

ROBSON LUIS VALIM MARINI

**USO DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA
VISANDO A MELHORIA DA ESTABILIDADE
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**FLORIANÓPOLIS - SC
2005**

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

USO DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA
VISANDO A MELHORIA DA ESTABILIDADE
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

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

ROBSON LUIS VALIM MARINI

Florianópolis, julho de 2005.

USO DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA VISANDO A MELHORIA DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

ROBSON LUIS VALIM MARINI

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas Elétricos de Potência*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

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

Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Presidente

Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

Prof. Arlan Luiz Bettioli, D.S.A

Its time to die. Its time to live. Its to meet the maker. . .

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Aguinaldo Silveira e Silva, Ildemar Cassana Decker, Antônio Simões Costa e Hanz Helmut Zürn, pela confiança a mim atribuída e por terem contribuído muito no meu crescimento profissional ao longo dos anos de graduação e de pós-graduação. Em especial ao Prof. Aguinaldo que desde o primeiro encontro (disciplina de Sistemas de Controle) me transmitiu a afeição por Controle. E em especial ao Prof. Decker por ter investido em meu trabalho dentro do projeto MEDFASEE.

Aos meus pais, Luiz Silveira Marini e Cleusa Valim Marini por tudo o que me ensinaram de bom. Também ao meu irmão Raphael, pelos vários vizinhos que atormentamos com nossos ensaios.

Ao Iron Maiden por ter me dado tanto entretenimento ao longo destes 16 anos. A minha vida seria bem diferente sem vocês. Embora vocês nunca venham a saber disto. Up The Irons...

Aos colegas de Labspot, Alexandre deMarco, Ailton Campos, Diego Moraes, Marco Marin e Juliano Silva. Obrigado por todas as caneladas no futebol das quartas, as piadas sobre o Reginaldo Rossi e também por todos os bons momentos nos diversos churrascos na casa do Juliano. As colegas Samantha Figueiredo, Sandra Nakanishi e Mariana Carneiro, pelas inúmeras horas de estudo em conjunto e pelas várias conversas sobre os mais diversos assuntos. Obrigado também ao Guitar Hero Alexandre Zucarato por ter sido sempre um grande amigo e por todos os solos que tocamos juntos.

♡ À minha filha Bruna pelo amor sempre sincero e incontestável ♡

♡ À minha namorada Francine Lunardi, por todo o suporte e carinho dedicados a mim ♡

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro.

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

**USO DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA
VISANDO A MELHORIA DA ESTABILIDADE
DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
ROBSON LUIS VALIM MARINI**

Julho/2005

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

Área de Concentração: Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência

Palavras-chave: Unidade de Medição Fasorial (PMU), Estabilidade a Pequenas Perturbações, Controle Ótimo, Prony

Número de Páginas: xiii + 98

O presente trabalho de dissertação aborda o uso de sistemas de medição fasorial sincronizada para a melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência. A estabilidade angular é abordada tanto sob o ponto de vista da estabilidade transitória quanto da estabilidade para pequenas perturbações.

Os custos das unidades de medição fasorial e dos meios de comunicação associados limitam o número de unidades, tornando necessária a escolha de localizações que maximizem o conteúdo da informação adquirida sobre os fenômenos de natureza transitória e também sobre os modos de oscilação eletromecânica do sistema, ou que minimizem a redundância contida na informação proveniente dos sinais obtidos através das unidades de medição fasorial (PMUs). Este trabalho aborda algumas das técnicas possíveis para uma escolha adequada destas localizações baseada em diferentes critérios de alocação.

O trabalho descrito nesta dissertação faz parte de um projeto mais amplo de desenvolvimento (MEDFASEE) e uso de medições fasoriais em sistemas elétricos realizado a partir da colaboração entre universidade e fabricante, e que contempla a construção e instalação de protótipos, desenvolvimento de aplicações e testes em sistemas reais.

