algoritmo usando-se as equações de Chandrasehkar. Portanto, o método pode ser aplicado a grandes sistemas de potência. O algoritmo apresentado não tem garantia de convergência, que depende fortemente da configuração das matrizes de desempenho, da magnitude dos atrasos e do tamanho do sistema-alvo.

Os esquemas de controle descentralizado e centralizado do controle hierárquico pode ser projetado usando controle ótimo com restrições estruturais. Neste trabalho, ele é aplicado, para o controle centralizado, considerando-se valores típicos de sistema no controle descentralizado.

Para o projeto do nível centralizado, os controladores descentralizados são incorporados às equações que descrevem o sistema. A configuração do controle descentralizado procura reproduzir as condições operativas do sistema com ajustes padrões baseadas em método de projeto SISO (*Single Input Single Output*). Não se tem por objetivo aqui realizar o projeto do controle descentralizado de forma coordenada pois este ajuste não reflete os ajustes realizados em campo.

6.4.2 Aplicação do método de controle ótimo para o projeto do controle hierárquico

Os níveis descentralizado e centralizado do controle hierárquico podem ser projetados usando controle ótimo com restrições estruturais. Neste trabalho, o método de projeto é somente aplicado ao controle central. No entanto o método pode ser usado também para o projeto do controle descentralizado como descrito em (PENA, 1992).

O índice quadrático de desempenho da equação 6.25 penaliza os desvios dos estados do sistema e a entrada do sistema de excitação (esforço de controle)², pelas matrizes de peso **Q** e **R**, respectivamente. Com a penalização dos desvios dos estados, tem-se como objetivo aumentar o amortecimento dos autovalores do sistema e com a penalização do esforço de controle limitar a saída dos atuadores.

Esse método de controle exige que alguns parâmetros, como matrizes de peso e pólos do controlador, sejam especificados:

- Matrizes de peso: a matriz de pesos relacionada aos estados do sistema restringe a variação deles e objetivando melhorar o amortecimento do sistema. Ponderando-se fortemente os estados associados a modos de oscilação de baixo amortecimento, aumenta-se o

²Entende-se como esforço de controle como a energia total aplicada pelos atuadores para controlar um determinado sistema.

amortecimento do sistema. Neste trabalho, os *mode shapes*, que apresentam a associação das variáveis de estado com os modos de oscilação, são usados para determinar os estados a serem ponderados para o amortecimento dos modos de oscilação. Os estados com forte associação com um determinado modo são fortemente ponderados melhorando então o amortecimento do modo. Essa matriz é diagonal, com os estados associados aos modos de oscilação pouco amortecidos e fortemente ponderados. A matriz relacionada ao esforço de controle é diagonal. Neste trabalho, especificamente a matriz referente ao esforço de controle não necessitou de forte ponderação.

- Pólos do controlador: a escolha dos pólos do controlador afeta a convergência do algoritmo. Os pólos foram escolhidos por tentativas e erro durante o processo de projeto. Pólos reais e distantes do eixo imaginário foram os que apresentaram os melhores resultados.

Os principais passos para a aplicação deste método são apresentados como segue:

1. incorporação dos atrasos às equações do sistema;
2. redução de ordem;
3. escolha dos parâmetros de projeto (**Q**, **R** e pólos do controlador);
4. aplicação do algoritmo para a obtenção do ganho **K**;
5. cálculo da matrix de ganhos G_a
6. os parâmetros da função de transferência são calculados usando (6.30).

6.5 Métodos de Otimização Paramétricos

Os métodos paramétricos são caracterizados por problemas de otimização de índices explícitos de desempenho. Esse índices podem ser utilizados separadamente ou combinados para formar problemas de otimização multi-objetivo. Problemas de otimização baseados em matrizes de peso, como o caso do controle ótimo, podem ser muito sensíveis à escolha dessas matrizes (KAMWA et al., 2000), tanto em termos de convergência como no tempo necessário a escolha dos termos corretos a serem ponderados. Com a escolha de um índice explícito, esse problema é eliminado, pois tem-se como objetivo minimizar somente o índice escolhido. Desconsiderando métodos evolucionários, há poucos trabalhos relacionados à aplicação de métodos de

otimização paramétrica na área de controle de sistemas elétricos. Kamwa et al. (2000) aplicam otimização paramétrica, para o projeto de controladores robustos considerando diferentes pontos de operação. Como função objetivo, deseja-se maximizar um índice baseado no amortecimento do sistema. Simo et al. (1996) utilizam um algoritmo baseado em otimização paramétrica para o projeto de um PSS multi-banda. Como método de solução, os autores utilizam o método de Quase-Newton.

Nesta Seção, são apresentados dois métodos paramétricos para o projeto do controle hierárquico, são eles: método de busca direta e do gradiente amostrado (*gradient sampling*). Esses métodos otimizam índices explícitos de desempenho e podem ser utilizados para a solução de problemas não-suaves e não-convexos como o projeto de controladores de baixa ordem, com restrição de realimentação de saída. A principal diferença entre os mesmos é com relação à direção de procura. Os métodos diretos são conhecidos com sendo de ordem zero, pois não usam a informação da derivada no seu processo de convergência. Já, o método do gradiente amostrado utiliza a informação da derivada calculada na vizinhança da iteração atual, sendo então um método de primeira ordem. No entanto, essa informação não é usada diretamente, e sim após um processo de cálculo de um gradiente resultante, a partir dos gradientes amostrados.

Esses métodos foram pouco explorados, na literatura, para aplicações de controle de sistema elétricos de potência. Neste trabalho, eles são aplicados ao projeto do controle hierárquico para a exploração de seu potencial. Os métodos são apresentados, em detalhes, nas próximas Seções, precedidos por uma breve revisão da teoria de sistema lineares visando a facilitar a compreensão dos métodos descritos.

6.5.1 Conceitos Básicos e Formulação do Problema

Nesta Seção, é apresentada a formulação do problema utilizado para o projeto de controlador de baixa ordem com restrição de realimentação de saídas. A Seção inicia-se com uma apresentação de conceitos de teoria de sistema lineares e, na seqüência, os índices de desempenho utilizados na formulação do problema de otimização são apresentados.

6.5.1.1 Equações do Espaço de Estados

Todo sistema linear invariante no tempo pode ser representado por um conjunto de equações diferenciais representado por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{B}\mathbf{u}(\mathbf{t}) \\ \mathbf{y}(\mathbf{t}) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{D}\mathbf{u}(\mathbf{t})\end{aligned}\quad (6.31)$$

onde $\mathbf{x}(\mathbf{t}) \in \mathbf{R}^n$ é o vetor de estados, $\mathbf{u}(\mathbf{t}) \in \mathbf{R}^m$ é o vetor de entrada e $\mathbf{y}(\mathbf{t}) \in \mathbf{R}^p$ é o vetor de saída. Uma versão compacta frequentemente utilizada apresentando os vetores x e u em um único vetor, pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}\quad (6.32)$$

Em muitas situações, o controlador pode não estar habilitado para controlar uma subconfiguração de entradas do sistema, u , nem medir uma subconfiguração de saídas do sistema, y . Estes vetores adicionais, com termos não-controláveis e não-mensuráveis são chamados de vetor de entrada exógeno, $w(t)$; e vetor de saída exógeno, $z(t)$. Os vetores $w(t)$ e $z(t)$ representam, respectivamente, o ruído ou perturbação e as variáveis de desempenho. Esse sistema pode ser representado como:

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) = \mathbf{A}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}(\mathbf{t}) \\ \mathbf{u}(\mathbf{t}) \end{bmatrix}\quad (6.33)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}(\mathbf{t}) \\ \mathbf{y}(\mathbf{t}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(\mathbf{t}) + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}(\mathbf{t}) \\ \mathbf{u}(\mathbf{t}) \end{bmatrix}\quad (6.34)$$

Na forma compacta, colocando-se os vetores x, w e u , em um único vetor, o sistema pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{z} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{w} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}\quad (6.35)$$

onde $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ são os estados, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ é o vetor de entrada (atuadores), $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^p$ é o vetor de saída (sensores), \mathbf{w} é o vetor de entrada da perturbação e \mathbf{z} é o vetor das saídas de interesse.

6.5.1.2 Função de Transferência

Em adição à representação dada na Seção anterior, os sistemas lineares podem ser descritos por uma função de transferência que fornece uma relação entre a entrada de controle, u , e a saída do sistema, y , no domínio da frequência. Aplicando-se a transformação de Laplace ao

sistema 6.31 e assumindo $x(0) = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{sX}(s) &= \mathbf{AX}(s) + \mathbf{BU}(s) \\ \mathbf{Y}(s) &= \mathbf{CX}(s) + \mathbf{DU}(s) \end{aligned} \quad (6.36)$$

Substituindo-se a primeira equação na segunda, chega-se a:

$$\mathbf{Y}(s) = (\mathbf{D} + \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B})\mathbf{U}(s) \quad (6.37)$$

dessa forma, a função de transferência pode ser representada por:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{D} + \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (6.38)$$

ou pela seguinte notação matricial:

$$\mathbf{G}(s) = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array} \right] \quad (6.39)$$

6.5.1.3 Controle Realimentado

Com a planta modelada pela equação 6.35, o objetivo principal é projetar um controle realimentado que, a partir de sinais medidos na saída do sistema, \mathbf{y} , sintetiza uma ação de controle. A ação de controle é aplicada à planta usando o vetor de entrada \mathbf{u} . Esse processo é ilustrado na Figura 16, onde \mathbf{G} representa a planta e \mathbf{K} o controlador. Nesse método, o sistema em malha aberta da planta é conectado ao sistema em malha aberta do controlador para formar o sistema em malha fechada do sistema aumentado. O controlador é modelado em espaço de estados na forma compacta por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}} & \hat{\mathbf{B}} \\ \hat{\mathbf{C}} & \hat{\mathbf{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

onde $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^{\hat{n}}$ é o estado do controlador. Note que a entrada do controlador é a saída do sistema \mathbf{y} , e a saída do controlador é a entrada do sistema \mathbf{u} . O controlador é representado por uma matriz de funções de transferência apresentado em (4.9), onde a função de transferência $pss_{ij}(s)$ é de segunda ordem. Entretanto, funções de outras ordens ou realimentação estática podem ser utilizadas.

Nesse caso, usaremos representação por função de transferência para representar o sistema aumentado. A função que representa tal sistema é dada por:

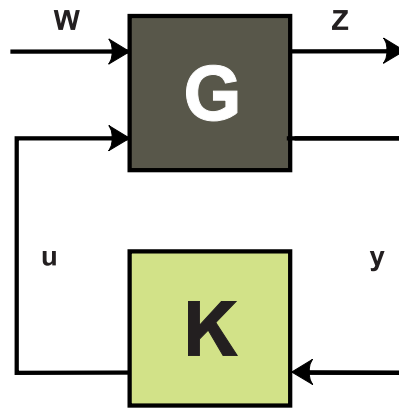


Figura 16: Sistema em Malha Fechada

$$\mathbf{K}(s) = \hat{\mathbf{D}} + \hat{\mathbf{C}}(s\mathbf{I} - \hat{\mathbf{A}})^{-1}\hat{\mathbf{B}} \quad (6.41)$$

6.5.1.4 Controle H_∞

Considerando a planta G e o controlador K representados na Figura 16 e sendo (A_k, B_k, C_k, D_k) a representação no espaço de estados do sistema em malha fechada, a função de transferência entre o sinal de entrada \mathbf{w} e o sinal de saída \mathbf{z} é dada por:

$$\mathbf{T}(s) = \mathbf{C}_K(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_K)^{-1}\mathbf{B}_K + \mathbf{D}_K \quad (6.42)$$

A norma H_∞ , para essa função, é definida pela equação

$$\|\mathbf{T}\|_\infty = \sup \bar{\sigma}(\mathbf{C}_K(j\omega - \mathbf{A}_K)^{-1}\mathbf{B}_K + \mathbf{D}_K) \quad (6.43)$$

onde $\bar{\sigma}$ denota o maior valor singular. O controlador é projetado com o objetivo de minimizar a norma H_∞ , entre os vetores de entrada (\mathbf{w}) e saída (\mathbf{z}), tendo como restrição um controlador \mathbf{K} que estabilize o sistema.

6.5.1.5 Formulação do Problema

Os métodos paramétricos são caracterizados pela otimização de índices explícitos de desempenho do sistema em malha fechada. A seleção dos índices de desempenho seguiu a referência (BURKE et al., 2006b), onde consideram-se índices como otimização da norma H_∞ ,

abscissa spectral e raio de estabilidade. No âmbito deste trabalho, definiu-se um índice adicional baseado na maximização do amortecimento do sistema. Os índices são definidos como segue:

- **Otimização da Norma H_∞ :** A norma H_∞ de um sistema pode ser entendida como sendo o maior ganho em termos de energia que esse sistema pode oferecer a um sinal de entrada. Um controlador projetado com o objetivo de minimizar a norma H_∞ considera o pior caso para uma determinada configuração entrada-saída dada pelos vetor \mathbf{w} e \mathbf{z} . Para o caso específico, o problema é de minimizar a norma H_∞ da função de transferência $\mathbf{T}(s)$ definida por 6.42.
- **Otimização da Abscissa Spectral:** A abscissa spectral de uma matriz é definida pelo maior valor da parte real dos seus autovalores e, neste trabalho, é denotado por $\alpha(A)$. O problema da minimização da abscissa spectral é de fundamental interesse para o controle pois a parte real dos autovalores da matriz A está diretamente relacionada à estabilidade do sistema linear representado por ela. O problema é, então, formulado com o objetivo de minimizar a abscissa spectral da matriz do sistema em malha fechada A_K . Isso é equivalente, a deslocar os autovalores da matriz, o mais à esquerda possível do eixo imaginário. Com o aumento da distância dos autovalores em relação ao eixo imaginário, haverá uma conseqüente melhora do desempenho dinâmico do sistema. Essa formulação pode ser utilizada para somente estabilizar o sistema. Nesse caso, quando todos os autovalores estiverem no semi-plano esquerdo do plano complexo, o algoritmo termina a sua execução. Para o caso de realimentação estática de saídas, o problema de otimização é dado por:

$$\min_{\mathbf{K} \in \mathfrak{R}} \alpha(\mathbf{A} + \mathbf{BKC}) \quad (6.44)$$

onde $\alpha(A + BKC)$ representa o autovalor com maior parte real do sistema em malha fechada.

- **Otimização do Amortecimento:** Nessa função, o objetivo é maximizar o amortecimento dos autovalores do sistema em malha fechada, denotado por $\xi(A + BKC)$. Quanto maior o amortecimento do sistema melhor será o desempenho deste. Neste trabalho, o problema é formulado como sendo de minimização e é dado por:

$$\min_{\mathbf{K} \in \mathfrak{R}} -\xi(\mathbf{A} + \mathbf{BKC}) \quad (6.45)$$

- **Otimização do Raio de Estabilidade:** O raio de estabilidade é definido pelo limite superior r tal que a estabilidade é preservada para todas as perturbações Δ de norma estrita-

mente menor que r . Na literatura, há diversas abordagens para determinar a norma r (DU; LINH, 2006). Para o caso apresentado em Burke et al. (2006b), utiliza-se a norma H_∞ da função de transferência $(\mathbf{sI} - \mathbf{A}_K)^{-1}$.

6.5.1.6 Controle Robusto

A robustez dos controladores projetados pode ser explorada juntamente com o conceito de ε – *pseudospectral* de uma matriz A , denotado por $\Lambda_\varepsilon(A)$ (BURKE et al., 2003b),(BURKE et al., 2003a). O ε – *pseudospectro* de uma matriz A é o subconjunto do plano complexo que engloba os autovalores de todas as matrizes complexas dentro de uma distância ε de A . O *pseudospectro* de uma matriz é a união dos espectros das matrizes vizinhas em um raio ε . Quando $\varepsilon = 0$, o *pseudospectro* se reduz ao espectro da matriz A .

Em Burke et al. (2003a) os autores utilizam a informação do ε – *pseudospectro* para o projeto de controladores. Duas abordagens são utilizadas para esse projeto. Na primeira é a abscissa ε – *pseudospectral*, $\alpha_\varepsilon(A)$, definida como a maior parte real de todos os elementos de um ε – *pseudospectro*, $\Lambda_\varepsilon(A)$, considerando um ε fixo. O caso $\varepsilon = 0$ coincide com a abscissa espectral da matriz (BURKE et al., 2003a). A segunda abordagem é a do raio de estabilidade, $\beta(X)$, também conhecido como distância em relação a instabilidade (módulo dos autovalores). Defini-se $\beta(X)$ igual a zero se A é instável. O valor de $\beta(X)$ aumenta proporcionalmente à distância dos autovalores em relação ao eixo imaginário.

As duas abordagens, abscissa e raio spectral, são maneiras distintas de quantificar a estabilidade de um determinado sistema. Essas definições são aplicadas juntamente com o conceito de ε – *pseudospectro* para a síntese de controladores robustos. Como o ε – *pseudospectro* define uma região no espaço vizinha à matriz A , o controle projetado tem a estabilidade garantida em toda a região. A utilização desse conceito tem uma implicação direta na robustez do controlador projetado, pois há uma garantia de desempenho em uma região de operação e não somente em um ponto específico.

O estudo de robustez usando o conceito do ε – *pseudospectral* não faz parte do presente trabalho. A descrição foi realizada no sentido de ilustrar a capacidade do método em trabalhar com o problema da robustez dos controladores.

6.5.2 Métodos de Solução

Nesta Seção, são apresentados os métodos de solução aplicados para a minimização dos índices de desempenho definidos na Seção 6.5.1.5. Duas abordagens principais são utilizadas,

a abordagem dos métodos diretos e dos gradientes amostrados. Esses dois métodos têm como principal característica a capacidade de trabalhar com funções não-suaves e não-convexas. Adicionalmente, um método híbrido, baseado no método do gradiente amostrado e que combina diferentes algoritmos é também apresentado. A descrição desses é realizada como segue.

6.5.2.1 Método de Busca Direta

Métodos de busca direta (ou procura direta), em oposição aos tradicionais métodos de otimização, são comumente chamados de métodos de otimização sem gradiente. Esses métodos não necessitam de informações do gradiente ou de derivadas de maior ordem da função objetivo para encontrar a solução ótima. Assim sendo, os métodos de busca direta podem ser utilizados para resolver problemas de otimização não-contínuos, não-diferenciáveis, com múltiplos mínimos locais.

O trabalho de Henrion (2006) procura reapresentar, de uma forma atual, a potencialidade dos métodos de busca direta para a área de controle. O objetivo do trabalho é mostrar a capacidade do método de busca direta em achar solução para o problema da estabilização de diferentes sistemas testes considerados desafio na área de controle. A estrutura de controle escolhido é a de realimentação estáticas de saídas.