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento e implementação de ferramentas computacionais para apoio nas diversas aplicações mencionadas acima. Aborda-se também a síntese de controladores cujas estruturas permitem o uso de sinais locais e remotos. Atrasos de tempo envolvidos na disponibilização dos sinais remotos e perda de elos de comunicação são considerados.

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

POWER SYSTEMS STABILITY IMPROVEMENT USING SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENT SYSTEMS

ROBSON LUIS VALIM MARINI

July/2005

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

Area of Concentration: Power System Dynamics

Key words: Phasor Measurement Unit (PMU), Small Signal Stability, Optimal Control, Prony

Number of Pages: xiii + 98

The following masters' research work proposes the use of synchronized phasor measurement units to improve power system's dynamic performance. Angular stability is studied under both the small signal and the transient stability approaches.

Phasor measurement units demand high capital costs in terms of equipment, maintenance and a suitable information management. These financial restrictions limit the number of units to be installed in a given power system. Therefore, the number of units must be minimized and the content of the information acquired must be maximized. This work presents possible phasor measurement unit placement techniques based on different criteria: angular coherency for transient stability and the system's modal content through a small-signal stability analysis based criterion.

This work is part of a larger project involving the development and use of synchronized phasor measurements in power systems. In this project, universities and manufacturing companies are working together in order to design units and develop applications as well as to build and install prototypes in real systems.

Finally, this work proposes the development and implementation of computational tools in order to support the applications stated above. The tools also check for control systems design considering fixed time delay involving the transmission of remote signals and possible loss of communication links .

Sumário

1	Introdução	1
2	Medição Fasorial Sincronizada	6
2.1	Introdução	6
2.2	Estrutura de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada	7
2.2.1	PMU	7
2.2.2	PDC	8
2.2.3	GPS	8
2.2.4	Links de Comunicação	9
2.3	Aplicações Gerais	9
2.4	Conclusão	11
3	Alocação de PMUs	12
3.1	O Problema do Posicionamento de PMUs em Sistemas Elétricos de Potência	12
3.2	Formação da Matriz de Informação	15
3.2.1	Matriz de Sinais	15
3.2.2	Matriz de Entropia	15
3.2.3	Índices de Coerência	17
3.2.4	Índices de Observabilidade	18
3.2.5	Análise de Prony	23
3.3	Algoritmo de Alocação de PMUs	27

3.3.1	Formulação do Problema para a Alocação Seqüencial	28
3.3.2	Solução do Problema via <i>Greedy Optimization</i>	32
3.3.3	Maximização da Quantidade de Informações via Adição Seqüencial [26]	34
3.3.4	Minimização das Perdas de Informações via Eliminação Seqüencial [26]	35
3.4	Conclusão	37
4	Aplicações de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada em Sistemas Elétricos de Potência	38
4.1	Introdução	38
4.2	Estabilidade para Pequenos Sinais	38
4.2.1	Estrutura Convencional de PSS	39
4.2.2	Estrutura de PSS com Sinal Remoto	41
4.2.3	Atrasos de Comunicação	44
4.2.4	Métodos de Projeto	44
4.3	Estabilidade Transitória	51
4.4	Estabilidade de Tensão	54
4.5	Conclusão	57
5	Resultados	58
5.1	Introdução	58
5.2	Sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste Modificado	58
5.2.1	Posicionamento de PMUs	60
5.2.2	Controle da Estabilidade para Pequenas Perturbações	63
5.3	Sistema Teste New England	71
5.3.1	Posicionamento de PMUs	71
5.3.2	Controle da Estabilidade para Pequenas Perturbações	82
5.4	Conclusão	88

6	Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos	90
A	Dados dos Sistemas Teste	99
A.1	Sistema Teste New England	99
A.1.1	Dados de Barra	100
A.1.2	Dados de Linha	102
A.1.3	Dados dos Geradores Síncronos	103
A.1.4	Dados dos Reguladores de Tensão	104
A.2	Sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste	104
A.2.1	Dados de Barra	105
A.2.2	Dados de Linha	105
A.2.3	Dados dos Geradores Síncronos	106
B	Programa Computacional	108
C	Siglas	114

Lista de Figuras

4.1	Estrutura convencional de PSS com sinal local.	41
4.2	Estrutura de PSS com sinal local e remoto.	42
4.3	Estrutura de controle multi-sinal.	42
4.4	Estrutura de controle multi-entrada.	43
4.5	Diagrama de blocos do sistema aumentado.	48
5.1	Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado.	59
5.2	Quantidade de informação à cada barra adicionada.	63
5.3	Análise modal dos modos 1, de 0.86 Hz e 2, de 0.94 Hz.	65
5.4	Sistema com controladores multi-Sinal e multi-Entrada.	66
5.5	Configuração do Sistema Teste New England.	72
5.6	Variação angular nodal após perturbação.	73
5.7	Acréscimo de informação à cada PMU adicionada.	74
5.8	Configuração de PMUs do Sistema New England.	75
5.9	Desvio de velocidade das máquinas após perturbação.	76
5.10	Sinais de velocidade angular ω_{30} medida e estimada.	82
A.1	Configuração do Sistema Teste New England	99
A.2	Diagrama de blocos do modelo de regulador de tensão	104
A.3	Configuração do Sistema Equivalente Sul Sudeste Brasileiro	106
B.1	Posicionamento de PMUs usando respostas temporais	109

B.2	Posicionamento de PMUs usando sinais estimados via análise de Prony . . .	109
B.3	Posicionamento de PMUs usando os índices de observabilidade	110
B.4	Posicionamento de PMUs usando respostas temporais	112

Lista de Tabelas

5.1	Autovalores do sistema em malha aberta (sem PSSs).	60
5.2	Variáveis de entrada e saída da função de transferência multivariável.	61
5.3	Posicionamento de PMUs visando o conteúdo modal.	61
5.4	Posicionamento de PMUs usando respostas no tempo.	62
5.5	Pólos e Zeros da FTMA para a máquina de Itaipú - $\omega(s)/V_{ref}(s)$	64
5.6	Variação dos Modos 1 e 2.	67
5.7	Variação dos Modos 1 e 2.	68
5.8	Variação dos Modos 1 e 2.	69
5.9	Variação dos Modos 1 e 2.	70
5.10	Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.	73
5.11	Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.	75
5.12	Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.	76
5.13	Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.	77
5.14	Autovalores do sistema em malha aberta.	77
5.15	Variáveis de entrada e saída da função de transferência multivariável.	78
5.16	Posicionamento de PMUs visando o conteúdo modal.	79
5.17	Índices de observabilidade para os modos 1 e 2, usando sinal de velocidade.	80
5.18	Posicionamento de PMUs usando coeficientes de B	80
5.19	Posicionamento de PMUs usando reconstrução de sinais.	80
5.20	Índices de controlabilidade para os modos 1 e 2, usando sinal de velocidade.	82

5.21	Varição dos Modos 1 e 2.	84
5.22	Varição dos Modos 1 e 2.	85
5.23	Varição do Modo 3.	85
5.24	Varição do Modo 3.	86
5.25	Varição dos Modos 1 e 2.	87
5.26	Varição dos Modos 1 e 2.	87
A.1	Dados de Barra do Sistema Teste New England.	101
A.2	Dados de Carregamento do Sistema Teste New England.	102
A.3	Dados de Linha do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.	103
A.4	Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Teste New England.	104
A.5	Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Teste New England.	104
A.6	Dados de Barra do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.	105
A.7	Dados de Carregamento do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro. . .	105
A.8	Dados de Linha do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.	105
A.9	Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.	107

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos verifica-se um aumento crescente na complexidade da operação de *Sistemas de Energia Elétrica* (SEEs). Esta crescente complexidade está associada a diversos fatores tais como à escassez de recursos aplicados no setor elétrico, às restrições ambientais, à crescente demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia e, em vários países, à introdução de um ambiente de competição entre os diversos agentes.