A escolha do projeto por realimentação estáticas tem por objetivo aumentar a dificuldade do projeto, pois, nesse caso, não há margem de escolha para os pólos e zeros do controlador. Diferentes algoritmos são apresentados e seu desempenho é testado com os diferentes sistemas teste. Destaca-se, entretanto, que os sistemas testes utilizados são de pequeno porte, quando comparado a sistemas elétricos.

Na área de sistemas de energia, esse método vem sendo aplicado para a solução do problema do despacho econômico, que tem como objetivo central reduzir o custo total de geração, enquanto satisfaz várias restrições de igualdade e desigualdade. Na referência Chen e Chen (2001), o método de busca direta é aplicado para resolver o problema do despacho econômico considerando restrições de capacidade de transmissão. Os autores relatam que o algoritmo é uma abordagem eficiente para determinar o despacho ótimo para os geradores. No trabalho Al-Sumait et al. (2007), os autores aplicam o método para o mesmo problema, considerando agora o efeito de abertura de válvulas em máquinas térmicas. O objetivo principal do trabalho é comparar o método de busca direta com técnicas de algoritmos genéticos. Os autores relatam um número menor de iterações e a conseqüente redução do tempo computacional quando o método de busca direta é utilizado. Como desvantagem, destaca-se a alta dependência deste método das condições iniciais, fato que pode levá-lo a encontrar um mínimo local próximo à

mesma. Já as técnicas baseadas em algoritmos genéticos contornam essa dificuldade com o uso de uma população de condições iniciais. Na referência Chen (2008) o método de busca direta é aplicado para o problema de despacho econômico considerando usinas térmicas e eólicas. Métodos de busca direta foram também aplicados para a melhoria do amortecimento do sistema elétrico brasileiro como descrito em Pellanda et al. (2006). Pontos específicos do sistema são escolhidos, e o algoritmo de busca direta é aplicado para o problema do ajuste coordenado de PSSs.

Os métodos de busca direta são bem conhecidos desde a década de 50. Entretanto, no início da década de 70, esses métodos foram preteridos pela comunidade científica de matemática. Destacam-se três motivos apresentados como segue (KOLDA et al., 2003).

- os métodos são desenvolvidos heurísticamente;
- não havia prova de convergência;
- em alguns casos a taxa de convergência pode ser muito lenta.

Apesar disso, esses métodos continuaram populares entre os pesquisadores em ciências e engenharia. Em 1991, o interesse por métodos de busca direta foi reavivado com uma publicação, no contexto da computação paralela, de um método de busca direta acompanhado de análise de convergência (TORCZON, 1991). Desde então, dois aspectos foram ressaltados:

- métodos de busca direta são considerados uma opção efetiva, em alguns casos a única opção, para uma série de problemas considerados como desafios de otimização;
- para um grande número de métodos de busca direta há prova de convergência (KOLDA et al., 2003).

O princípio de funcionamento desses métodos é bastante simples. A partir de uma condição inicial, o algoritmo começa o seu processo de busca, calculando o valor da função em um raio de procura pré-determinado. Os valores da função calculados nesse raio são comparados entre si, e o ponto de menor valor é escolhido como o novo ponto de amostragem. O algoritmo segue a sua procura avaliando o valor da função em uma determinada região e tomando, como próximo passo, o ponto em que a função apresenta o menor valor. Nos casos em que não haja redução de valor na região da iteração atual, o raio de amostragem é diminuído e uma nova amostragem é realizada. Este último caso pode ser entendido como parte do processo de aproximação da

solução ótima. O processo de procura finaliza quando o raio de amostragem atinge a tolerância pré-especificada. Esse processo é apresentado em detalhes no Apêndice A.1.

Como principal vantagem desse método, destaca-se a capacidade de trabalhar com funções não-suaves e não-convexas. Como desvantagem, destaca-se o baixo desempenho computacional para a resolução de problemas de grande porte. Quando o sistema é de grande porte, a cada iteração, diversas amostragens da função objetivo precisam ser calculados e avaliados. De acordo com o tamanho do sistema e a sofisticação do método utilizado, o desempenho computacional do método pode ser prejudicado.

Neste trabalho, utiliza-se o método multi-direcional de busca, baseado em técnicas dinâmicas para o dimensionamento do raio de amostragem. Diferentemente do exposto acima o raio de amostragem pode também ser aumentado, dependendo da condição de procura. Esse método tem a vantagem adicional de ser projetado para ser resolvido de forma paralela e sua prova de convergência é apresentada em Torczon (1989). Especificamente, para o caso de sistema elétricos, essa vantagem melhoraria o desempenho computacional do método. As tarefas de cálculo do valor da função podem ser divididas em diversos processadores e realizadas de forma paralela. O detalhamento desse método é apresentado no Apêndice A.2. A implementação computacional deste método é realizada em Matlab e discutida no Apêndice A.3.

6.5.2.2 Método do Gradiente Amostrado

Funções, como a apresentada em 6.44, são não-convexas e não-suaves em determinados pontos. Dessa forma, os tradicionais algoritmos baseados em derivadas falham no tratamento desses problemas. Quando aplicados, esses algoritmos tipicamente apresentam dificuldades nos pontos de descontinuidades ou problemas no cálculo das derivadas. O estado da arte, para algoritmos de otimização, considerando-se problemas suaves e não-convexos e problemas não-suaves e convexos, é bastante avançado. Entretanto, algoritmos aplicados para problemas não-suaves e não-convexos são dificilmente encontrados na literatura. É, para essa classe de subproblemas que o algoritmo do gradiente amostrado (*gradient sampling*) dever ser aplicado. Este algoritmo tem prova de convergência como apresentado em Burke et al. (2003c).

A aplicação desse algoritmo, para problemas não-convexos, é facilmente entendida pela amostragem de vários gradientes ao longo do processo iterativo. Com a minimização pela norma-2 desse conjunto de gradientes, uma melhor direção de procura é encontrada. A amostragem de vários gradientes, em pontos no entorno de uma, região contém uma maior quantidade de informação quando comparada com o cálculo do gradiente em um só ponto. Como desvantagem, esse processo aumenta o tempo computacional devido ao maior número de amostragens

comparado com os métodos tradicionais.

Para o caso da não-suavidade, o algoritmo exige que as derivadas das funções objetivo existam e possam ser calculadas na grande parte dos pontos (BURKE et al., 2006a). A não-suavidade é contornada usando-se a informação dos pontos onde o gradiente é válido para a obtenção da direção de descida. Em casos onde a derivada não pode ser calculada ou é custosa computacionalmente, a estimação numérica da mesma pode ser realizada como apresentado em Burke et al. (2003a). Naquele trabalho, o gradiente da função 6.44 é estimado usando-se a informação dos autovetores à esquerda e à direita da matriz A . Os detalhes do algoritmo são apresentados no Apêndice B.

6.5.2.3 Método Híbrido

Com o objetivo de melhorar o desempenho computacional do método do gradiente amostrado Burke et al. (2006b) propõem um método híbrido que utiliza elementos de diversos algoritmos. Esse método é uma combinação dos algoritmo de quase-Newton, de feixes (*bundle*) e o recém desenvolvido método gradiente amostrado. Esses métodos têm em comum a capacidade de tratar funções não-suaves, porém os dois primeiros não são capazes de tratar funções não-convexas.

A metodologia proposta tem como objetivo criar um método de projeto que atenda requisitos de desempenho computacional e capacidade de solução para problemas não-convexos e não-suaves. As principais funções e características dos métodos que compõem o método híbrido são discutidos como segue.

- **Quase-Newton:** É a fase inicial do método. A motivação central dos métodos Quase-Newton é gerar uma seqüência com boas propriedades de convergência, sem, no entanto, avaliar a matriz Jacobiana a cada iteração, como é necessário no método de Newton. No Quase-Newton, uma estimativa da derivada é utilizada. Dessa forma, o algoritmo apresenta bom desempenho para problemas não-suaves e convexos. Além disso, diferentemente do método do gradiente amostrado, somente uma estimativa do gradiente é realizada por iteração;
- **Método do Feixe:** O método do feixe (*bundle*) é um algoritmo apropriado para funções convexas e não-suaves. O objetivo desse método é o de verificar a otimalidade do ponto de mínimo encontrado pelo método de Quase-Newton. O método de feixes é baseado no conceito de ε – *subdiferencial*, definido por uma configuração de subgradientes definidos em uma vizinhança da iteração atual. O mínimo encontrado pelo método de Quase-

Newton é comparado com os gradientes dessa vizinhança. Caso a condição de mínimo não seja atendida, o método passa para a fase seguinte;

- **Gradiente Amostrado:** Nessa fase, o método do gradiente amostrado discutido na Seção anterior é aplicado. Esse algoritmo é próprio para o tratamento de funções não-convexas e não-suaves. O método, então, procura uma solução ou um refinamento da solução encontrada pelos métodos anteriores.

Pelas vantagens descritas, esse método é aplicado para o projeto do controle hierárquico. A implementação computacional desse método é realizada em Matlab, utilizando o pacote HIFOO, e apresentada no Apêndice B.1. Os detalhes da aplicação do método híbrido são apresentados na próxima Seção.

6.5.3 Aplicação dos métodos paramétricos para o projeto do controle hierárquico

Nesta Seção, são apresentados os detalhes da aplicação do método de busca direta e do método híbrido para o projeto do controle hierárquico. O método híbrido inclui o método de gradiente amostrado que ainda não havia sido aplicado, no projeto de controladores, na área de sistemas elétricos.

6.5.3.1 Busca Direta

Neste trabalho, o método de busca multi-direcional é utilizado para maximizar o amortecimento dos autovalores de um determinado sistema. O objetivo é projetar um controlador central com realimentação estática de saídas. Representa-se o sistema elétrico pelo modelo matemático apresentado em (4.7) e (4.8). Os atrasos de segunda ordem são incluídos no momento de projeto como descrito na Seção 4.4.3. Nesse caso, dadas as matrizes $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in R^{n \times m}$ e $\mathbf{C} \in R^{p \times n}$, projeta-se um controlador estático de saídas $\mathbf{K} \in R^{m \times p}$. Para o caso de realimentação de saídas estáticas, os pólos do controlador não precisam ser configurados.

A função objetivo considerada é a de maximização do amortecimento dos modos de oscilação presentes no sistema, formulada como um problema de minimização dada por:

$$\min_{\mathbf{K} \in \mathfrak{R}} -\xi(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}) \quad (6.46)$$

onde $\xi(A_k)$ ³ é definido como o máximo amortecimento da matriz A_k . Outras funções objetivo

³Na fase de implementação computacional utilizando o Matlab utilizou-se a função *damp* para o cálculo do

podem ser usadas ou combinadas para formar problemas multi-objetivo. A vantagem desse método é a não-necessidade da configuração de parâmetros de desempenho. Problemas de otimização, como o caso do controle ótimo, podem ser muito sensíveis à escolha das matrizes de peso. Isso pode demandar um elevado esforço de tempo para a determinação do ajuste correto. Com a escolha de um índice explícito, esse problema é eliminado.

Os principais passos para a aplicação desse método são apresentados como segue:

1. incorporação dos atrasos às equações do sistema;
2. redução de ordem;
3. aplicação do algoritmo para a obtenção do ganho \mathbf{K} .

6.5.3.2 Método Híbrido

O método foi aplicado para o projeto do controlador central com restrição estrutural de realimentação de saídas. Para esse projeto, foram testadas todas as funções descritas em 6.5.2.3. A que apresenta melhores resultados para o problema do controle hierárquico é a da minimização da norma H_∞ . Com essa função objetivo, pode-se especificar os parâmetros de desempenho desejado. A consideração de parâmetros de desempenho é relevante para o projeto de controladores hierárquicos, pois não se está somente interessado em melhorar a estabilidade do sistema, e, sim, aumentar o seu desempenho.

Essa metodologia de projeto tem duas fases distintas:

- encontrar um controlador que estabilize o sistema; isso se realiza ao minimizar-se a parte real dos autovalores até que todos estejam posicionados no semi-plano esquerdo;
- o controlador encontrado na primeira etapa é utilizado como condição inicial para a minimização das funções objetivo descritas na Seção 6.5.1.5. Nesse caso específico, a minimização da norma H_∞ .

Nesse projeto, busca-se minimizar a norma H_∞ , entre o vetor de perturbação \mathbf{w} e a saída desejada \mathbf{z} . A norma H_∞ é representada pela função de transferência definida em (6.42). Para tanto, deve-se obter um modelo para a perturbação e para as variáveis de desempenho.

No presente trabalho, curtos-circuitos trifásicos são aplicados a determinadas barras do sistema elétrico para verificar o desempenho dinâmico no modelo não-linear. Para modelar amortecimento em malha fechada.

o vetor de perturbação \mathbf{w} , considera-se uma variação na tensão de referência do regulador da máquina onde o curto é aplicado. Como variável de interesse, escolhem-se as velocidades angulares dos geradores. Esses estados são fortemente ponderados por meio do vetor \mathbf{z} .

No caso do sistema de potência, não há termos de realimentação direta entre entrada e saída, logo $\mathbf{D}_{22} = \mathbf{0}$. Dessa forma, o sistema em malha fechada da planta $G(s)$ e do controlador $K(s)$ definidos, respectivamente, em (6.35) e (6.40), pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_K & \mathbf{B}_K \\ \mathbf{C}_K & \mathbf{D}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{A}} & \hat{\mathbf{B}} \\ \hat{\mathbf{C}} & \hat{\mathbf{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{21} \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

Os principais passos para a aplicação desse método são apresentados como segue:

1. incorporação dos atrasos às equações do sistema;
2. redução de ordem;
3. definição da perturbação e das variáveis de interesse;
4. escolha dos parâmetros de projeto (\mathbf{w} , \mathbf{z} e a ordem do controlador);
5. aplicação do algoritmo para a obtenção do ganho \mathbf{K} .

6.6 Conclusão

Neste Capítulo, foram descritos os métodos de projeto que serão usados para o projeto do controlador hierárquico. Dentre os métodos analíticos considerou-se aquele baseado na equação generalizada de Riccati. Projetos baseados em LMIs apresentam dificuldades para a solução de problemas que não apresentem uma formulação convexa. Essa dificuldade é agravada pela característica de grande porte do sistema elétrico. Adicionalmente, como comentado, esses métodos já foram extensamente explorados na literatura para o projeto do controle hierárquico.

Como métodos paramétricos, destacam-se os métodos diretos e híbridos que foram pouco explorados na área de sistema de energia elétrica. Os métodos paramétricos são formulados com o objetivo de otimizar índices de desempenho explícitos. Como métodos paramétricos, considerados citam-se os métodos diretos e o do *gradient sampling*. Este último é aplicado, em uma metodologia híbrida, em conjunto com outros dois métodos.

As pesquisas, na área do métodos de busca direta, foram retomadas nos últimos anos. Trabalhos recentes vêm ressaltando a suas vantagens e incentivando os pesquisadores a trabalhar com esses métodos. A vantagem principal desses métodos é a sua capacidade de trabalhar em condições adversas para os quais os métodos atuais de otimização não estão preparados, como não-convexidade, não-suavidade e não-continuidade. Os métodos híbridos apresentam-se como uma evolução dos métodos já existentes e com grande potencial de aplicação. Esse método foi aplicado para o projeto do controle hierárquico, e os resultados obtidos são apresentados no próximo Capítulo.

7 RESULTADOS OBTIDOS

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos analíticos e paramétricos para o projeto do controlador hierárquico. Os projetos são avaliados considerando-se dois sistemas de diferentes portes. Adicionalmente, são apresentados os resultados da aplicação dos métodos para a escolha de sinais e de pontos de medição e controle.

7.1 Método Analítico

Nesta Seção, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método do controle ótimo com restrições estruturais. O desempenho do método é avaliado com a sua aplicação em dois sistemas testes equivalentes que consideram o Sul e Sul/Sudeste do Brasil.

7.1.1 Sistema Teste Sul/Sudeste

Esse sistema de sete barras e cinco máquinas representa o modelo equivalente do sistema Sul/Sudeste brasileiro. Os geradores síncronos são representados por um modelo de quinta ordem. O regulador de tensão é representado por um modelo de primeira ordem com limitadores utilizados por todos os geradores. Esse sistema está apresentado na Figura 17, e os dados completos podem ser obtidos de Martins e Lima (1989).

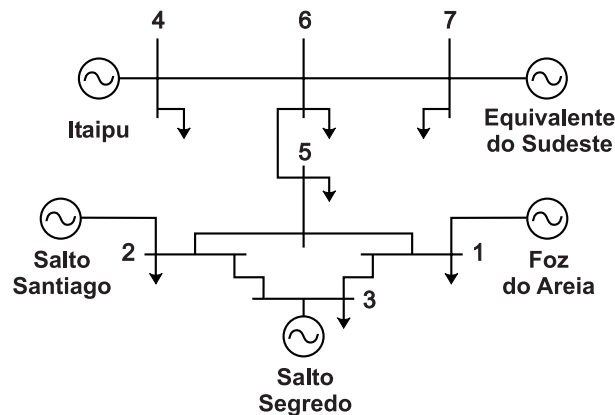


Figura 17: Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

A análise modal desse sistema foi realizada usando o Pacdyn (CEPEL, 2002). O sistema apresenta dois modos inter-área: um corresponde às oscilações entre o sistema sudeste e Itaipu (Modo 1, Tabela 3), e outro associado à oscilação do Sistema Sul (Salto Santiago, Salto Segredo e Foz de Areia) contra o sistema Sudeste e Itaipu juntos (Modo 2, Tabela 3).

Tabela 3: Modos de Oscilação Dominantes - Caso Malha Aberta

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	$0.64 \pm 5.39i$	0.86	-11.9
2	$-0.22 \pm 5.87i$	0.93	3.84

Além de o sistema ser instável, ele apresenta um problema adicional de controlabilidade. Ele é um sistema de fase não-mínima, com dois zeros complexos conjugados no semi-plano direito perto dos pólos instáveis. Como relatado em Chow et al. (2000), esse sistema somente pode ser estabilizado utilizando-se dois PSSs ou um PSS combinando sinais locais e remotos.

7.1.1.1 Projeto do Controlador e Análise de Desempenho

O controle proposto considera dois níveis. O nível do controle descentralizado é formado por quatro PSSs colocados nos quatro geradores do sistema utilizando velocidade como sinais de entrada. Como projeto inicial, os mesmos quatro geradores e os respectivos sinais de velocidade participarão do esquema de controle central. O objetivo principal desta seção é o de apresentar os principais aspectos relacionados ao projeto e a efetividade do controle central. Dessa forma, o sinal de velocidade foi escolhido por ser o mais utilizado na literatura. A discussão relacionada ao uso de diferentes sinais físicos para o projeto do controle central é apresentada na Seção 7.2. As entradas dos controladores descentralizados e centralizados são filtrados por um *wash-out* e suas saídas são limitadas em $\pm 0,2pu$.