Com todas estas mudanças, surgem novas figuras dentro da operação de SEE, tais como *agentes de produção* (que visam o lucro como qualquer outra empresa), *comercializadores* (que tratam a energia elétrica como um produto a ser vendido) e *consumidores livres* (que podem escolher o seu fornecedor de energia elétrica). Neste novo cenário, o *operador independente do sistema* (OIS) tem como objetivo o gerenciamento da transmissão de energia comercializada (que é agora tratada como um serviço) entre os agentes produtores e os consumidores, sempre tendo a obrigação de manter níveis adequados de segurança e qualidade de fornecimento de energia elétrica, mesmo diante de eventos não esperados tais como perda de blocos de geração, desligamento de linhas de transmissão, entre outras possíveis contingências.

Diante deste cenário, os centros de controle modernos devem incorporar as melhores e mais promissoras tecnologias disponíveis para suprir a necessidade de um aprimoramento dos instrumentos de monitoração e controle da operação do sistema em tempo real. Dentre as novas tecnologias que vêm sendo propostas, os *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada* (SMFs), baseados em *Unidades de Medição Fasorial* (Phasor Measurement Units - PMUs) têm recebido grande atenção de grupos de pesquisa e da indústria de energia elétrica em âmbito mundial (TVA - *Tennessee Valley Authority*, AEP - *American Electric Power*, SCE - *Southern California Edison*, BPA - *Bonneville Power Administration* nos Estados Unidos [52], EDF - *Electricité de France* na França [14], e outras empresas em países nórdicos [17] tais como Dinamarca [45], Finlândia, Islândia [47], Suécia e Noruega).

Os SMFs fazem uso da tecnologia GPS - *Global Positioning System*, solucionando assim o problema associado à sincronização de sistemas de medição distribuída ao longo de grandes áreas de SEEs. Este problema foi resolvido com a tecnologia GPS, cuja precisão é de aproximadamente 100 ns [16].

Diversas empresas têm mostrado interesse no assunto, instalando PMUs em suas subestações e utilizando os dados obtidos para finalidades específicas, como o registro de perturbações, monitoramento da segurança, controle de emergência, entre outros [16].

Sistemas de medição fasorial sincronizada são compostos pelas unidades de medição fasorial (PMUs), concentrador de dados (PDC), estações de recepção de sinal GPS e elos de comunicação. A descrição dos componentes que compõem um SMF pode ser encontrada em [13], [16] e [41]. Este tipo de sistema possui aplicações em diversas áreas do estudo de sistemas elétricos de potência, podendo ser utilizado como ferramenta de auxílio tanto em aplicações de natureza estática quanto principalmente em problemas de natureza dinâmica, devido ao fato das medidas serem disponibilizadas em tempo real. O desempenho dinâmico tem um papel importante e bastante complexo para a operação de sistemas elétricos de potência, pois como já mencionado, atualmente a tendência atual é que os sistemas operem nos seus limites de capacidade e isto faz com que haja uma degradação nas margens de estabilidade do sistema. Portanto, neste trabalho serão abordados aplicações relacionados à estabilidade transitória e para pequenas perturbações, porém o maior enfoque será dado para a estabilidade para pequenos sinais, pois o objetivo principal do trabalho é estudar e propor meios de se melhorar o desempenho dinâmico do sistema utilizando sistemas de medição fasorial sincronizada.

Nos últimos anos, têm-se demonstrado que o uso de sistemas de medição fasorial sincronizada encontra diversas aplicações com relação a vários aspectos do comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência [10], [33], [47], [55]. No caso da estabilidade transitória, várias são as aplicações usando medições fasoriais, podendo-se citar em especial o uso em relés de perda de sincronismo adaptativo e aplicações envolvendo a execução de ações de controle (alívio de carga, fast turbine valving, resistor de freio, controle de TCSC, entre outros) visando aumentar a margem de estabilidade transitória. A estabilidade de tensão envolvendo sistemas de medição fasorial também foi abordada em alguns trabalhos na literatura ([3], [37] e [7]), tratando de temas tais como predição *online* de colapso de tensão e avaliação da estabilidade de tensão. Mais comentários sobre o envolvimento entre estabilidade de tensão e sistemas de medição fasorial sincronizada serão feitos mais a frente. Para o caso de estabilidade a pequenas perturbações, o uso de medição fasorial traz a possibilidade de utilizar sinais remotos que podem ser usados em controladores que combinam sinais locais e remotos [10]. Isto permite a melhoria do desempenho dinâmico do sistema elétrico sob estudo através do melhor amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos, especialmente de modos cujas áreas de maior observabilidade e controlabilidade não coincidam. Como os sinais têm uma base de tempo comum [41], diferenças de tempo de retardo podem ser consideradas, o que aumenta a robustez do esquema de controle.

Apesar do custo relativamente alto dos dispositivos de sincronização (receptores de sinais de satélite) e também dos equipamentos que compõem um SMF (PMUs, PDC - *Phasor Data Concentrator* e links de comunicação entre PMUs e PDC), estar aparentemente diminuindo devido ao crescente número de aplicações, ainda assim é interessante se investigar métodos para minimizar o número de unidades de medição fasorial a serem instaladas em um sistema. Um exemplo que pode justificar esta idéia pode ser a existência de um comportamento coerente do perfil angular ou até mesmo do perfil de tensão das barras de uma determinada região do sistema sob estudo. Portanto os custos das unidades de medição fasorial, dos meios de comunicação e dos equipamentos de processamento de dados associados, limitam o número de unidades a serem instaladas no sistema, tornando necessária a escolha de localizações adequadas para posicionamento das PMUs.

O presente trabalho de dissertação aborda algumas das possíveis técnicas para uma escolha adequada de posicionamento de PMUs com enfoque para a estabilidade transitória e para a estabilidade para pequenas perturbações, pois o uso de medições fasoriais sincronizadas é aplicado para a melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência [33]. Faz-se um estudo sobre posicionamento de PMUs em sistemas elétricos de potência e como este problema pode trazer contribuições para o desempenho dinâmico do sistema. Um critério de alocação de PMUs para estabilidade transitória é apresentado junto com um estudo demonstrando as potencialidades do uso de SMFs para aplicação em esquemas de controle emergencial. Uma revisão bibliográfica sobre o assunto é apresentada e sugestões para implementações na área são discutidas. Os métodos de posicionamento de PMUs associados a estabilidade para pequenas perturbações levam em consideração o conteúdo modal dos sinais obtidos pelos sensores. Uma destas técnicas faz uso dos índices de observabilidade que podem ser obtidos a partir das equações linearizadas de um sistema ([29] e [35]) e o outro método faz uso da *Análise de Prony* ([43]). A análise de Prony encontra algumas aplicações em sistemas elétricos de potência [22], [23] e tem como função principal realizar a decomposição modal de um conjunto de sinais. As informações obtidas através desta metodologia são usadas para estabelecer um critério de alocação de unidades de medição fasorial sincronizada.

O uso de uma estrutura de controle usando sinais locais e remotos é discutida neste trabalho. Um método é apresentado.

O enfoque do trabalho é a melhoria da dinâmica de sistemas elétricos de potência, portanto os métodos de posicionamento apresentados aqui são para a estabilidade transitória e principalmente para pequenas perturbações, porém existem outros possíveis objetivos para a realização da alocação de PMUs. Como exemplo, pode-se mencionar o posicionamento visando a análise da observabilidade do sistema para aplicações de estimação de estados, a melhoria da estabilidade de tensão e a localização de faltas ([8] e [9]).