O primeiro passo é o projeto do controle descentralizado. Esse primeiro nível deve assegurar a estabilização do sistema quando da perda do controle centralizado. Haverá uma queda no nível de amortecimento do sistema, no entanto, a estabilidade estará preservada. Para este nível poderia ser aplicado o método de controle ótimo com restrições estruturais de descentralização. No entanto, a aplicação do método exigiria um esforço coordenado de ajuste de PSSs por parte de todas as empresas que compõem o sistema. Dependendo do tamanho do sistema isso pode se tornar inviável. Considerando essa hipótese, parte-se do princípio que as empresas configuraram os seus respectivos PSSs de acordo com métodos de projeto normatizados pela concessionária. Para efeitos de simulação, o mesmo ajuste de PSSs apresentado em Martins e Lima (1989) será utilizado.

Os quatro PSSs colocados em Itaipu, Salto Segredo, Foz de Areia e Salto Santiago resultam em um sistema estável, com um modo inter-área associado a oscilações entre Itaipu e o Sistema Sudeste que é apresentado na Tabela 4. Os demais modos apresentam um amortecimento maior que 10%. O controle central é projetado, utilizando-se controle ótimo com restrições estruturais

$$\mathbf{PSS}(s) = \begin{bmatrix} \frac{+666+133s+6.6s^2}{100+20s+s^2} & \frac{578+115s+5.8s^2}{100+20s+s^2} & \frac{845+169s+8.5s^2}{100+20s+s^2} & \frac{2221+441s+22s^2}{100+20s+s^2} \\ \frac{-851-171s-8.5s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-610-122s-6s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-761-153s-7.6s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-1659-334.3s-17s^2}{100+20s+s^2} \\ \frac{-1208-242s-12s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-861-173s-8.6s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-1088-218s-11s^2}{100+20s+s^2} & \frac{-1311-265.4s-13s^2}{100+20s+s^2} \\ \frac{100+20s+s^2}{-905-182s-9s^2} & \frac{100+20s+s^2}{-317-64s-3s^2} & \frac{100+20s+s^2}{-938-188s-9.4s^2} & \frac{100+20s+s^2}{-2831-567s-28s^2} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

para aumentar o amortecimento do modo menos amortecido.

Tabela 4: Modo de Oscilação Dominante - Controle Descentralizado

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	$-0.33 \pm 5.20i$	0.82	6.39

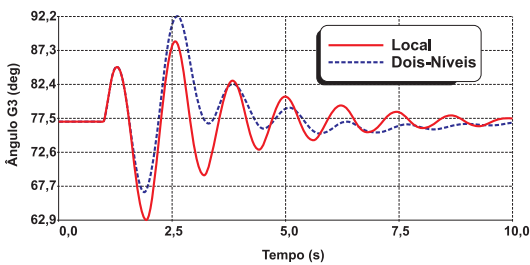
A matriz de pesos \mathbf{Q} foi escolhida como uma matriz diagonal. Uma análise usando *mode shapes* é utilizada para determinar quais estados apresentam uma maior atividade quando o modo de oscilação de menor amortecimento é excitado. Os estados selecionados são fortemente pesados em comparação com os demais, pois tem uma maior influencia no modo de oscilação alvo. Os atrasos são considerados no projeto do controle central como descrito em 4.4.3. Atrasos na ordem de $200ms$ são introduzidos na entrada e na saída da planta, resultando em um atraso total de $400ms$. A função de transferência resultante é apresentada por (7.1).

Com o controle centralizado, o amortecimento do modo inter-área aumentou, como apresentado na Tabela 5 (Modo 1), mostrando a efetividade do esquema de controle. Os outros modos permanecem com um amortecimento maior que 10%. O desempenho do controlador foi também avaliada por meio de simulações no domínio do tempo usando o software ANATEM para verificar o comportamento do controlador no sistema não-linear. Um curto circuito trifásico foi aplicado a barra 4 e retirado sem alteração no sistema. Os ângulos dos geradores 3 (Salto Segredo) e 4 (Itaipu) são apresentados, respectivamente, nas Figuras 18(a) e 18(b).

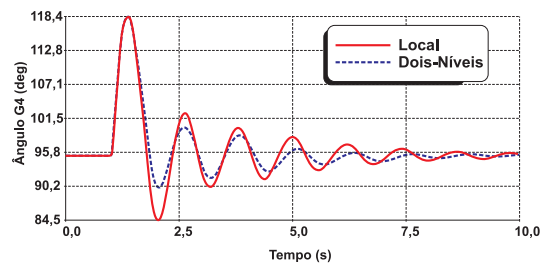
Tabela 5: Modos de Oscilação Dominante - Controle Hierárquico

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	$-0.4865 \pm 5.0i$	0.8	9.67
2	$-0.45 \pm 5.13i$	0.8	8.74
3	$-0.42 \pm 5.03i$	0.8	8.43

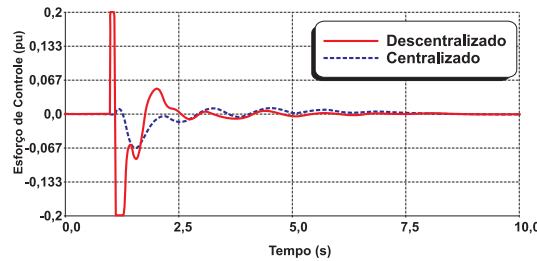
As respostas do sistema com somente o controlador local (linha sólida) e com o controle, em dois níveis (linha pontilhada) mostram que o sistema apresenta melhor comportamento dinâmico com a presença do controle central. A Figura 18(c) ilustra o comportamento do



(a) Ângulo do gerador 1 (Foz do Areia).



(b) Ângulo do Gerador 4 (Itaipu).



(c) Sinal de Controle do PSS (Itaipu).

Figura 18: Simulação no domínio do tempo.

controle local e central do gerador 4 (Itaipu), trabalhando juntos para amortecer as oscilações presentes no sistema equivalente Sul-Sudeste.

Como ilustrado na Figura 18(c), o PSS local alcança seu limite fixado em $0,2pu$. O controle central contribui para o amortecimento das oscilações sem atingir o limite, também fixado em $0,2pu$. O objetivo aqui é o de mostrar que os atuadores do controlador central não aplicam um sinal de grande magnitude, o que em determinados casos, poderia inviabilizar a sua aplicação prática. Caso os sinais do controle central apresentassem magnitudes maiores que os limites considerados ($0,2pu$), atuadores especiais deveriam ser projetados para este fim.

7.1.1.2 Efeito do Atraso no Desempenho do Controlador

O objetivo desta seção é o de mostrar o efeito do atraso no desempenho do controle hierárquico. Destaca-se aqui que os atrasos de comunicação, seja no momento da aquisição de dados, seja no envio do sinal de controle para o atuador, devem ser levados em conta no momento do projeto do controlador central. Caso contrário, o desempenho do controlador pode ser comprometido, chegando até mesmo ao ponto de prejudicar o desempenho do controle descentralizado. Para ilustrar esse problema realizou-se a simulação de três configurações de controle distintas que são apresentadas como segue:

- Somente controle descentralizado;

- Controle Hierárquico sem a consideração do atraso no momento de projeto, porém inserindo o atraso na simulação (proposto em Dotta et al. (2007));
- Controle Hierárquico com atraso no momento de projeto e simulação.

A simulação não-linear das três configurações descritas são apresentadas na Figura 19. Os atraso totais considerados são de 400ms.

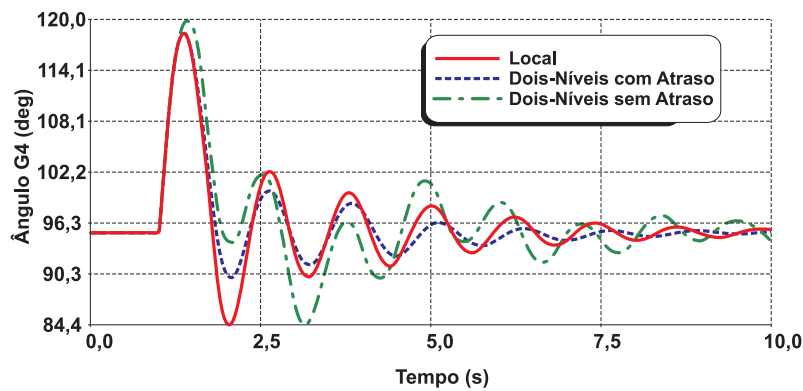


Figura 19: Degradação do Desempenho do Controlador.

Como pode-se verificar, o desempenho do controlador hierárquico, considerando atraso no momento do projeto (linha tracejada), melhora o desempenho do controle descentralizado (linha sólida). Com o controle hierárquico, sem atraso no momento do projeto (linha pontilhada), o desempenho do sistema é degradado ao ponto de piorar o desempenho do controle descentralizado (linha sólida).

Como conclusão, destaca-se que se os atrasos não são considerados no momento do projeto, o controle resultante pode até mesmo prejudicar o desempenho do sistema. Dessa forma, a instalação deste esquema de controle torna-se inviável.

7.1.1.3 Robustez à perda de canais de comunicação

O controle centralizado depende de sinais remotos adquiridos pelo sistema de medição fasorial. As medidas fasoriais são transportados até o centro de operação por meio de canais de transmissão físicos como fibra ótica e micro ondas. Esses canais estão expostos as diferentes intempéries e em algum momento podem apresentar falhas que podem comprometer o processo de transmissão de dados.

Assim sendo, é importante investigar a robustez desse esquema de controle diante a perda de canais de comunicação. Dois testes foram feitos para analisar a robustez do controle frente a

estes problemas. Dois testes foram realizados para avaliar a robustez do controle: perda do sinal de Foz do Areia (Tabela 5, Modo 2) e Itaipu (Tabela 5, Modo 3). Em todos os testes, somente a perda do sinal de transmissão foi considerado. Os sinais locais continuam ativos, e o controle descentralizado não é afetado. A análise modal indica que a degradação no amortecimento do sistema, isso mostra que a perda de canais de comunicação piora o desempenho do controlador. Em ambos os casos, isso ocorre no modo menos amortecido. O amortecimento dos demais modos é pouco afetado. Na Figura 20, a resposta do controle descentralizado e do controle hierárquico com a perda do sinal de Itaipu é apresentada. Apesar da perda do sinal, a resposta do sistema é marginalmente melhor que a apresentada somente com o controle descentralizado. Em um sistema de real, sinais redundantes em barras próximas a Itaipu poderiam ser especificados para assegurar a manutenção do desempenho do controlador.

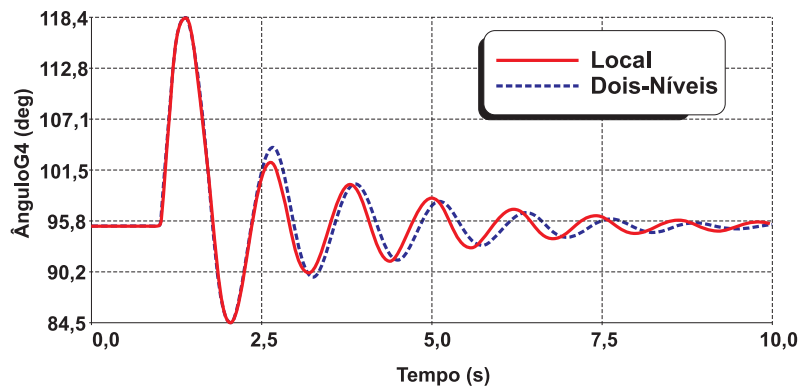


Figura 20: Perda do Sinal (Itaipu).

7.1.1.4 Robustez a alterações topológicas

Em se tratando de controladores aplicados a sistemas elétricos de potência um dos principais estudos a ser realizado é o de robustez frente a perturbações. Um sistema de energia elétrica pertence a classe dos sistemas variantes no tempo, pois ele está em constante modificação apresentando as mais diferentes variações de parâmetros. Alterações de ponto de operação e em alguns casos alterações topológicas como o desligamento de uma linha de transmissão são comuns no dia a dia da operação de sistemas elétricos. Os controladores projetados para atuar nesses sistemas devem ser robustos o suficiente para superar estas alterações. Dessa forma, um estudo da robustez do controlador frente a perturbações é de extrema importância.

No método de projeto por controle ótimo considerando restrições estruturais não são consideradas restrições de robustez. No entanto, mostra-se aqui que mesmo sem a consideração de restrições de robustez o controlador apresenta-se eficaz. Para tanto é necessário a simulações

de perturbações de grande porte como por exemplo a queda de uma linha que altere a topologia da rede.

A robustez do controle hierárquico a mudanças topológicas, na rede, é avaliado desconectando a linha de transmissão as barras 2 e 5. Os ângulos dos geradores são apresentados nas Figuras 21(b) (Itaipu) e 21(a) (Salto Santiago), para o controle descentralizado (linha sólida), e em dois níveis (linha pontilhada). As oscilações eletromecânicas estão ainda bem amortecidas para o novo ponto de operação no caso do controle hierárquico. Isso mostra que o controlador projetado é robusto a alterações topológicas na rede elétrica.

7.1.1.5 Robustez a diferentes tempos de atraso

Nesta Seção, a robustez do controle hierárquico é avaliada considerando atrasos diferentes dos utilizados no momento de projeto do controlador. Na Figura 21(c), a resposta do sistema considerando atrasos totais de $400ms$ (linha sólida), $500ms$ (linha pontilhada) e $600ms$ (linhas pontilhada) são apresentados. Esses atrasos correspondem, respectivamente, a um aumento de 25% a 50% do valor utilizado no projeto ($400ms$). Os resultados mostram que não há uma degradação significativa do desempenho do controlador. Simulações considerando atrasos diferenciados, por cada canal de comunicação, são apresentados na Figura 21(d). Os atrasos foram alterados para $100ms$, $200ms$, $300ms$ e $600ms$, nos canais 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Para essa faixa de variação, o desempenho do controlador não é comprometida.

7.1.2 Sistema Teste Sul do Brasil

Esse sistema de 33 barras e sete máquinas é um modelo equivalente do sistema Sul do Brasil (Figura 22). Ele foi incluído para ilustrar a aplicação do método de controle ótimo a um sistema de maior porte. Esse sistema foi especialmente preparado para o teste de novas aplicações. Os geradores são representados com modelos de quinta ordem com saturação incluída. *Wash-outs* são utilizados no controle local e central, e limites são considerados em todos os dispositivos. Os dados completos para esse sistema são encontrados em Alves (2007).

Esse sistema, em sua configuração original, é bem amortecido considerando somente o controle descentralizado. Todos os modos apresentam amortecimentos maiores que 13%. Para esse nível de amortecimento, a utilização de um esquema de controle hierárquico não é justificada. Entretanto, quando há alterações topológicas na rede, o amortecimento do sistema sofre uma queda significativa. Por exemplo, o desligamento permanente da linha de transmissão 995 – 1060 (Itá-S. Santiago) faz com que um modo de baixo amortecimento apareça no sistema.

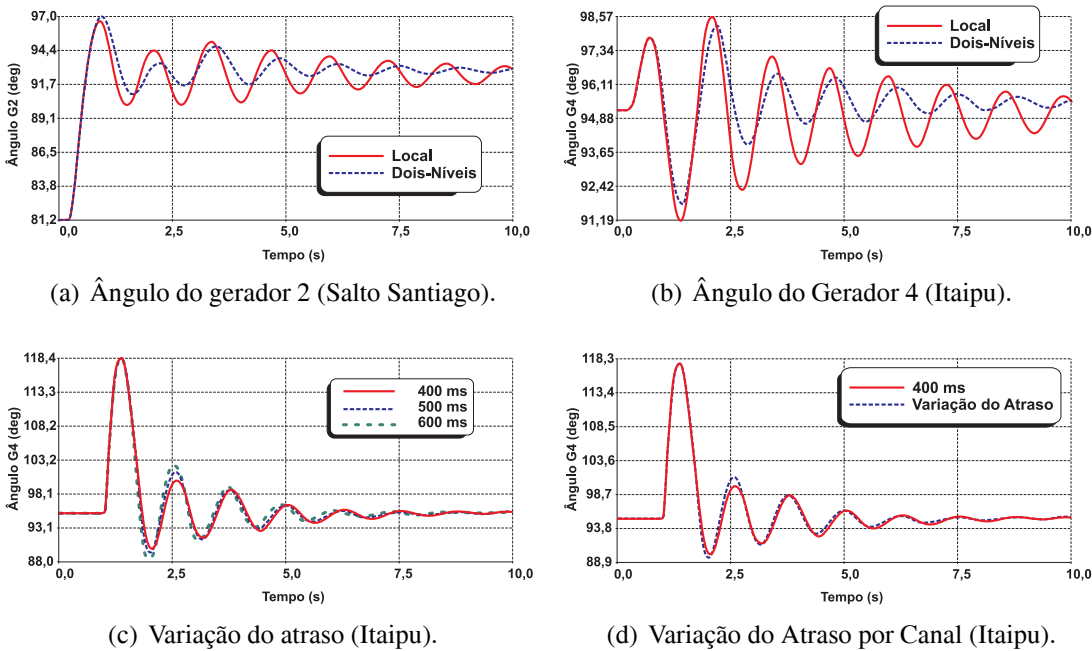


Figura 21: Simulação no domínio do tempo - Avaliação de Robustez.

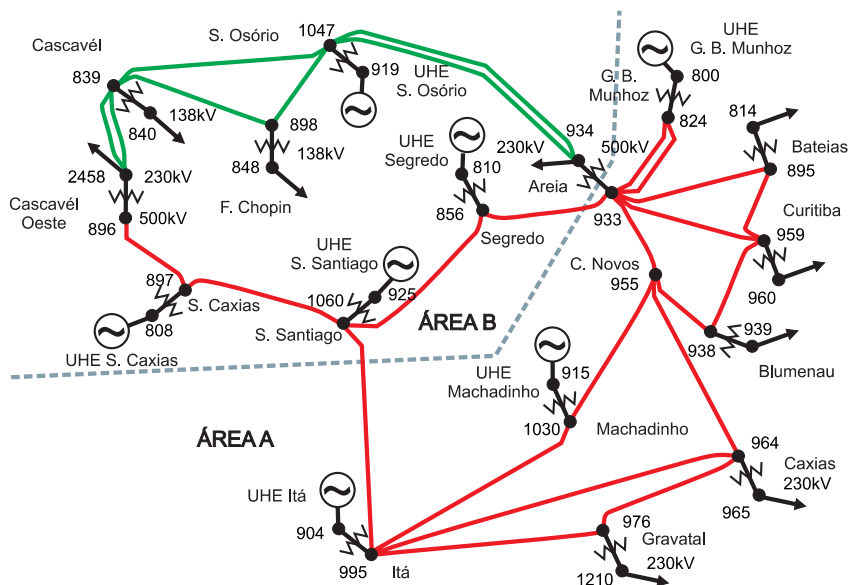


Figura 22: Equivalente do Sistema Sul do Brasil.

O modo de oscilação é apresentado na Tabela 6, modo número 1.