Este estudo faz parte de um projeto (MEDFASEE) mais amplo, visando o desenvolvimento e uso de medições fasoriais em sistemas elétricos, realizado a partir da colaboração

entre universidade e fabricante [1]. O projeto MEDFASEE contempla a construção e instalação de protótipos de SMFs para SEEs, desenvolvimento de aplicações e testes em sistemas reais. Todas as PMUs enviarão continuamente os dados lidos para um concentrador (PDC), através de um sistema de transmissão de dados. O PDC fará a aquisição, o tratamento prévio e o armazenamento destes dados em uma base, a qual disponibilizará, de maneira concentrada, os dados relativos às diversas PMUs instaladas no sistema. Aplicações serão executadas em estações de trabalho específicas, e farão uso dos dados de medição fasorial armazenados no PDC.

Os equipamentos de medição (PMUs) farão a leitura de medidas fasoriais de tensão e corrente em sítios remotos. Neste trabalho, far-se-á uso destes sinais remotos em controladores que os combinam com sinais locais, permitindo assim a melhoria do desempenho dinâmico do sistema sob o ponto de vista da estabilidade transitória e da estabilidade para pequenas perturbações.

Este trabalho é organizado como descrito como a seguir:

No Capítulo 2 apresentam-se alguns dos conceitos relacionados aos sistemas de medição fasorial sincronizada. Apresenta-se uma descrição breve sobre SMFs, descrevendo também os demais equipamentos de constituem a estrutura de um SMF. Menciona-se também algumas das aplicações para sistemas elétricos de potência que fazem uso de medições fasoriais sincronizadas.

No Capítulo 3 apresenta-se o problema da alocação de unidades de medição fasorial. Apresenta-se a formulação matemática do problema. Alguns métodos de análise do conteúdo de informação dos sinais adquiridos são apresentados e discutidos. Também neste capítulo apresentam-se as propostas deste trabalho para criação de novos critérios de posicionamento de PMUs.

Apresenta-se a proposta de índice de alocação de PMUs baseado nos índices de observabilidade de um sistema. A descrição e a formulação deste problema é apresentada. Também apresenta-se a descrição do método de Prony, com o intuito de se propor um novo critério para posicionamento de PMUs. A formulação do problema é então apresentada e também demonstra-se as etapas do algoritmo designado para executar a decomposição modal via análise de Prony.

No Capítulo 4 apresentam-se as aplicações desenvolvidas para este trabalho, abordando a estabilidade para pequenas perturbações, a estabilidade transitória e a estabilidade de tensão, porém com maior ênfase na estabilidade para pequenas perturbações. Apresenta-se uma discussão sobre outras aplicações que fazem uso de SMFs em sistemas elétricos de potência. Discutem-se possíveis estruturas de controle que fazem uso de SMFs para viabilizar o uso de sinais remotos. Possíveis métodos de sintonia de controladores usando sinais remotos são abordados. Perda de elos de comunicação e atrasos de tempo também são considerados.

Ainda no Capítulo 4, apresenta-se uma revisão bibliográfica e também sugestões de como fazer uso de SMFs para aplicação em controle de emergência e controle de tensão.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos ao executar as aplicações de posicionamento de PMUs e de controle envolvidas neste trabalho. Dois sistemas teste foram usados nesta seção, sendo estes o sistema teste New England 39 barras e o sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste Modificado.

Finalizando, apresenta-se no Capítulo 6, as conclusões finais do trabalho juntamente com as principais contribuições. Sugestões para trabalhos futuros também são apresentadas.

Os apêndices contém os dados dos sistemas-teste usados neste trabalho e algumas informações sobre os programas desenvolvidos.

Capítulo 2

Medição Fasorial Sincronizada

2.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos relacionados à sistemas de medição fasorial com o objetivo de descrever brevemente estes sistemas. Além da descrição de SMFs e dos equipamentos que o compõem, apresenta-se também uma revisão bibliográfica sobre as aplicações de SMFs nas diversas áreas de atuação de sistemas elétricos de potência.