Esse modo está associado à oscilação dos geradores Itá e Machadinho com o resto do sistema. O desempenho do sistema pode ser melhorado reconfigurando os controladores locais. No entanto, esse procedimento é demorado e pode temporariamente restringir a operação em tempo real. Para esse cenário, um esquema de controle hierárquico poderia prontamente ser

configurado, no centro de operação, com o objetivo de assegurar um amortecimento satisfatório para a nova configuração do sistema. Neste trabalho, isto é apresentado como uma alternativa ao procedimento de reconfiguração do controle descentralizado.

Tabela 6: Modos de Oscilação Dominantes

Caso	Número	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
Controle Local	1	$-0.12 \pm 4.92i$	0.78	2.53
Control Hierárquico	2	$-0.46 \pm 4.73i$	0.75	9.76

Um controlador central foi projetado considerando como entradas as velocidades dos geradores de Salto Caxias, Ita, Salto Osório e Machadinho com atuadores nas mesmas máquinas. A seleção das entradas e saídas foi baseado na algoritmo apresentado na Seção 5.3.

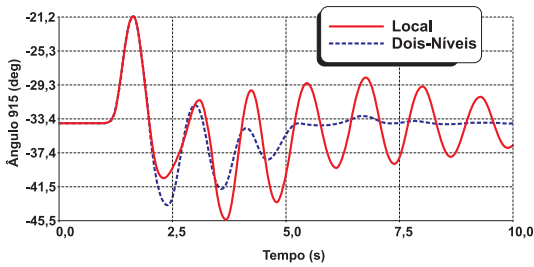
O projeto, utilizando-se controle ótimo com restrições estruturais, segue o procedimento adotado para o equivalente Sul-Sudeste e discutido na seção anterior. Um atraso de 400ms foi considerado no momento da realização do projeto e simulação. Com o controle centralizado, o amortecimento do modo de oscilação aumentou como apresentado na Tabela 6, modo número 2, o que mostra a efetividade do controle. Os outros modos permanecem com um amortecimento maior que 10%.

Uma simulação não-linear foi realizada para avaliar o desempenho do sistema. Um curto-circuito trifásico de 30ms foi aplicado na barra 915. O ângulo e o esforço de controle do gerador 915 (Machadinho) são apresentados nas Figuras 23(a) e 23(b). O sistema apresenta um melhor desempenho quando o controle hierárquico é utilizado. Isso é confirmado pela oscilação do fluxo de potência ativa na linha de transmissão 933 – 955, na Figura 23(c). A linha de transmissão 933 – 955 é a principal conexão entre os geradores Itá-Machadinho e o sistema.

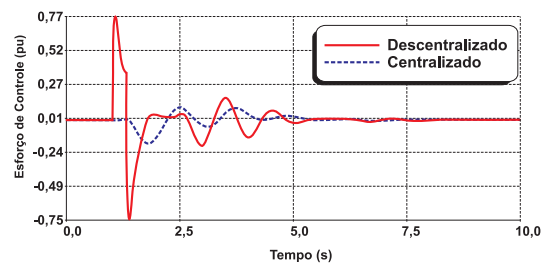
7.2 Seleção de sinais e pontos de medição e controle

O objetivo desta Seção é discutir o uso de diferentes sinais físicos para o projeto do controle central e o uso do método de seleção de pontos de medição e controle baseado em análise modal. As análises realizadas nesta Seção utilizam como referência os resultados obtidos na Seção 7.1, usando controle ótimo com restrições estruturais. Sendo um método bem estabelecido na literatura, o método baseado em controle ótimo foi escolhido para o projeto dos controladores desta Seção. O sistema teste utilizado foi o equivalente Sul/Sudeste. Esse sistema foi escolhido pela sua menor dimensão, comparado com o sistema equivalente Sul.

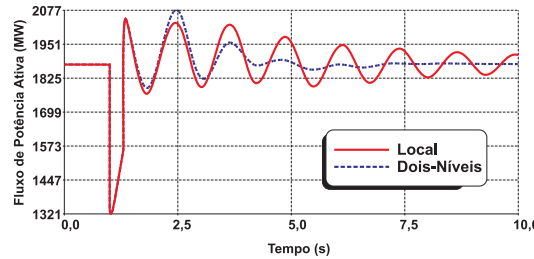
A Seção inicia com a discussão sobre o uso de diferentes sinais físicos para o controle



(a) Ângulo do gerador 915 (Machadinho).



(b) Esforço de Controle 4 (Itaipu).



(c) Fluxo de Potência LT 933-955.

Figura 23: Simulação no domínio do tempo - Sistema Sul.

central. Na segunda parte, testa-se a eficácia do método de seleção de pontos de medição e controle para o projeto de um controlador de mínima redundância.

7.2.1 Análises de Diferentes Sinais Físicos

Como descrito na Seção 5.4, diferentes sinais podem ser obtidos de um sistema de medição fasorial. Esses sinais diferem em magnitude, significado físico e conteúdo de informação com respeito de um determinado modo de oscilação. O objetivo desta Seção é o de apresentar uma avaliação dos principais tipos de sinais que podem ser usados para alimentar o controle central. Foram selecionados os seguintes sinais físicos:

- velocidade do gerador (rad/s);
- ângulo de barra (graus);
- potência elétrica (MW).

Na literatura, o sinal adicional mais utilizado, no controle central, é o da velocidade do gerador (KAMWA et al., 2001; HU; MILANOVIC, 2007)(OKUO et al., 2005). Além disso, esse sinal tem um comportamento similar ao da frequência do sistema. O sinal de ângulo de barra foi escolhido por ser um produto direto da medição fasorial sincronizada. Na literatura não

há relatos da exploração desse sinal para controladores em sistemas elétricos. Já, o sinal de potência elétrica foi escolhido por ser um subproduto direto das tensões e correntes medidas pela PMUs.

Considerando-se esse grupo de sinais, aplicou-se o algoritmo de seleção de sinais apresentado na Seção 5.4. O objetivo é classificar os sinais com relação à observabilidade do modo de oscilação, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 7: Observabilidade dos sinais ao modo de oscilação

Classificação	Sinal	Ordem no Grupo
1	Ângulo	$\theta_2, \theta_3, \theta_1, \theta_4$
2	Potência	P_4, P_1, P_4, P_3
3	Velocidade	$\omega_2, \omega_3, \omega_1, \omega_4$

Pela análise geométrica, verifica-se que o sinal de ângulo de barra apresenta a melhor observabilidade para o modo de oscilação em específico. Isto é confirmado quando realiza-se o projeto dos controladores centrais considerando-se estes sinais. Atrasos totais de 400ms foram considerados no projeto. A análise modal dos controladores, considerando o pior caso para cada conjunto de sinais, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Modos de Oscilação menos amortecidos

Sinal	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
Velocidade	$-0.4865 \pm 5.0i$	0.8	9.67
Ângulo	$-1.6 \pm 12.5i$	1.99	12.66
Potência	$-1.38 \pm 12.42i$	1.97	11.06

Do ponto de vista da análise dos autovalores, o projeto do controlador, considerando sinais de ângulo é, significativamente, melhor do que o obtido com os sinais de velocidade e potência. Destaca-se, também, que os ganhos do controlador central para os sinais de ângulo e potência são inferiores ao obtidos com velocidade.

Para confirmação dos resultados, apresenta-se nas Figuras 24(a) o 24(b), o desempenho dos controladores considerando-se o sistema não-linear. Aplicaram-se dois distúrbios: curto-circuito de 30ms, na barra 4, sem alteração no sistema, e desligamento da linha de transmissão entre as barras 2 e 5.

Verifica-se que, para o distúrbio que não causa alterações estruturais, no sistema o desempenho do controlador, usando diferença angular é superior aos demais. No entanto, para o distúrbios que alterem significativamente a estrutura do sistema, o controlador com sinal de ângulo de barra não apresenta desempenho satisfatório. A causa do mau desempenho do sinal

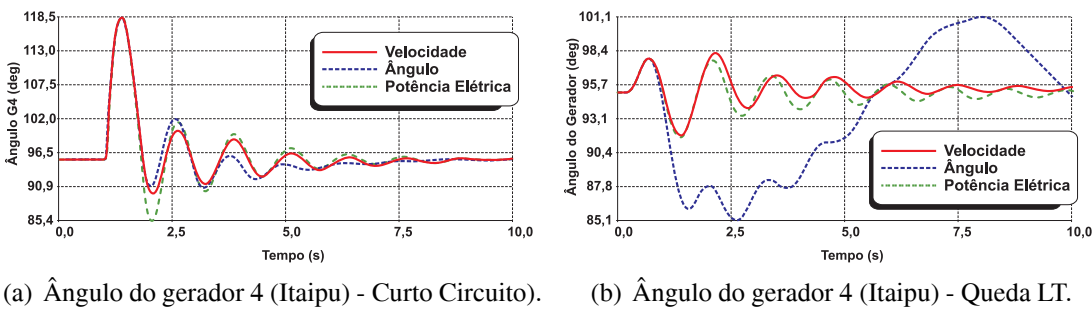


Figura 24: Desempenho dos Controladores.

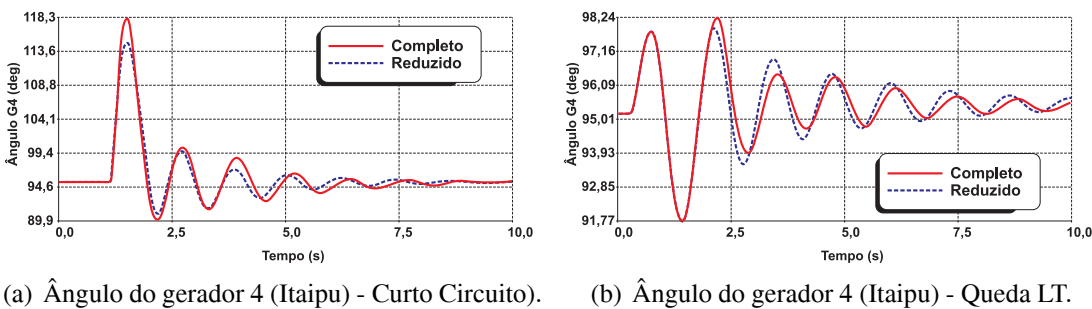


Figura 25: Minimização da Redundância.

de ângulo está relacionada à alta sensibilidade com relação a perturbações de grande magnitude. Para a perturbação que causa mudança topológica na rede, as oscilações do sinal ficam próximas às frequências de oscilação do modo a ser amortecido o que dificulta a sua filtragem. O desempenho dos sinais de potência e velocidade angular é semelhante considerando a simulação no domínio do tempo.

7.2.2 Minimização da Redundância

O controle central utilizado até o momento considerou todas as barras às quais geradores estão conectados como sinais de entrada para o controlador central. No entanto, em alguns casos nem todas as barras precisarão participar do controlador central. Executando o algoritmo de seleção de barras apresentado em detalhes na Seção 5.3, para o sistema teste equivalente Sul/Sudeste, chega-se a uma configuração que considera duas entradas e duas saídas (Barra 3 e Barra 4). Essa configuração é de mínima redundância da informação.

Para avaliar o controlador obtido, duas simulações foram realizadas considerando os mesmos distúrbios da Seção anterior, com e sem alteração do sistema. Os respectivos resultados são apresentados nas Figuras 25(a) e 25(b).

Como se pode verificar, o controlador considerando mínima redundância (2x2) tem um desempenho bastante semelhante ao controlador de configuração completa (4x4). No entanto, como estamos trabalhando diante de uma configuração de mínima redundância, em caso de falha de canal de comunicação teremos uma significativa queda no desempenho do sistema (no caso específico, da ordem de 3,5%).

7.3 Métodos Paramétricos

Nesta Seção, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de métodos paramétricos de otimização para o projeto do controle hierárquico. Os dois métodos aplicados são o método direto e o híbrido (baseado no gradiente amostrado). Os resultados são apresentados em subseções distintas como segue.

7.3.1 Método de Busca Direta

Nesta Seção, serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de busca direta para o controle de sistemas de energia elétrica. No sentido de testar a aplicabilidade do método para sistemas com grande número de estados, algoritmos de redução de ordem não foram utilizados nesse experimento.

7.3.1.1 Sistema Teste Sul/Sudeste

A configuração do sistema elétrico e do controlador é a mesma considerada na Seção 7.1. A exceção é a ordem do controlador central, já que, nesse caso, considerou-se a realimentação estática de saídas. Utilizou-se a realimentação estáticas de saídas pois o algoritmo implementado não suporta a realimentação dinâmica. Atrasos na ordem de 100ms são introduzidos na entrada e na saída do controlador central, resultando em um atraso total de 200ms.

No caso do controle ótimo com restrições estruturais, o projeto tem por objetivo aumentar o amortecimento de um modo específico, conforme a configuração das matrizes de peso. No caso do método de procura direta, a função objetivo visa a maximizar explicitamente amortecimento do sistema. Matrizes de peso não são utilizadas. Para alcançar esse objetivo, um índice explícito de otimização é estabelecido. O problema, então, de minimização é dado por:

$$\min_{\mathbf{K} \in \mathfrak{R}} -\xi(\mathbf{A} + \mathbf{BK}). \quad (7.2)$$

onde $\xi(\mathbf{A} + \mathbf{BK})$ representa o amortecimento do sistema em malha fechada. O controlador \mathbf{K}

$$\mathbf{PSS} = \begin{bmatrix} 26.9 & 6.39 & 5.05 & 7.05 \\ 2.88 & 10.4 & -3.21 & -40.8 \\ 5.75 & -24.2 & 27.2 & 72.4 \\ 4.35 & 3.86 & -16.4 & 4.34 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

obtido pela solução do problema de otimização será a solução para o sistema.

Neste projeto, não se utilizaram métodos de redução de ordem para a avaliação do desempenho computacional do método. O sistema completo, considerando atrasos, tem dimensão de 57 estados. O projeto do sistema foi efetuado, e a função de transferência resultante é apresentada em (7.3). Com o controle centralizado, o amortecimento do modos foi elevado para um amortecimento maior que 20%. O modo menos amortecido é apresentado na Tabela 9.

Para se chegar ao resultado apresentado na Tabela 9, diversas execuções do algoritmo de busca direta foram necessárias. Como esse método é altamente dependente das condições iniciais, níveis diferentes de amortecimento são alcançados a cada execução variando-se a condição inicial. Nas primeiras simulações, quando utiliza-se um controlador nulo como condição inicial, foram encontrados níveis de amortecimento semelhantes aos apresentados na Tabela 6. Realizou-se então um processo de refinamento da solução que consiste basicamente em realizar a partida do método com uma melhor condição inicial. Utilizou-se então a condição inicial com um melhor nível de amortecimento, resultando em um nível de amortecimento superior ao encontrado com o controle ótimo com restrições estruturais.

O desempenho do controlador foi também avaliado por meio de simulações, no domínio do tempo, usando o software ANATEM, para verificar o comportamento do controlador no sistema não-linear. Um curto circuito trifásico foi aplicado à barra 4 e retirado sem alteração no sistema. Os ângulos dos geradores 1 (Foz de Areia) e 4 (Itaipu) são apresentados respectivamente nas Figuras 26(a) e 26(b).

Tabela 9: Modos de Oscilação Menos Amortecidos

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	$-2.4275 \pm 11.74i$	1.86	20.24

As respostas do sistema com somente o controlador local (linha sólida) e com o controle em dois níveis (linha pontilhada) mostra que o sistema apresenta melhor comportamento dinâmico na presença do controle central. Os sinais de controle aplicados ao gerador 4 (Itaipu), mostrando o controle local e central trabalhando juntos para amortecer os modos de oscilação, é apresentado em 26(c). A saída dos PSSs locais alcança seu limite, enquanto o controle central contribui para o amortecimento sem tocar o limite ($0,2pu$ em ambos os casos). Destaca-se que

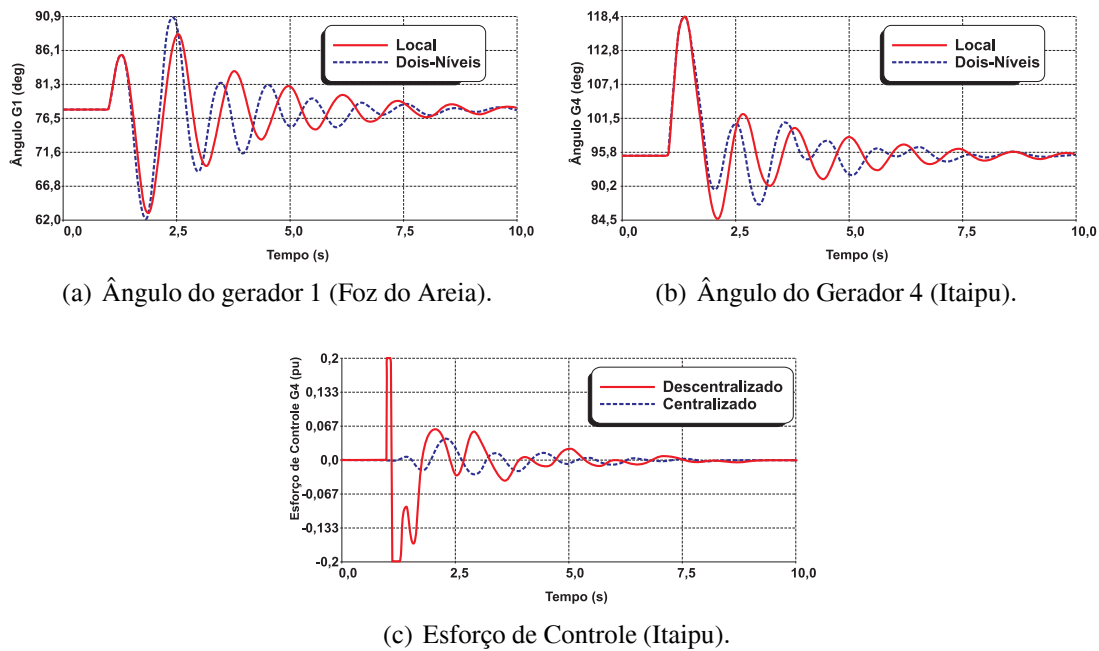
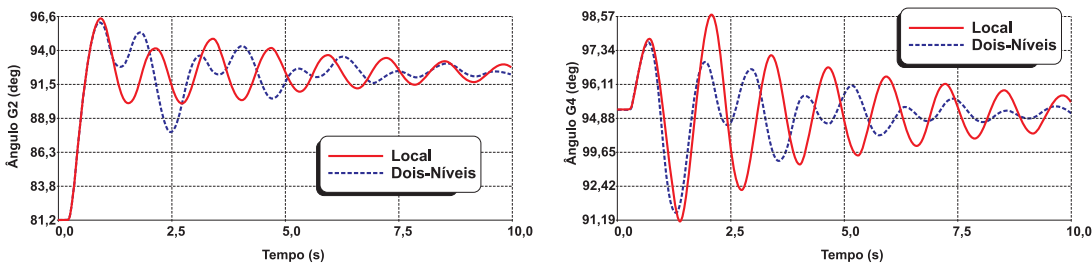


Figura 26: Simulação no domínio do tempo.

a melhora do desempenho dinâmico do sistema não obteve o ganho esperado. Deve-se considerar que o sistema teste utilizado é um sistema patológico (sistema de fase não-mínima), e que melhores resultados podem ser obtidos em sistemas elétricos melhor comportados.