Os SEEs começaram a ser operados remotamente na década de 60 através dos centros de controle, que executavam funções como o CAG - *Controle Automático de Geração* e o controle supervisão, cujas respectivas funções são o controle de frequência, o controle dos desvios de potência de intercâmbio entre áreas e o controle remoto de abertura e fechamento dos disjuntores para regulação de tensão [51]. Devido à crescente complexidade de operação dos SEEs, houve a necessidade de se desenvolver mais ferramentas de auxílio à operação destes sistemas. Desta forma, baseado no sistema supervisão (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*), desenvolveu-se o sistema de monitoração e controle de segurança, que executa atividades tais como monitoração de segurança, seleção e análise de contingências, controle preventivo, entre outras. Este sistema utiliza uma base de dados (a partir de medidas provenientes do sistema SCADA) que é atualizada em intervalos regulares de tempo, mas que não é de processamento imediato. Sendo assim, devido aos atrasos envolvidos no processamento das medidas através de programas computacionais tais como o Configurator de Rede e o Estimador de Estados, o estado real do sistema não é conhecido, sendo fornecido apenas uma estimativa do estado do sistema, mas a rigor, não exatamente em tempo real.

Com o desenvolvimento do sistema GPS - *Global Positioning System* (sistema de navegação composto por diversos satélites em diferentes órbitas) na década de 90, surgiu a pos-

sibilidade de utilização do sinal de pulso transmitido pelos satélites do sistema GPS, como fonte de sincronização para as medidas fasoriais [41]. O desenvolvimento de sistemas de medições fasoriais tem sido abordado em diversos trabalhos de pesquisa ao longo dos anos [13], [16], [25], [33], [41], [47]. Estes sistemas são compostos por equipamentos chamados PMUs - *Phasor Measurement Units*, e ao contrário do processo de estimação de estados, todas as medidas são realizadas com uma base de tempo comum, disponibilizada pela fonte de sincronização através do sinal de GPS. A partir das tensões nodais complexas, obtidas por estes sistemas de medição, pode-se conhecer o estado real do sistema.

2.2 Estrutura de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada

Além das PMUs, outros equipamentos compõem um sistema de medição fasorial. O sistema também depende de outros dispositivos, como estações de recepção do sinal de GPS, o concentrador de dados (PDC) e links de comunicação entre as PMUs e o PDC.

A seguir, apresenta-se uma descrição sucinta de cada um dos principais equipamentos que compõem um SMF.

2.2.1 PMU

A sigla PMU significa *Phasor Measurement Unit* como já foi descrito anteriormente. A PMU é o elemento base na constituição de um SMF. Estas unidades são sensores que geralmente medem grandezas como tensões trifásicas nas barras e correntes trifásicas nas linhas, transformadores e alimentadores das subestações [16]. A taxa de amostragem para aquisição de dados depende do tipo de aplicação que se deseja executar. Esta taxa pode variar de poucos fasores até várias dezenas de fasores por segundo, dependendo da aplicação. Como exemplo, para aplicações estáticas como a estimação de estados, 1 fasor por segundo é suficiente. Para monitoração, 30 fasores por segundo é um valor adequado. Para aplicações para estabilidade transitória, 60 fasores por segundos são suficientes.

Após a aquisição dos dados através das PMUs, as tensões e correntes complexas de seqüência positiva são calculadas com base na mesma referência temporal. Para que este processo seja executado, utiliza-se como ferramenta a Transformada Discreta de Fourier [41].

Também fazem parte da composição de uma PMU, um sistema de aquisição formado por filtros, um circuito oscilador, um módulo de conversão A/D e um microprocessador que realiza o tratamento matemático das amostras. Cada PMU deve estar acoplada a um equipamento receptor de sinal de GPS [16].

Idealmente seria interessante instalar PMUs em todas as barras do sistema, de tal forma a se obter as tensões complexas de todas as barras do sistema em tempo real, possibilitando

assim se ter o conhecimento do estado real do sistema. Porém, devido às restrições de custo, complexidade de processamento de dados, transmissão dos sinais, entre outras, deve-se minimizar o número de PMUs a serem instaladas em um sistema, de acordo com diferentes critérios de alocação [26], [33], [37], [39].