A vantagem deste método comparado com o controle ótimo é a não-necessidade de um conhecimento prévio do sistema. Não há a necessidade da configuração de parâmetros de desempenho tanto de amortecimento como de controle. Utilizando-se realimentação estática de saídas, elimina-se a necessidade da escolha dos pólos do sistema. Para esse sistema, o tempo computacional para encontrar a solução não foi elevado e está na ordem de 15 a 25 segundos, para os casos convergentes. O tempo de convergência está diretamente relacionado à escolha da condição inicial. A convergência do sistema em si é altamente dependente da condição inicial. Como já comentado, para esses casos pode-se usar diferentes condições iniciais.

Como desvantagem do método de busca direta, cita-se a alta dependência do método à condição inicial, que influi tanto no tempo computacional como na convergência do método. Em alguns casos, necessita-se executar o algoritmo mais de uma vez para encontrar uma solução que estabilize o sistema. A solução que estabiliza o sistema pode não ser interessante para o caso do controle central, já que se está interessado em melhorar o desempenho do sistema. Dessa forma, utiliza-se o controlador central que estabiliza o sistema, como condição inicial, para uma nova execução do algoritmo.



(a) Análise Robustez: Ângulo do gerador 2 (Salto Santiago). (b) Análise Robustez: Ângulo do gerador 4 (Itaipu).

Figura 27: Simulação no domínio do Tempo - Robustez do Controle.

• Robustez a alterações topológicas

As mesmas justificativas para a realização de simulações para a investigação da robustez do controlador apresentadas para o método de controle ótimo com restrições (), são também válidas para o método da busca direta. Adicionalmente a estas questões, deve-se considerar que a malha de controle é agora estática e não dinâmica como no caso do controle ótimo. Controladores dinâmicos tendem a ser mais robustos pois acompanham as variações de frequência do sistema, no caso do controle estático esta possibilidade não existe já que o mesmo é representado por uma matriz de ganhos.

A robustez do controle hierárquico a mudanças topológicas na rede é avaliada desconectando a linha de transmissão entre as barras 2 e 5. Os ângulos dos geradores são apresentados nas Figuras 27(a) (Itaipu) e 27(b) (Salto Santiago) para o controle descentralizado (linha sólida) e em dois níveis (linha pontilhada). As oscilações eletromecânicas estão ainda bem amortecidas para o novo ponto de operação no caso do controle hierárquico. Isto mostra a contribuição deste esquema para o aumento da robustez do sistema.

7.3.2 Método Híbrido

Nesta Seção, apresenta-se o resultado da aplicação do método híbrido para o projeto do controle hierárquico. Os dois sistemas considerados são o equivalente Sul/Sudeste, de menor porte, e o sistema equivalente Sul de 33 barras. Os resultados são apresentados, separadamente, para cada sistema, como segue.

$$\mathbf{PSS}(s) = \begin{bmatrix} \frac{+50.7+35.7s+5.5s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{52.2+39.9s+6.8s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{69.3+36.0s+4.6s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{0.7-1.5s-0.4s^2}{7.1+5.9s+s^2} \\ \frac{+56.7+41.4s+6.8s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{+28+19.2s+2.7s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{22.6-1.5s-1.4s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{-18.1-17.3s-3.1s^2}{7.1+5.9s+s^2} \\ \frac{+51.5+25.9s+3.1s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{+45.4+28.8s+4.41s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{+115+38.7s+2.6s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{+2.76-3.1s-0.9s^2}{7.1+5.9s+s^2} \\ \frac{-25.8-5.9s-0.3s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{-5.6+5.5s+2s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{-89-19.7s-0.1s^2}{7.1+5.9s+s^2} & \frac{-20.4-11.3s-1.4s^2}{7.1+5.9s+s^2} \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

7.3.2.1 Sistema Teste Sul/Sudeste

Como primeiro projeto, considera-se o sistema equivalente Sul-Sudeste. Para esse caso, considera-se a configuração do sistema elétrico e do controlador descrita na Seção 7.1.

• Problema do Controlador e Análise de Desempenho

Da mesma forma que, no controle ótimo com restrições estruturais, para o projeto desse controlador, o resultado final em termos de amortecimento depende da configuração das matrizes de desempenho. Com o objetivo de melhorar o amortecimento do sistema, as matrizes de desempenho de entrada (distúrbio) \mathbf{B}_1 e de saída (variáveis monitoradas) \mathbf{C}_1 devem ser adequadamente configuradas. O distúrbio considerado foi um curto-circuito na barra 4 (Itaipu). Dessa forma, a matriz \mathbf{B}_1 foi ponderada, considerando-se a entrada do regulador de tensão, e a matriz \mathbf{C}_1 foi fortemente ponderada, no estado associado com o modo de oscilação menos amortecido.

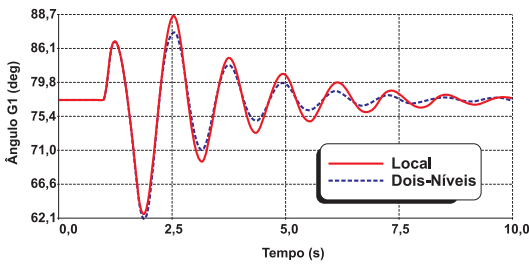
Aplicou-se essa configuração como dados de entrada do pacote HIFOO. A função de transferência resultante é apresentada em 7.4. Como pode ser observado, o controlador obtido é estável e de fase não-mínima, pois apresenta zeros do semi-plano direito.

Com o controle centralizado, o amortecimento do modo menos amortecido atinge 9.14%, sendo apresentado na Tabela 10. Os demais modos do sistema apresentam amortecimentos maiores que 10%.

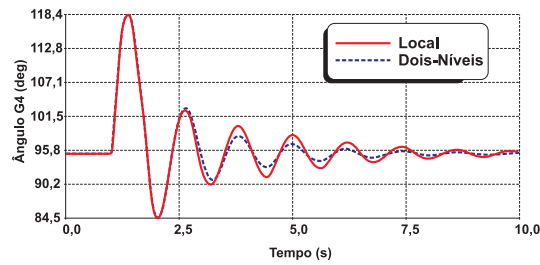
Tabela 10: Modos de Oscilação Menos Amortecidos

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	$-0.49 \pm 5.40i$	0.86	9.14

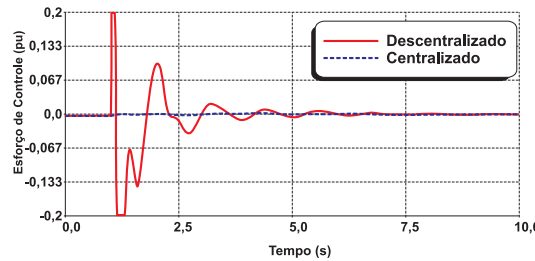
O desempenho do controlador foi também avaliado, por meio de simulações, no domínio do tempo, usando o software ANATEM para verificar o comportamento do controlador no sistema não-linear. Um curto-circuito trifásico foi aplicado à barra 4 e retirado sem alteração no sistema. Os ângulos dos geradores 1 (Foz de Areia) e 4 (Itaipu) são apresentados, respectivamente, nas



(a) Ângulo do gerador 1 (Foz do Areia).



(b) Ângulo do Gerador 4 (Itaipu).



(c) Esforço de Controle (Itaipu).

Figura 28: Simulação no domínio do tempo.

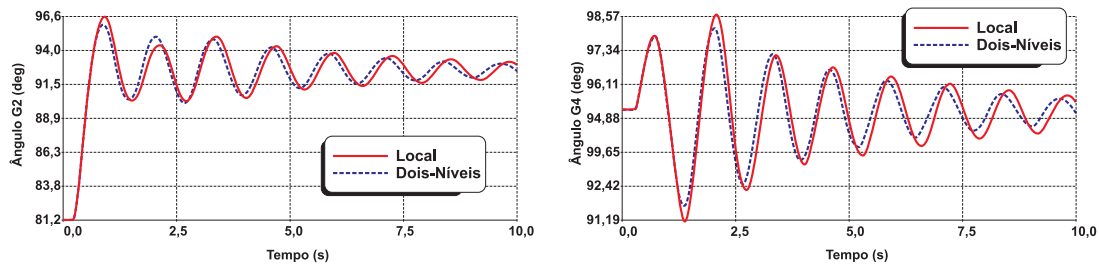
Figuras 28(a) e 28(b). O esforço de controle do gerador 4 (Itaipu), mostrando o controle local e central trabalhando juntos, para amortecer os modos de oscilação, sendo apresentado em 28(c).

• Robustez a alterações topológicas

A robustez do controle hierárquico a mudanças topológicas na rede é avaliado, desconectando-se a linha de transmissão entre as barras 2 e 5. Os ângulos dos geradores são apresentados nas Figuras 29(a) (Itaipu) e 29(b) (Salto Santiago), para o controle descentralizado (linha sólida), e em dois níveis (linha pontilhada). As oscilações eletromecânicas apresentam um amortecimento satisfatório para o novo ponto de operação no caso do controle hierárquico. No entanto, quando compara-se as Figuras 29(a) e 21(b) verifica-se que o controlador projetado utilizando o método de controle ótimo com restrições estruturais apresenta um desempenho melhor diante de perturbações que modifiquem a topologia da rede.

7.3.2.2 Sistema Teste Sul do Brasil

Esse sistema foi incluído na simulação, para testar o método híbrido, para um sistema de maior porte. O sistema foi descrito em detalhes na Seção 7.1.2, e os dados completos dele são encontrados em Alves (2007). O distúrbio considerado para o projeto foi um curto circuito na barra 915. Dessa forma, as matrizes \mathbf{B}_1 e \mathbf{C}_1 foram configuradas de acordo com o procedimento



(a) Análise Robustez: Ângulo do gerador 2 (Salto Santiago). (b) Análise Robustez: Ângulo do gerador 4 (Itaipu).

Figura 29: Análise de Robustez.

$$PSS(s) = \begin{bmatrix} \frac{+18.9+30.0s-4.1s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-9.0+58.7s+8.5s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-0.8+48.0s+7.6s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{12.7-3.0s-1.8s^2}{2.4+2.0s+s^2} \\ \frac{-30.3+6.3s+3.5s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{+32.23-21.9s-8.3s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{11.3-27.7s-10.9s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-14.2-4.7s+0.07s^2}{2.4+2.0s+s^2} \\ \frac{+3.0-13.0s+0.27s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{+1.2+22.3s-0.4s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-6.6+9.6s-4.0s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{+1.05-4.7s-1.6s^2}{2.4+2.0s+s^2} \\ \frac{+44-43s-3.2s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-46+77s+3.0s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{-34-57s+0.23s^2}{2.4+2.0s+s^2} & \frac{+25.5-2.4s-2.0s^2}{2.4+2.0s+s^2} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

descrito na seção anterior. Consideram-se atrasos de 200ms, o que resulta em um atraso total de 400ms. A função transferência resultante é apresentada em 7.5.

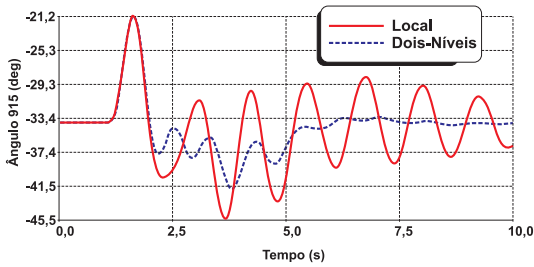
Na Tabela 11, apresentam-se os modos menos amortecidos para as duas configurações de operação. Como pode-se observar, houve um aumento no amortecimento dos modos de oscilação presentes no sistema. O controlador obtido é de segunda ordem e de fase não-mínima.

O ângulo e o esforço de controle do gerador 915 (Machadinho) são apresentados nas Figuras 30(a) e 30(b). As oscilações de fluxo de potência, na linha de transmissão 933-955, são apresentadas na Figura 30(c).

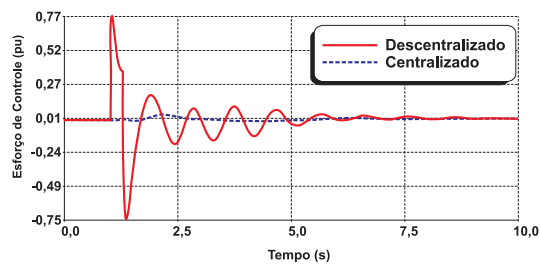
Tabela 11: Modos de Oscilação Dominantes

Caso	Número	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
Controle Local	1	$-0.12 \pm 4.92i$	0.78	2.53
Control Hierárquico	2	$-0.57 \pm 6.42i$	1.02	8.87

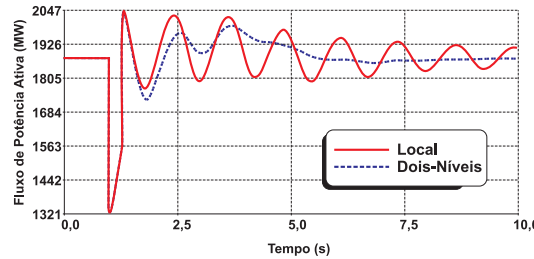
Os resultados obtidos, com a aplicação desse método, apresentam-se um pouco melhor do que os obtidos com o controle ótimo e mostram a potencialidade desse método de projeto. Entre os resultados, destaca-se a magnitude dos sinais de controle provenientes do PSS. Esses sinais apresentam uma relevante melhora quando comparado com o controle ótimo com restrições estruturais. O desempenho computacional do método é fortemente influenciado dimensão do sistema. Dessa forma, para sistemas de alta dimensão é necessária a utilização de redução de



(a) Ângulo do Gerador 915 (Machadinho).



(b) Esforço de Controle 915 (Machadinho).



(c) Fluxo da Linha 933-955.

Figura 30: Simulação no domínio do tempo - Sistema Sul.

ordem juntamente com o método híbrido.

7.4 Conclusões

Apresentaram-se, neste Capítulo, os principais resultados obtidos para avaliação de desempenho de um controle hierárquico utilizando-se sinais de medição fasorial sincronizada. Esse esquema de controle composto de dois níveis tem, como principais vantagens, a melhoria do desempenho do controle descentralizado e, em caso de falha no controle central o desempenho mínimo do sistema é garantido pelo esquema descentralizado. Adicionalmente, em casos de ocorrência de alterações significativas da rede, o controle central pode ser configurado de uma forma mais rápida quando comparado com o ajuste coordenado do controle descentralizado, otimizando-se o desempenho do sistema elétrico sem a necessidade da reconfiguração dos PSSs locais. Diferentes métodos de projeto foram aplicados para a síntese deste controlador.

Como primeira abordagem, aplicou-se um método bem estabelecido, baseado em controle ótimo com restrições estruturais, considerando restrições estruturais. O desafio do atraso foi vencido com a incorporação desse no momento de projeto. Sem a consideração de atrasos, no momento do projeto, o desempenho do controlador fica comprometido. A ordem dos atrasos utilizados, no âmbito deste trabalho, é duas vezes superior aos estimados pelos trabalhos mais recentes encontrados na literatura (STAHLHUT et al., 2008; XIE et al., 2006). A utilização de

algoritmos de redução de ordem e análise modal para a escolha das matrizes de peso facilitou o projeto desse esquema de controle. Usando-se o método de projeto proposto neste Capítulo, não houve a necessidade de algoritmos de redução de ordem avançados, pois a ordem do controlador projetado não está atrelada à ordem da planta considerada.

Como restrições de robustez não foram incorporadas ao algoritmo de projeto, intensivas simulações foram realizadas para mostrar a robustez do controlador. As mais diversas situações críticas que podem ser encontradas no campo foram testadas, indicando a sua viabilidade para tal aplicação.

Diferentes sinais adicionais foram avaliados, para uso no controlador central. Foram considerados os sinais de velocidade do gerador, de ângulo de barra e da potência elétrica. Dentre esses, o que apresentou maior potencial foi o sinal de ângulo de barra. Esse sinal é um produto direto da PMU e utilizando-se o método das medidas geométricas foi o que demonstrou melhor observabilidade para o modo de oscilação a ser amortecido. O projeto do controlador, utilizando-se esse sinal apresenta ganhos de baixa magnitude. Sua resposta temporal, para perturbações que não alterem a configuração do sistema, é melhor quando comparada com os demais sinais. No entanto, sob perturbações que alterem a configuração do sistema, esse sinal pode degradar de uma maneira muito significativa o desempenho dinâmico do sistema. Os sinais de velocidade angular e potência elétrica apresentaram desempenho semelhantes e podem ser seguramente utilizados para o projeto do controlador central.

Com o crescente número de PMUs instaladas, métodos para seleção de pontos de medição se fazem necessárias para minimizar o custo de canais de transmissão e controle, uma melhoria do método proposto em Marini (2005) foi apresentado neste trabalho. A efetividade desse método foi demonstrada com o projeto de um controlador de configuração mínima para o sistema Sul/Sudeste. O desempenho dinâmico desse controlador é bastante semelhante quando comparado com o controlador que considera todos os pontos de controle do sistema Sul/Sudeste.

As pesquisas utilizando métodos de busca direta para o projeto de controladores foram retomadas no começo deste Século. A grande vantagem dessa abordagem é a não-necessidade de que o problema seja convexo e suave. O método foi aplicado para sistema de potência com resultados satisfatórios. Esses métodos apresentam grande simplicidade e podem ser aplicados no projeto de controladores. A grande dificuldade desse método é a sua alta dependência com relação a condição inicial.

Destaca-se, aqui, o método híbrido como sendo aquele que apresenta uma maior potencialidade de aplicação. Esse método combina métodos de diferentes características que trabalham complementarmente entre si. Este método apresenta uma melhor velocidade de convergência e

desempenho computacional, quando comparado com o de busca direta. O método foi aplicado para dois sistemas-teste, mostrando resultados promissores. Como já comentado, o referido método apresenta elevado potencial de aplicação, sendo necessárias outras pesquisas a fim de se verificar o seu espectro de atuação, na área de sistemas de energia elétrica.

Como já comentado, esses algoritmos não são substitutos dos atuais métodos baseados em Controle Ótimo e em LMIs, mas uma alternativa de projeto quando estes últimos falham. Além disso, as pesquisas com esses métodos estão em relativa fase inicial, já que foram abandonados por um certo tempo. Melhores estudos precisam ser realizados para buscar melhores condições de robustez e facilidade de convergência para sistemas de maior porte.

8 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tem por objetivo realizar o projeto e verificar o desempenho de um sistema de controle hierárquico usando sinais de medição fasorial sincronizada. O objetivo principal desse esquema de controle é o de melhorar o desempenho dinâmico do sistema elétrico, no âmbito da estabilidade angular, diante de pequenas perturbações. Esse esquema é composto de dois níveis, sendo o primeiro o tradicional controle descentralizado e o segundo um controle centralizado usando sinais de medição fasorial sincronizada. Dentre os esquemas de controle encontrados na literatura, esse é o que apresenta um maior potencial de aplicação, pois considera intrinsecamente o tradicional esquema de controle descentralizado e, em caso de falha no controle central, o esquema descentralizado garante um desempenho mínimo ao sistema. Em caso de queda de canais de comunicação, o desempenho pode ser garantido com canais redundantes de comunicação. Do ponto de vista prático, uma crítica a esse esquema é o seu custo, com relação ao tradicional esquema descentralizado. Em muitos casos, um bom ajuste do esquema descentralizado garante um desempenho satisfatório do sistema elétrico, o que não justificaria a adição de um controle central. Isso foi constatado durante esta pesquisa, pois quando o reajuste dos PSSs locais é realizado, os ganhos obtidos com o controlador central apresentam-se pouco significativos. No entanto, o reajuste coordenado dos PSSs locais é também de difícil consideração prática, ainda mais quando se considera um ambiente desverticalizado, em que os geradores pertencem a diferentes empresas. Além disso, o tempo necessário para que esse reajuste seja efetivado pode ser na ordem de dias ou semanas, o que pode restringir a operação do sistema em tempo real.

Os principais desafios a serem vencidos, para este sistema de controle, são o atraso dos canais de medição e controle, o uso de métodos de projeto multivariáveis e, principalmente, a consideração de um controle com realimentação de saídas de baixa ordem. Dentre esses, destaca-se o último desafio, já que devido à elevada dimensão dos sistemas elétricos, um controlador da ordem da planta seria inviável de ser implementado na prática. Adicionalmente, considerando-se o número crescente de PMUs sendo instaladas no sistema elétrico, métodos devem ser considerados para a escolha de sinais e pontos de medição e controle.

Dados os desafios, foram considerados métodos de projeto capazes de superá-los. As abordagens consideradas podem ser classificadas em dois grupos: a dos métodos analíticos (resolução da equação de Riccati) e a dos métodos paramétricos (métodos busca direta e híbrido). A primeira abordagem utilizada foi do método de controle ótimo com restrições estruturais, que tem como base a resolução da equação generalizada de Riccati. Os atrasos foram modelados

e inseridos no momento da realização do projeto do controlador dinâmico de segunda ordem. Como desafios desse método de projeto, citam-se: dificuldade de obtenção de solução quando os atrasos são considerados no momento de projeto; velocidade de convergência; configuração das matrizes de peso; e escolha dos pólos dos controladores. Esses desafios foram superados com uso de métodos de redução de ordem. Destaca-se, aqui, que a redução de ordem a ser considerada não é de grande monta, como no caso de projeto considerando LMIs, onde a ordem da planta influencia diretamente na ordem do controlador. No caso do controle ótimo com restrições estruturais, somente os estados fracamente acoplados do ponto de vista de entrada e saída são eliminados, o que não compromete as informações com relação à dinâmica do sistema. A escolha das matrizes de peso tem forte influência na velocidade de convergência e qualidade do projeto obtido. Neste trabalho, a escolha foi realizada por meio dos "mode shapes". A idéia básica é descobrir qual estado tem forte influência no modo de oscilação que deve ser amortecido. Com essa informação, esse modo é fortemente ponderado o que garante um claro aumento no amortecimento do sistema. A questão da escolha dos pólos foi a menos explorada. No entanto, verificou-se que a escolha de pólos estáveis e distantes do eixo imaginário apresentaram os melhores resultados. A eficácia do projeto obtido foi testada, com sucesso, sob diversas condições e para diferentes sistemas, o que depõe a favor de sua robustez e o seu desempenho sob condições adversas de operação.

Considerando o controlador obtido pelo algoritmo de controle ótimo, foram também testados métodos para a seleção de sinais e localização de pontos de medição e controle. O objetivo principal, para o uso desses é que, com o crescente aumento do número de PMUs instaladas no sistema, a disponibilidade de sinais e pontos de medição aumenta consideravelmente. Com o grande volume de informação disponível, métodos para filtrar informação de qualidade devem ser considerados. O método das medidas geométricas foi utilizado para a seleção de sinais. Para os modos de oscilação considerados, o sinal que apresentou o maior conteúdo modal foi o de ângulo. Isso foi, posteriormente, confirmado no momento do projeto, já que o amortecimento obtido foi consideravelmente maior quando comparado com o obtido com outros sinais. Os ganhos do controlador também apresentaram menor magnitude. No entanto, o desempenho do controlador com sinal de ângulo não é robusto na presença de perturbações que causam mudanças estruturais no sistema. Isso fica claro nas simulações não-lineares apresentadas no Capítulo 7. Como principal restrição ao uso desse sinal, destaca-se a sua alta sensibilidade, o que, por vezes, gera frequências próximas ao modo de oscilação que precisa ser amortecido. Isso dificulta o processo de filtragem para obtenção da informação efetiva necessária ao controlador. Os sinais tradicionais de velocidade angular e potência elétrica se mostraram superiores nesses casos e podem ser utilizados como entradas para o controle central. Ainda com

relação a esse tópico, outra questão considerada foi a da minimização da redundância dos canais de informação, já que esta tem implicação direta no custo do sistema a ser considerado. O método utilizado, baseado em análise modal, apresentou desempenho satisfatório e mostrou a sua eficácia na escolha dos canais de medição e controle com vista à minimização da redundância da informação. A limitação principal desse método é a sua falta de capacidade em considerar sinais de diferentes magnitudes, o que pode ser compensado com o seu uso integrado com o método de medidas geométricas.

Adicionalmente aos desenvolvimentos realizados com o controle ótimo, métodos paramétricos de projetos foram testados no sentido de verificar sua aplicabilidade e desempenho para o esquema de controle proposto. Verificando-se a literatura, constatou-se que as pesquisas considerando métodos de busca direta foram retomadas e estão sendo consideradas alternativas aos métodos estabelecidos como o de Controle Ótimo e LMIs. Como principais vantagens desses métodos, destacam-se a simplicidade e a capacidade de trabalhar com problemas não-convexos e não-suaves. Dessa forma, representam a única alternativa para os casos em que os tradicionais métodos baseados em derivada não são capazes de resolver. Como desvantagem, destaca-se o aumento de tempo de resolução para o caso de sistemas de grande porte.

Finalizando, o algoritmo do *gradient sampling* foi também explorado neste trabalho por meio do método híbrido. Este trabalho foi o primeiro a aplicar o método do gradiente amostrado em problemas da área de sistemas elétricos de potência. Formatado para funções não-suaves e não-convexas, esse algoritmo usa a informação do gradiente para encontrar mais rapidamente a sua direção de descida. Neste trabalho é combinado com outros métodos melhorando o seu desempenho. Esse método apresenta uma velocidade de convergência melhor que os métodos baseados somente em busca direta e representa uma alternativa aos anteriores. O método foi testado para o projeto do controle hierárquico dos sistemas-teste apresentados neste trabalho. Os resultados foram satisfatórios e mostram a potencialidade de aplicação desses métodos para o projeto de controladores para sistemas de energia elétrica.

8.1 Principais Contribuições do Trabalho

Com o objetivo de resumir as contribuições do trabalho realizado, essas são apresentadas como segue:

- projeto de um controlador centralizado, considerando o atraso no momento de projeto;
- aplicação do algoritmo de controle ótimo para o projeto de controle hierárquico;

- estudo da robustez do controlador frente a perturbações de diversas magnitudes;
- análise de desempenho frente variações dos atrasos fixados no momento de projeto;
- implementação de métodos para escolha de sinais e pontos de medição e controle;
- investigação de métodos paramétricos, baseados em índices de otimização explícita, para o projeto do controladores hierárquicos.

8.2 Sugestão de Trabalhos Futuros

As sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- **Controle ótimo com restrições estruturais:** Melhorias no algoritmo de controle ótimo com restrições estruturais podem trazer benefícios para a melhoria do tempo de convergência e velocidade do tempo de projeto. Para tanto é necessária a investigação de técnicas que possibilitem encontrar os pólos do controlador de uma maneira automática e eficiente. Isso eliminaria o processo de tentativa e erro para a escolha de pólos realizadas neste trabalho. Um outro aspecto importante é o de buscar técnicas que melhorem o processo de ponderação das matrizes de peso **Q** e **R**. Essas matrizes influenciam diretamente o desempenho do método e precisam ser melhor trabalhadas.
- **Controlador Multi-sinal:** os projetos de controladores centrais utilizados neste trabalho usavam somente sinais de mesma magnitude e sentido físico. Como prosseguimento da linha de pesquisa, é importante testar controladores que combinem sinais de diferentes grandezas físicas como por exemplo velocidade angular e potência elétrica. Controladores com múltiplos sinais podem trazer benefícios à melhoria da dinâmica do sistema, quando combinados de maneira eficiente.
- **Robustez do controlador:** o conceito de ϵ – *pseudospectro* apresenta um novo paradigma para projeto de controladores. Essa abordagem não foi explorada para o projeto de controladores na área de sistema de energia elétrica e investigações são necessárias para provar a sua efetividade. O sistema de energia elétrica é um sistema crítico que está exposto à diferentes formas de perturbações. A utilização do conceito de ϵ – *pseudospectro* pode melhorar a robustez dos controladores frente a perturbações de diferentes magnitudes;
- **Paralelização do Algoritmo de Busca Direta:** Os algoritmos de busca direta apresentam problemas de desempenho computacional quando aplicados a sistema de grande porte. O

método multi-direcional utilizado neste trabalho é por concepção projetado para uso em sistemas computacionais paralelos. Nos dias de hoje o baixo custo de plataformas computacionais paralelas também favorecem a sua utilização. A principal vantagem do paralelismo é a diminuição do tempo computacional para o cálculo dos controladores. Devido aos problemas de grande porte encontrados na área de sistemas de energia a paralelização desse algoritmo pode trazer benefícios e merece ser explorada.

APÊNDICE A – MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DE BUSCA DIRETA

No presente anexo são apresentados os detalhes dos métodos de busca direta apresentados neste trabalho. O anexo inicia com a apresentação do método da bússola. Esse método básico não tem fins práticos, porém facilita o entendimento dos princípios fundamentais dos métodos de busca. Em seguida, apresenta-se, em detalhes, o método multi-direcional que foi utilizado para o projeto dos controladores apresentados no Capítulo 7.

A.1 Método da Bússola

Neste item será apresentada uma descrição do algoritmo chamado *compass search* ou método da bússola. Variações deste algoritmo básico podem ser encontrados na literatura com diferentes nomes, incluindo direções alternativas (*alternating directions*), procura por variáveis alternativas (*alternating variable search*), relaxação axial (*axial relaxation*), procura coordenada (*coordinate search*) e variação local (*local variation*). Para um problema de minimização de duas variáveis, o problema pode ser resumido como segue:

1. tente passos para o Leste, Oeste, Norte e Sul;
2. se um desses passos resultar na redução da função, esse ponto torna-se uma nova iteração;
3. em caso de não-redução da função, uma nova iteração é realizada com um passo sendo a metade do anterior.

A Figura 31 ilustra as primeiras cinco iterações do método da bússola aplicado à função f representado pela equação A.1 (KOLDA et al., 2003).

$$\min f(x^{(1)}, x^{(2)}) = |(3 - 2x^{(1)})x^{(1)} - 2x^{(2)} + 1|^{\frac{7}{3}} + |(3 - 2x^{(2)})x^{(2)} - x^{(1)} + 1|^{\frac{7}{3}} \quad (\text{A.1})$$

As curvas de nível da função são apresentadas pelas curvas em cinza, onde $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ representam o primeiro e segundo componentes de $x \in R^2$; x_k representa o ponto da iteração atual. Em cada figura, o ponto púrpura representa a iteração corrente x_k . A iteração atual é o melhor ponto, isto é, o que apresenta o menor valor de f encontrado. Na Figura 31 (a), a procura é iniciada a partir do ponto inicial $x_0 = (-0.9, -1.0)$, e a solução do problema é apresentada por uma estrela vermelha. Cada uma das seis figuras representa uma iteração do método da bússola. Os quatro pontos azuis escuros representam as tentativas consideradas em cada iteração. Inicialmente, o tamanho da cada passo é 0.3. As tentativas da iteração anterior são apresentadas em azul claro para comparação.

Note que, quando x_k aproxima-se da solução, o algoritmo reduz o tamanho do passo. Tipicamente, na prática, o algoritmo é finalizado quando o passo fica abaixo de uma certa tolerância.

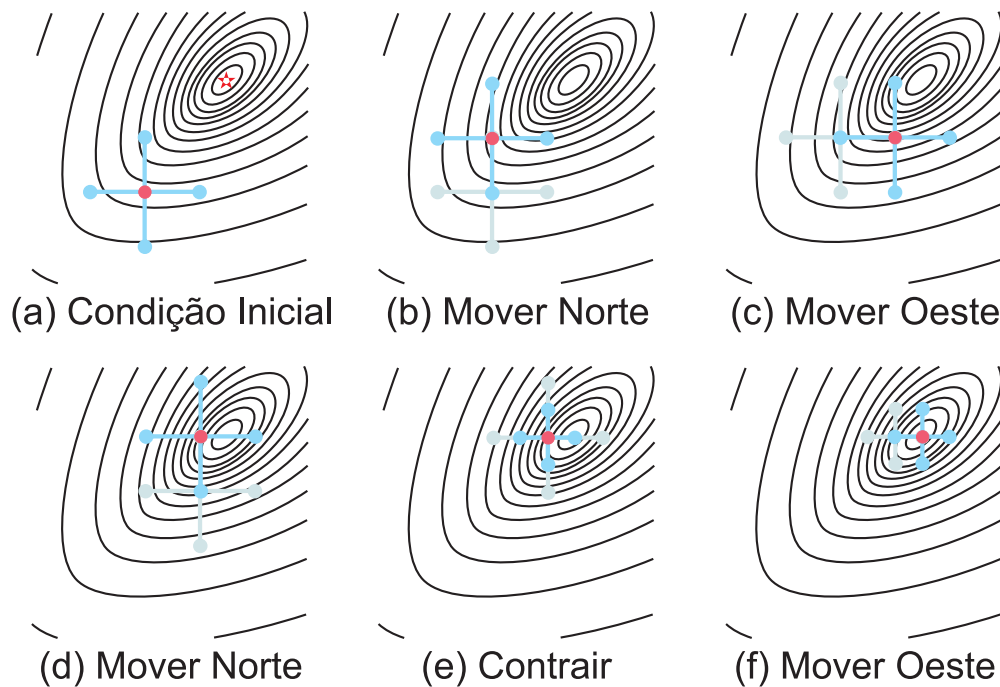


Figura 31: Compass Search aplicado a uma função bidimensional

As vantagens e desvantagens desse método são claras (KOLDA et al., 2003). A vantagem é que o método é fácil de descrever e implementar. Nesse exemplo, inicialmente, o método faz um rápido progresso até a solução. Como desvantagem, cita-se o fato de que, quando a iteração aproxima-se do ponto mínimo, isso somente ficará claro quando o algoritmo reduzir o tamanho do passo, isto é, o algoritmo pode rapidamente se aproximar do mínimo, mas pode ser lento para detectá-lo de fato. Essa é a desvantagem por não se usar explicitamente a informação do gradiente. Uma outra limitação, que não fica evidente nesse exemplo, é que o algoritmo pode

apresentar baixa velocidade de convergência nos intervalos onde as curvas de nível da função f forem extremamente alongados. Como o método não usa a informação da curvatura da função (derivada segunda), o algoritmo pode fazer um bom progresso inicial, mas com a falta de uma informação de alta ordem a sua taxa de convergência pode ser baixa.

A.2 Método Multi-Direcional

O método multidirecional foi utilizado neste trabalho para o projeto do controle central. Esse algoritmo proposto em Torczon (1989) foi inspirado no método simplex de Nelder-Mead. A vantagem desse método comparado com os demais é que o mesmo foi projetado para ser executado usando técnicas de processamento paralelo. Dessa forma, para aplicações de grande porte, como o caso de sistema elétricos, ele pode ser executado em ambiente de processamento de alto desempenho. Devido à necessidade do cálculo do valor da função em n , onde n é a ordem do sistema, pode-se dividir o problema em diferentes processadores para que esses cálculos sejam efetuados paralelamente. O método é descrito como segue:

A.2.1 Descrição do Método

Em qualquer iteração k , onde $k > 0$, o algoritmo de busca multi-direcional requer $n + 1$ pontos, v_0^k, \dots, v_n^k , o qual define um simplex no \mathfrak{R}^n (TORCZON, 1989). Na Figura 32 este triângulo é formado pelos vértices $\langle v_0^k, v_1^k, v_2^k \rangle$. As bordas do simplex são usadas para definir as direções de procura, a orientação das direções de busca, e o tamanho do passo em cada direção.

Inicialmente, calculam-se os valores da função em todos os $n + 1$ vértices do simplex original. Usando as informações da função, o algoritmo verifica o "melhor" vértice no simplex, onde o "melhor" vértice é definido como o que apresenta o menor valor para a função objetivo. Convenciona-se que v_0^k denota o melhor vértice da presente iteração k . Dessa forma, temos o melhor vértice que satisfaz, para $i = 1, \dots, n$:

$$f(v_0^k) \leq f(v_i^k) \quad (\text{A.2})$$

As n bordas conectadas ao melhor vértice determinam a configuração das n direções linearmente independentes de procura. Na Figura 32, as bordas são representadas por $\overline{v_0^k, v_1^k}$ e $\overline{v_0^k, v_2^k}$.

- **Passo Refletido**

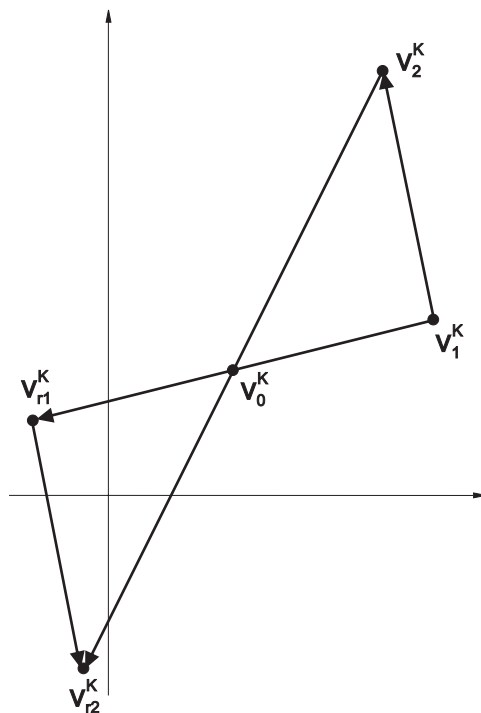


Figura 32: Simplex original e sua reflexão

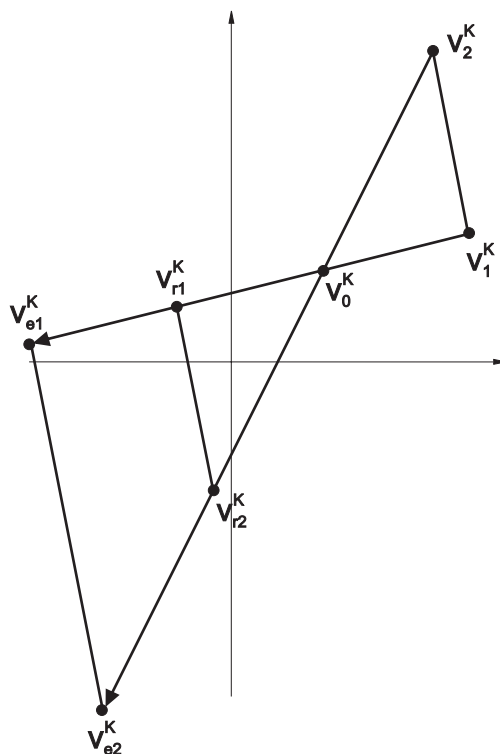


Figura 33: Simplex original com simplex refletido e sua expansão

Assim sendo, o algoritmo realiza um passo a partir do melhor vértice, v_0^k , em cada uma das n direções (TORCZON, 1989). O tamanho de cada passo é igual ao tamanho da borda determi-

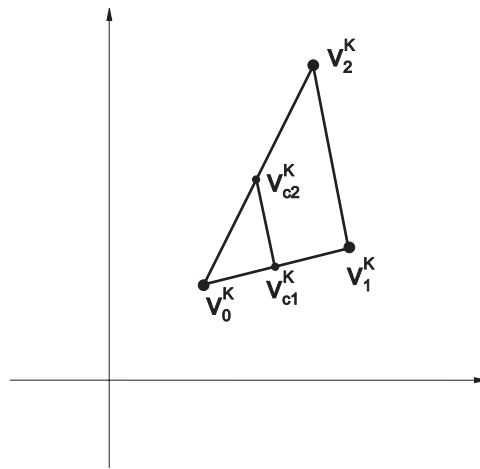


Figura 34: Simplex original e sua contração

nada pela direção de procura. Geometricamente, isso poderia ser visto como uma "reflexão" do simplex original através do melhor vértice, resultando em um novo simplex. O resultado, como pode ser visto na Figura 32, é um novo simplex, $\langle v_0^k, v_{r1}^k, v_{r2}^k \rangle$, que compartilha somente o melhor vértice, v_0^k , com o original simplex, $\langle v_0^k, v_1^k, v_2^k \rangle$. Os ângulos para o novo simplex, e o tamanho de todas as bordas, são as mesmas daquelas do simplex original.

O passo é considerado um sucesso se ele satisfaz o seguinte teste: um dos novos vértices apresenta o valor da função menor que o melhor vértice do simplex original? Especificamente, a seguinte condição deve ser atendida:

$$\min\{f(v_{ri}^k), i = 1, \dots, n\} \leq f(v_0^k) \quad (\text{A.3})$$

A razão para esse teste é direta. Deseja-se que o simplex refletido produza um novo e melhor vértice, isto é, um vértice com um valor de função menor que o corrente melhor vértice, v_0^k . Como pode ser visto na Figura 32, se o melhor vértice não é substituído, então, na iteração seguinte os novos vértices v_{r1}^k, v_{r2}^k , serão refletidos por meio do mesmo melhor vértice, v_0^k , para restaurar a configuração original do simplex, $\langle v_0^k, v_1^k, v_2^k \rangle$. Para checar esse critério, necessita-se calcular o valor da função nos n novos vértices, $\langle v_0^k, v_{r1}^k, v_{r2}^k \rangle$. Nesse ponto, há duas possibilidades: o teste das funções é satisfeito ou não-satisfeito. Em qualquer caso, considera-se um novo simplex, como descrito nas próximas duas seções.

• Passo Expansão

No caso em que um dos vértices satisfaça o teste apresentado em A.3, a questão lógica é: aumentando-se o passo, encontra-se uma melhor condição? Para responder esta questão,

o algoritmo realiza um novo passo a partir do melhor vértice, v_0^k , na mesma direção original, mas com um passo duas vezes maior. Geometricamente, como mostrado na Figura 33, o algoritmo expande a tentativa de um novo simplex dobrando o tamanho do comprimento de borda e gerando um novo simplex representado por $\langle v_0^k, v_{e1}^k, v_{e2}^k \rangle$.

Para considerar o simplex expandido deve-se verificar se o novo simplex aumenta ou diminui o valor da função obtida com o passo original. Para essa verificação, a seguinte condição deverá ser atendida.

$$\min\{f(v_{ei}^k), i = 1, \dots, n\} \leq \min\{f(v_{ri}^k), i = 1, \dots, n\} \quad (\text{A.4})$$

Se o simplex expandido é aceito, a próxima iteração começa com o simplex $\langle v_0^k, v_{e1}^k, v_{e2}^k \rangle$. Entretanto, deve-se notar que o passo expandido somente será considerado se a condição A.2 for satisfeita.

• Passo Contraído

Se nenhum dos novos vértices do simplex refletido satisfazer o critério A.2, o algoritmo diminui pela metade o valor do passo. Geometricamente isto pode ser visto na Figura 34, o algoritmo simplesmente "contraí" o simplex original a partir do melhor vértice, v_0^k . O algoritmo começa a nova iteração com um simplex contraído $\langle v_0^k, v_{c1}^k, \dots, v_{cn}^k \rangle$.

Antes de partir para a próxima iteração, deve-se testar se algum dos novos vértices do simplex contraído satisfaz a condição:

$$\min\{f(v_{ci}^k), i = 1, \dots, n\} \leq f(v_0^k) \quad (\text{A.5})$$

Os valores da função são calculados para cada vértice do simplex contraído. Se a condição A.5 é satisfeita, o algoritmo começa a próxima iteração com um novo melhor vértice. Se a condição não for satisfeita uma nova iteração é realizada a partir do melhor vértice, v_0^k , usando as mesmas direções da iteração anterior. Nesta iteração, entretanto, com um passo reduzido pela metade.

• Algoritmo

Considerando-se, S_0 , com vértices $\langle v_0^0, v_1^0, \dots, v_n^0 \rangle$, tem-se.

1. $\min\{f(v_i^0), i = 1, \dots, n\}$;

2. Faça v_{min}^0 e v_0^0 ;
3. Para $k = 0, \dots, n$;
4. Para $i = 1, \dots, n$;
 - a. Para $l = 1, 2, \dots, n$;
 - b. $v_i^{k+1} \leftarrow 2v_0^k - v_i^k$;
 - c. Calcule $f(v_i^{k+1})$;
 - d. Se $\min\{f(v_i^{k+1}), i = 1, \dots, n\} \leq f(v_0^k)$ então;
 - e. Para $i = 1, \dots, n$;
 - f. $v_e^k \leftarrow v_0^k + v_i^{k+1}$;
 - g. Calcule $f(v_{ei}^k)$ para $i = 1, \dots, n$;
 - h. Se $\min\{f(v_{ei}^k), i = 1, \dots, n\} \leq \min\{f(v_i^{k+1}), i = 1, \dots, n\}$ então $v_i^{k+1} \leftarrow v_{ei}^k, i = 1, \dots, n$;
 - i. Para $i = 1, \dots, n$; $v_i^{k+1} \leftarrow v_0^k - v_i^{k+1}, i = 1, \dots, n$, calcule $f(v_i^{k+1})$ para $i = 1, \dots, n$;
 - j. Fim Se;
5. $\min\{f(v_i^{k+1}), i = 1, \dots, n\}$;
6. Se $f(v_{min}^{k+1}) < f(v_0^k)$ faça v_{min}^{K+1} e v_0^k ;

A.2.2 Aplicabilidade dos Métodos de Procura Direta

Como mencionado anteriormente, os métodos de procura direta foram populares para problemas de otimização numérica, em grande parte, por serem de rápida implementação e não requererem o uso de derivadas. Nenhuma dessas vantagens são necessariamente motivo para se deixar de usar os sofisticados métodos de otimização, baseados em derivadas, desenvolvidos nos últimos anos. Opções para estimação de gradientes e/ou Hessiana são largamente disponíveis e fáceis de usar. Atualmente, há ferramentas automáticas de cálculo de diferenças e linguagens para calcular derivadas automaticamente. Dessa forma, o usuário precisa somente implementar o procedimento de cálculo da função objetivo.

Desse modo, como primeira alternativa, para a solução de um problema de otimização, deve-se utilizar os métodos baseados em gradiente. Se as derivadas segundas são disponíveis, a melhor escolha será um método baseado em Newton (KOLDA et al., 2003).

Os métodos de procura direta têm o seu nicho específico em problemas de difícil resolução, onde os métodos baseados em gradiente não apresentam a resposta desejada.

A.2.3 Limitações dos Métodos de Procura Direta

As principais desvantagens dos métodos de procura direta estão na comentada baixa velocidade de convergência e com relação a problemas de grande porte. Com o aumento do número de variáveis do problema, o desempenho do método podera cair. Mesmo assim, os métodos de procura direta apresentaram sucesso para problemas com algumas centenas de variáveis. Adicionalmente, eles podem, talvez, ser a única tentativa para problemas de difícil solução. No caso de sistemas de elétricos, métodos de redução de ordem poderiam ser utilizados juntamente com técnicas de processamento paralelo (método multi-direcional).

A.3 Implementação Computacional- Busca Direta

Os métodos utilizados neste trabalho foram baseados no *Matrix Computation Toolbox* para Matlab desenvolvido e apresentado em Higham (1993). Os métodos utilizados foram:

- método de busca multi-direcional;
- método das direções alternativas;
- método simplex Nelder-Mead.

mais informações relacionadas a esses métodos poderão ser encontradas em Higham (2002b). Métodos diretos são também descritos em Higham (2002a).

O problema original está formulado para o problema de minimização da abscissa spectral¹. Dadas as características dos sistemas elétricos que geralmente apresentam autovalores reais perto do eixo imaginário, alterou-se a implementação para que a função objetivo considere o máximo amortecimento dos autovalores.

¹A abscissa spectral de uma matrix é a máxima parte real dos seus autovalores.

APÊNDICE B – GRADIENTE AMOSTRADO

O método do gradiente amostrado (*gradient sampling* - GS), originalmente apresentado em Burke et al. (2002) e, apresentado em detalhes, em Burke et al. (2003c), foi desenvolvido para a otimização de funções não-convexas e não-suaves. Como principal motivação para o desenvolvimento do método, destaca-se o fato de que os métodos baseados no gradiente falham quando aplicados a funções não-suaves, sendo elas convexas ou não. A dificuldade fundamental é que, para funções objetivos não-suaves, em caso de não-existência do gradiente, o método fica sem alternativas para encontrar o ponto de mínimo.

Para os casos em que a função é não-suave, porém convexa, os algoritmos de feixes (*bundle algorithms*) são especialmente efetivos. Esses algoritmos são baseados no conceito de ε -subdiferencial (TOMASTIK; ZHANG, 1996), definido como uma configuração de subgradientes, nos pontos da vizinhança do ponto \mathbf{x} . O parâmetro escalar $\varepsilon > 0$ especifica o tamanho da vizinhança: um grande valor de ε implica em uma grande vizinhança. Da posse deste conjunto de gradientes este método seleciona o gradiente de maior valor como direção de descida. Dessa forma, no caso de falha do gradiente no ponto o algoritmo pode fazer uso da informação da vizinhança para escolher a sua direção de descida e encontrar o ponto de mínimo. Entretanto, quando considera-se funções não convexas, a informação do gradiente só é significativa localmente. Logo, a sua aplicação, para funções não-convexas, é muito mais complicada no caso não-convexo, onde a informação do gradiente não é uma garantia de direção no sentido do ponto mínimo da função.

No sentido de contornar esse problema, Burke et al. (2002) propõem uma nova maneira de se calcular a direção de descida. O princípio básico é o mesmo do método de *bundle*,¹ tendo como diferença, a maneira de se calcular a direção de descida \mathbf{d} . No *gradient sampling*, a direção de descida \mathbf{d} é calculada como a combinação convexa dos gradientes com a minimização da norma-2, por meio de um programa de minimização quadrática. Da mesma forma, que, nos métodos diretos, o tamanho da vizinhança é dimensionado por uma distribuição uniforme definida pelo parâmetro ε . Eventualmente, em alguma iteração, o algoritmo encontra o valor

¹Utilizam-se os mesmos conceitos de amostragem do gradiente na vizinhança do ponto \mathbf{x} .

zero para o gradiente resultante. Nesse ponto, a otimização é reiniciada, com um menor valor de ε .

Para ilustrar a idéia geral do método considere o exemplo no qual as curvas de nível são apresentadas na Figura 35 (BURKE et al., 2002). Primeiramente, considere um método ordinário de máxima descida, assumindo que, em cada iteração, possa obter-se a derivada. Na Figura 35, as iterações do método do gradiente são representadas por pequenos círculos partindo do ponto $(-1, 1)$.

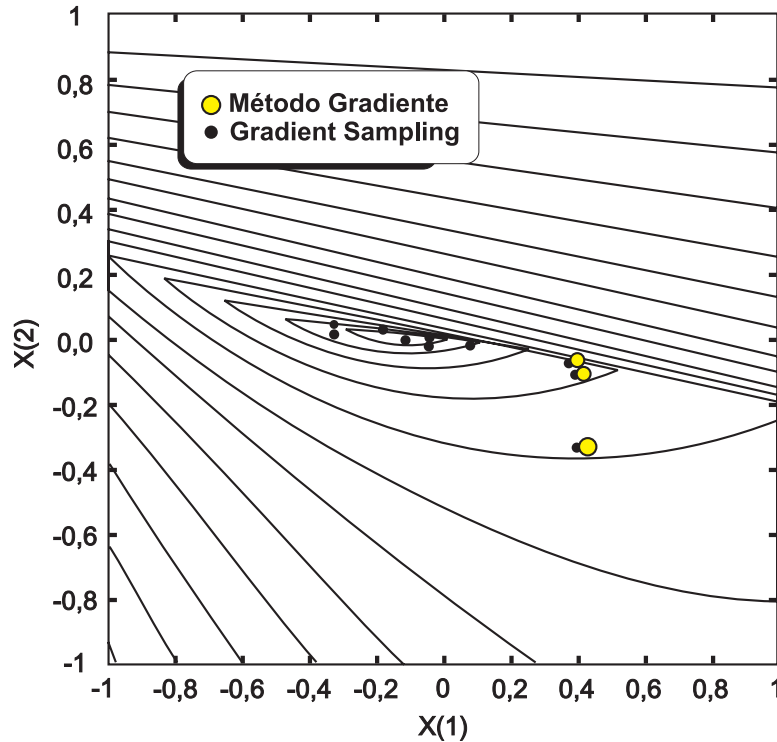


Figura 35: Comparação GS e Método Gradiente

O comportamento apresentado aqui é típico do método do gradiente aplicado a funções não-suaves. No início, o progresso é bom, mas, quando o algoritmo chega a um ponto no qual a função é não-diferenciável, o algoritmo estaciona. As iterações do *gradient sampling* são apresentadas usando asteriscos. Em vez de calcular um gradiente por iteração, o *gradient sampling* considera o conjunto de pontos encontrados na vizinhança da iteração corrente. O progresso inicial do algoritmo é similar ao método do gradiente, porque todos os gradientes do conjunto são qualitativamente similares. Entretanto, quando as iterações se aproximam de regiões onde o método do gradiente estaciona, o método proposto usa a informação de um conjunto de gradientes para encontrar a direção de descida.

O algoritmo, juntamente com a notação utilizada, é apresentado como segue:

Tabela 12: Glossário

k : Iteração Corrente	μ : Redução no raio de amostragem
x^k : Ponto de Iteração	θ : Tolerância de otimalidade para o fator de redução
D : Pontos de Diferenciabilidade	m : Tamanho de amostragem
γ : Reconsidera fator de redução	x^{kj} : Pontos de amostragem
β : Parâmetro de Armijo	g^k : Menor subgradiente aproximado
ε_k : Raio de amostragem	d^k : Direção de procura
v_k : Tolerância de otimalidade	t^k : Tamanho do passo

Passo 0: (Inicialização) Dado x^0 , $\gamma \in (0, 1)$, $\beta \in (0, 1)$, $\varepsilon_0 > 0$, $v_0 \geq 0$, $\mu \in (0, 1]$, $\theta \in (0, 1]$, $k = 0$, e $m \in n + 1, n + 2, \dots$

Passo 1: (Aproximação por GS) Dado $\mu_{k1}, \dots, \mu_{km}$ sejam amostrados independentemente e uniformemente, faça $x^{k0} = x^k$ e $x^{kj} = x^k + \varepsilon_k \mu^{kj}$, $j = 1, \dots, m$. Se para algum $j = 1, \dots, m$ o ponto $x^{kj} \notin D$; de outro modo, faça $G_k = \text{conv} \nabla f(x^{k0}), \nabla f(x^{k1}), \dots, \nabla f(x^{km})$, e vá para o passo 2.

Passo 2: (Calcule a Direção de Procura) Dado $g^k \in G_k$ resolva o problema quadrático dado por $\min_{g \in G_k} \|g\|^2$, isto é, $\|g^k\| = \text{dist}(0|G_k)$ e $g^k \in G_k$. Se $\|g^k\| \leq v_k$, faça $t_k = 0$, $v_{k+1} = \theta v_k$, e $\varepsilon_{k+1} = \mu \varepsilon_k$, e vá para o passo 4; senão, faça $v_{k+1} = v_k$, $\varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k$, e $d^k = -g^k / \|g^k\|$ e vá para o passo 3.

Passo 3: (Compute o tamanho do passo) Faça $t_k = \max \gamma^s$ sujeito a $s \in 0, 1, \dots$ e $f(x^k + \gamma^s d^k) < f(x^k) - \beta \gamma^s \|g^k\|$, e vá para o passo 4.

Passo 4: (Atualize) Se $x^k + t_k d^k \in D$, faça $x^{k+1} = x^k + t_k d^k$, $k = k + 1$, e vá para o passo 1. Se $x^k + t_k d^k \notin D$, dado \hat{x}^k satisfazer $\hat{x}^k + t_k d^k \in D$ e $f(\hat{x}^k + t_k d^k) < f(x^k) - \beta t_k \|g^k\|$. Então faça $x^{k+1} = \hat{x}^k + t_k d^k$, $k = k + 1$, e vá para o passo 1.

B.1 Implementação Computacional - Método Híbrido

Os estudos realizados, no âmbito deste trabalho, consideraram os desenvolvimentos realizados em Burke et al. (2006b). O pacote HIFOO - *A Matlab package for fixed-order controller design and H_∞ optimization*, versão 1.75, é usado para projetar os controladores. HIFOO 1.75 usa um algoritmo híbrido, para otimização não-suave e não-convexa, baseada em técnicas que buscam um controlador de ordem fixa que minimize a norma H_∞ . HIFOO permite que a ordem do controlador seja especificada pelo usuário.

HIFOO é livre e disponível para Matlab e está baseado no pacote de otimização HANSO, de livre acesso, no mesmo local. Esse pacote não requer programas externos ao Matlab *Control*

System Toolbox, porém executa com maior velocidade se a função *linorm* do SLICOT estiver instalada.

REFERÊNCIAS

AL-SUMAIT, J. S.; K., A.-O. A.; SYKULKI, J. K. Application of pattern search method to power system valve-point economic load dispatch. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 29, n. 10, p. 720–730, Nov. 2007.

ALVES, W. F. **Proposition of Test-Systems to Power System Analysis**. Dissertação (Mestrado) — Fluminense Federal University, August 2007.

ANDERSSON, G. et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in north america and europe, and recommended means to improve system dynamic performance. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 20, n. 4, p. 1922–1928, Nov. 2005.

ANGEL, A. D. et al. Estimation of rotor angles of synchronous machines using artificial neural networks and local pmu-based quantities. **Neurocomputing Elsevier International Journal**, v. 70, n. 16-18, p. 2668–2678, October 2007.

ARAÚJO, C. S. et al. Utilização de fasores no sistema interligado nacional. In: **SIMPASE-Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos**. [S.l.: s.n.], 2007.

BALDWIN, T. et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement. **IEEE Transactions on Power System**, v. 8, n. 2, p. 707–715, Nov 1993.

BALLANCE, J. W.; BHARGAVA, B.; RODRIGUEZ, G. D. Monitoring power system dynamics using phasor measurement technology for power system dynamic security assessment. In: **Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna**. [S.l.: s.n.], 2003.

BARREIROS, J. A. L.; SILVA, A. S. e.; COSTA, A. J. A. Simões. A self-tuning generalized predictive power system stabilizer. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 20, n. 3, p. 213–219, 1998.

BEGOVIC, M. M.; PHADKE, A. G. Voltage stability assessment through measurement of a reduced statevector. **IEEE Transactions on Power System**, v. 5, n. 1, p. 198–203, Feb 1990.

BHARGAVA, B. Synchronized phasor measurement system project at southern califórnia edison co. In: **IEEE PES Summer Meeting**. [S.l.: s.n.], 1999.

BLONDEL, V. D.; GEVERS, M.; LINDQUIST, A. Survey on the state of systems and control. **European Journal of Control**, v. 1, p. 5–23, 1995.

BLONDEL, V. D.; TSITSIKLIS, J. N. A survey of computational complexity results in systems control. **Automatica**, v. 36, n. 9, p. 1249–1274, Set. 2000.

BOMFIM, A. L. B.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D. M. Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms. **IEEE Trans. on Power System**, v. 15, n. 1, Feb. 2000.

- BOUKARIM, G. et al. A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 4, p. 1287–1292, November 2000.
- BOYD, S. et al. **Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory**. Philadelphia: Siam Studies in Applied Mathematics, 1994.
- BRUNO, S.; BENEDICTIS, M. D.; SCALA, M. L. Integrating dynamic optimization methodologies with wams technologies. In: **IEEE PES General Meeting, 2007**. Tampa: [s.n.], 2007.
- BURKE, J. V. et al. Stabilization via nonsmooth, nonconvex optimization. **IEEE Trans. on Automatic Control**, v. 51, n. 11, p. 1760–1769, 2006.
- BURKE, J. V. et al. Hifoo - a matlab package for fixed-order controller design and hinf optimization. In: **IFAC Symposium on Robust Control Design Toulouse**. France: [s.n.], 2006.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. Two numerical methods for optimizing matrix stability. **Elsevier Linear Algebra and its Applications**, v. 4, p. 117–145, 2002.
- 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. In: **ELSIIVIER. Proceedings of Fourth IFAC Symposium on Robust Control Design**. [S.l.], 2003. p. 175–181.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. Optimization and pseudospectra with applications to robust stability. **SIAM Optimization Journal**, v. 25, p. 80–104, 2003.
- BURKE, J. V.; LEWIS, A. S.; OVERTON, M. L. A robust gradient sampling algorithm for nonsmooth, nonconvex optimization. **SIAM Optimization Journal**, v. 15, p. 1–42, 2003.
- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. [S.l.]: Springer, 2003.
- CEPEL. **PACDYN User's Manual, Version 6.3**. [S.l.], 2002.
- CHAUDHURI, B.; MAJUMDER, R.; PAL, B. C. Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 19, n. 4, p. 499–506, February 2004.
- CHAUDHURI, B.; MAJUMDER, R.; PAL, B. C. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 19, n. 4, p. 1971–1979, November 2004.
- CHEN, C. L. Optimal wind-thermal generating unit commitment. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 23, n. 1, p. 273–279, Março 2008.
- CHEN, C. L.; CHEN, N. Direct search method for solving economic dispatch problem considering transmission capacity constraints. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 16, n. 4, p. 764–769, Nov. 2001.
- CHEN, H.; GUO, Z.; BAI, H. Wide-area robust H_2/H_∞ control with pole placement for damping inter-area oscillations. In: **IEEE PES General Meeting**. Montreal: [s.n.], 2006.
- CHIALI, M.; GAHINET, P. H design with pole placement constrains: An lmi approach. **IEEE Trans. on Automatic Control**, v. 41, n. 3, p. 358–367, July 1996.

- CHOW, J. H. et al. Power system damping controller design using multiple input signals. **IEEE Control System Magazine**, p. 82–90, August 2000.
- CIGRE. **Working Group C4.601 - Wide-Area monitoring and control for transmission capability enhancement**. [S.l.], 2007.
- DECKER, I. C. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the Brazilian power system. In: **IEEE PES General Meeting**. Montreal, Canada: [s.n.], 2006.
- DECKER, I. C. et al. Synchronized phasor measurement system: Development and applications. In: **IX SEPOPE**. [S.l.: s.n.], 2004.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, v. 88, n. 4, p. 316–327, April 1969.
- DOTTA, D.; SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Power system small-signal angular stability enhancement using synchronized phasor measurements. In: **IEEE PES General Meeting**. Tampa: [s.n.], 2007.
- DOTTA, D.; SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Wide-area measurement based two-level control design considering signal transmission delay. **IEEE Transactions in Power System**, v. 24, p. 208–216, Feb. 2009.
- DU, N. H.; LINH, V. H. Stability radii for linear time-varying differential algebraic equations with respect to dynamic perturbations. **Elsevier Journal of Differential Equation**, v. 230, n. 2, p. 576–599, Aug. 2006.
- DY-LIACCO, T. Control centers are here to stay. **IEEE Computer Applications in Power**, v. 15, n. 4, p. 18–23, Oct. 2002.
- EHRENSPERGER, J. G. **Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, 2004.
- ERNST, D.; PAVELLA, M. Closed-loop transient stability emergency control. In: **IEEE PES Winter Meeting**. [S.l.: s.n.], 2000.
- FINK, L. H.; SON, P. J. M. van. On system control within a restructured industry. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 13, n. 2, p. 611–616, May. 1998.
- FREITAS, F. D. **Ajustes de Estabilizadores de Sistemas de Potência Via Controle Ótimo Com Restrições Estruturais**. Tese (Doutorado), Dezembro 1995.
- GEROMEL, J. C. **Methods and Techniques for Decentralized Control Systems: Analysis and Design**. Milano, Italy: Ed. Clup, 1987.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine-Learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.
- GRONDIN, R. et al. Modeling and closed-loop validation of a new pss concept, the multi-band pss. In: **IEEE PES General Meeting 2003**. [S.l.: s.n.], 2003.

- HAUER, J. F.; BESHIR, M. J. Dynamic performance validation in the western power system. In: **WSCC Performance Validation Task Force**. Alberta: [s.n.], 2000.
- HENICHE, A.; KAMWA, I. Control loops selection to damp inter-area oscillations of electrical networks. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 17, n. 2, p. 378–384, May 2002.
- HENRION, D. Solving static output feedback problems by direct search optimization. In: **IEEE Conference on Computer Aided Systems Design**. Germany: [s.n.], 2006.
- HIGHAM, N. J. **Optimization by direct search in matrix computations**. [S.l.]: SIAM, 1993.
- HIGHAM, N. J. **Accuracy and Stability of Numerical Algorithms**. [S.l.]: SIAM, 2002.
- HIGHAM, N. J. The matrix computation toolbox. version 1.2. www.ma.man.ac.uk/higham/mctoolbox, Set. 2002.
- HIRANO, S. et al. Functional design for a system-wide multivariable damping controller. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1127–1136, Nov 1990.
- HU, X.; SUN Y., Z. J. Power system stabilizer with synthesized speed deviation signal. In: **IEEE PES General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2005.
- HU, Y.; CENTENO, V. **ONS PMS System Architecture Design**. [S.l.], 2006.
- HU, Z.; MILANOVIC, J. V. The effectiveness of WAM based adaptive supervisory controller for global stabilization of power systems. In: **IEEE Power Tech'07 Conference**. Lausanne, Switzerland: [s.n.], 2007.
- HUANG, Y.; XU, Z. HvdC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units. In: **IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004**. [S.l.: s.n.], 2004.
- JINYU, X. et al. Framework of synchronous dynamic security monitoring system based on pmu. In: **Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna**. [S.l.: s.n.], 2003.
- KAMWA, I.; GRONDIN, R. Pmu configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 17, n. 2, p. 385–394, May 2002.
- KAMWA, I. et al. Large-scale active-load modulation for angle stability improvement. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 14, n. 2, p. 582–590, May 1999.
- KAMWA, I.; GRONDIN, R.; HÉBERT, 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, February 2001.
- KAMWA, I.; TRUDEL, G.; LAJOIE, L. G. Robust design and coordination of multiple damping controllers using nonlinear constrained optimization. **IEEE Trans. on Power System**, v. 15, n. 3, Aug. 2000.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In: **Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks**. Piscataway, USA: [s.n.], 1995.

KLUMP, R.; WILSON, R. E.; MARTIN, K. E. Visualizing real-time security threats using hybrid scada/pmu measurement displays. In: **Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences**. Hawaii: [s.n.], 2005.

KOLDA, T. G.; LEWIS, R. M.; TORCZON, V. Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods. **SIAM review**, v. 45, n. 3, p. 385–482, Aug. 2003.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, may 2004.

LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers - Parts 1/3. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, v. 100, p. 3017–3046, June 1981.

LAUB, A. J. et al. Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms. **IEEE Trans. on Automatic Control**, v. 32, n. 2, p. 115–122, Feb 1987.

LI, H. et al. Implement of on-line transient stability control pre-decision in wide-area measurement system in jiangsu power network. In: **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**. China: [s.n.], 2005.

LIU, C. W. Phasor measurement applications in taiwan. In: **Proceedings 2002. IEEE Transmission and Distribution Conference**. [S.l.: s.n.], 2002.

MARINI, R. L. V. **Uso de medição fasorial sincronizada visando a melhoria da estabilidade de sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, August 2005.

MARTINEZ, C. et al. **Phasor Data Requirments; Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection**. [S.l.], 2005.

MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems. In: **IEEE/PES Symposium on Applications of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods**. [S.l.: s.n.], 1989.

MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 5, p. 1455–1469, 1990.

MIN, Y. Phasor measurement applications in china. In: **Proceedings 2002. IEEE Transmission and Distribution Conference**. [S.l.: s.n.], 2002.

MOORE, B. C. Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability, and model reduction. **IEEE Trans. on Automatic Control**, v. 26, n. 3, p. 17–32, 1981.

MORISON, K.; WANG, L. ; KUNDUR, P. Power system security assessment. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 2, n. 5, p. 30–39, Sep. 2004.

NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M.; FELIACHI, A. Communication delays in wide area measurement systems. In: **Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, 2002**. [S.l.: s.n.], 2002.

- NERC. **Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canadá: Causes and Recommendations**. [S.l.], 2004.
- NI, H.; HEYDT, G. T.; MILI, L. Power system stability agents using robust wide-area control. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1123–1131, november 2002.
- NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. **Control of Dead Time Processes**. [S.l.]: Springer-Verlag, 2007.
- OKOU, F. A. et al. Smith prediction approach for the design of a robust wide-area measurements based hierarchical controller. In: **Proc. IEEE PES General Meeting**. San Francisco: [s.n.], 2005.
- OKUO, F.; DESSAINT, L. A.; O., A. Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1465–1477, August 2005.
- PANDA, S.; PANDHY, N. P. Comparasion of particle swarm optimization and genetic algorithm of tcsc-based controller design. **International Journal of Computer Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 41–49, Fev 2007.
- PATEL, R.; MUNRO, N. **Multivariable System Theory and Design**. [S.l.]: Pergamon Press, 1982.
- PELLANDA, P. C.; APKARIAN, P.; MARTINS, N. Tuning structurally constrained stabilizers for large power systems via nonsmooth multi-directional search. In: **Proceedings of the XII Latin-American Congress on Automatic Control**. Salvador: [s.n.], 2006.
- PENA, H. E. **Controle Descentralizado ótimo para o Projeto e Coordenação de Sinais Estabilizadores de Sistemas de Potência**. Tese (Doutorado), Agosto 1992.
- PHADKE, A. G. The wide world of wide-area measurement. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 6, n. 5, p. 52–65, Set. 2008.
- RAMOS, R. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. A new methodology for the coordinates design of robust decentralized power system damping controllers. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 69–79, 2004.
- SAMUELSSON, O. Load modulation for damping of electro-mechanical oscillations. In: **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001**. [S.l.: s.n.], 2001.
- SAMUELSSON, O. et al. Power system damping in Iceland based on phasor measurements. In: **Power Systems Infrastructures for the Future**. Beijing: [s.n.], 2002.
- SANCHEZ-GASCA, J. J.; CHOW, J. H. Power system reduction to simplify the design of damping controllers for interarea oscillations. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 11, n. 3, p. 1342–1349, August 1996.
- SANCHEZ-GASCA, J. J. et al. Multivariable control for damping interarea oscillations in power systems. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 9, n. 1, p. 28–32, Jan. 1989.
- SANTOS, M. M. **Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência usando dados de medição fasorial sincronizada**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, 2008.

- SCAVONI, F. E. et al. Design of robust power system controllers using linear matrix inequalities. In: **2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2001.
- SCHERER, C. Multiobjective H_2/H_∞ control. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 40, n. 9, p. 1054–1062, Set. 1995.
- SCHERER, C. Lower bounds in multi-objective H_2/H_∞ problems. In: **Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control**. [S.l.: s.n.], 1999.
- SCHERER, C. An efficient solution to multi-objective control problems with lmi objectives. **Systems and Control Letters**, v. 40, p. 43–57, 2000.
- SILVA, A. S.; SIMÕES-COSTA, A. J. A. **Controle de Sistemas de Potência**. [S.l.], 2004.
- SIMÕES-COSTA, A. J. A.; FREITAS, F. D.; SILVA, A. S. e. Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 12, p. 144–152, February 1997.
- SIMÕES-COSTA, A. J. A.; SALGADO, R. S.; MACHADO, L. J. B. **Análise de Segurança de Sistema de Potência**. [S.l.], 1995.
- SIMO, J. B.; KAMWA, I.; TAHAN, S. A. Validation of a new modal performance measure for flexible controllers design. **IEEE Trans. on Power System**, v. 11, n. 2, p. 819–826, May 1996.
- STAHLHUT, J. W. et al. Latency viewed as a stochastic process. **IEEE Trans. on Power Systems**, p. 84–91, February 2008.
- TANG, G. Y.; LUO, Z. W. Suboptimal control of linear systems with state time-delays. In: **IEEE SMC '99 Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1999.
- TAYLOR, C. W. et al. WACS wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration. **Proceeding of the IEEE**, v. 93, n. 5, p. 892–906, May 2005.
- TOMASTIK, R. N.; ZHANG, D. A reduced-complexity bundle method for maximizing concave nonsmooth functions. In: **Proceedings of the Conference on Decision and Control**. Japan: [s.n.], 1996.
- TORCZON, V. On the convergence of the multidirectional search algorithm. **Siam J. Optimization**, v. 1, p. 123–145, 1991.
- TORCZON, V. J. **Multi-directional search: A direct search algorithm for parallel machines**. Tese (Doutorado) — Rice University, 1989.
- UYSAL, O.; BULKAN, S. Comparison of genetic algorithm and particle swarm optimization for bicriteria permutation flowshop scheduling problem. **International Journal of Computational Intelligence Research**, v. 4, n. 2, p. 159–162, Fev 2008.
- VAJTA, M. Some remarks on Padé approximations. In: **3rd TEMPUS-INTCOM Symposium**. Veszprém, Hungary: [s.n.], 2005.
- WANG, Y. J.; LIU, C. W.; LIU, Y. H. A pmu based special protection scheme: a case study of taiwan power system. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 27, n. 3, p. 215–223, Dec. 2004.

- WHIDBORNE, J. F.; POSTLETHWAITE, I.; GU, D. W. A mixed optimization approach to multibjective computer-aided control system design. In: **Proceedings of the Computer-Aided Control System Design**. USA: [s.n.], 1996.
- WILSON, D. H. Wide-area measurement and control for dynamic stability. In: **PES General Meeting 2007**. USA: [s.n.], 2007.
- WU, H.; HEYDT, G. T. Design of delayed-input wide area power system stabilizer using gain scheduling method. In: **IEEE PES General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2003.
- WU, H.; KONSTANTINOS, S. T.; HEYDT, G. T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. **IEEE Trans. on Power Systems**, p. 1935–1941, November 2004.
- XIE, X. et al. WAMS application in chinese power system. **IEEE Power and Energy Magazine**, p. 54–63, January 2006.
- YI, K. K.; CHOO, J. B.; YOON, S. H. Development of wide area measurement and dynamic security assessment systems in korea. In: **Proceedings 2001 IEEE PES Summer Meeting**. [S.l.: s.n.], 2001.
- ZHANG, P. et al. Selection of locations and input signals for multiple svc damping controllers in large scale power systems. In: **IEEE PES Winter Meeting**. USA: [s.n.], 1998. p. 667–670.
- ZHANG, Y.; BOSE, A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 23, n. 3, p. 1136–1143, Aug. 2008.
- ZIMA, M.; ANDERSSON, G. Stability assessment and emergency control method using trajectory sensitivities. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**. Bologna: [s.n.], 2003.
- ZIMA, M. et al. Design aspects for wide-area monitoring and control systems. **Proceedings of IEEE**, v. 93, n. 5, p. 980–996, May 2005.