2.2.2 PDC

O PDC *Phasor Data Concentrator* possui várias funções em um SMF, dentre as quais destacam-se a recepção dos fasores enviados de forma continuada pelas PMUs, o armazenamento dos fasores em uma base de dados própria, a manipulação de eventuais erros de transmissão e o suporte para aplicações on-line e off-line e de monitoração e controle em tempo real. Estas funções são implementadas em rotinas computacionais com níveis de alta, média e baixa prioridade [13].

Outro objetivo do concentrador de dados é executar a organização de forma coerente das medidas fasoriais disponibilizadas pelas unidades de medição fasorial, para posterior disponibilização destas medidas para o uso em outras aplicações, tais como controle para pequenas perturbações, controle de emergência e localização de faltas. É através do concentrador de dados que se reúnem todos os dados (magnitude e ângulo das tensões nodais) obtidos, para se obter o conhecimento do estado de um sistema elétrico de potência em tempo real.

O concentrador de dados é constituído de uma *Unidade de Processamento Central* (CPU) com capacidade suficiente para realizar o tratamento dos dados em tempo real, um disco rígido de memória para a gravação de perturbações, entradas seriais para a recepção das medidas fasoriais e terminais de saída para envio de dados para outros processadores. Todas as funções associadas ao concentrador de dados (formatação, sincronização e transmissão de dados) podem ser realizadas por meio da implementação de rotinas computacionais, executadas com o uso de programas que operam em tempo real.

2.2.3 GPS

Para viabilizar a sincronização dos dados obtidos através das PMUs utiliza-se o sistema GPS (*Global Positioning System*). Esta sincronização de dados se torna possível devido ao fato de que as estações receptoras das PMUs recebem um sinal de um pulso por segundo emitido pelo sistema GPS. Este sinal fornece às PMUs o instante exato em que deve ser feita a aquisição dos dados, de forma sincronizada.

A frequência com que os pulsos são emitidos por satélite através do sistema GPS é muito precisa. O erro no pulso de sincronização é da ordem de $1\mu\text{s}$, e cita-se como exemplo da precisão deste sistema, que ao se considerar a frequência de 60 Hz, com erros no pulso

de sincronização desta ordem, implica na existência de um erro angular da ordem de 0.021° . Portanto, mesmo para as aplicações que necessitam de maior precisão, o sistema GPS atende à estes requisitos.

2.2.4 Links de Comunicação

Os canais de comunicação têm como objetivo a viabilização da transferência de dados entre as PMUs e o PDC, assim como permitir a troca de informações entre PDCs de diferentes áreas. A transmissão dos dados pode ser realizada de diversas maneiras. Pode-se usar tecnologias “convencionais” tais como linhas telefônicas ou redes de baixa e média tensão. Porém sistemas de transmissão de dados modernos também podem ser usados. Dentre estes sistemas, citam-se a tecnologia wireless e a transmissão com cabos de fibras ópticas. Novamente, dependendo das aplicações, pode-se realizar uma melhor escolha com respeito ao tipo de sistema de comunicação deverá ser utilizado.

2.3 Aplicações Gerais

O uso de medições fasoriais encontra um amplo campo de aplicações em sistemas elétricos de potência, tanto com respeito à abordagens estáticas tais como a estimação de estados, quanto principalmente com respeito à problemas de natureza dinâmica, tais como o controle de emergência e a melhoria do desempenho dinâmico dos modos eletromecânicos mal amortecidos.

As medidas são adquiridas pelas PMUs e são enviadas para o concentrador de dados, que tem como função o recebimento e a organização dos dados enviados pelas PMUs. Após o processamento das medidas, o PDC também tem como função a disponibilização das medidas fasoriais para uso em outras aplicações, como por exemplo estimação de estados, localização de faltas, monitoração e controle de sistemas elétricos de potência.

A seguir, são brevemente revistos alguns dos trabalhos que envolvem aplicações com medições fasoriais sincronizadas. Como o enfoque deste trabalho está relacionado com aplicações dinâmicas, principalmente com relação a estabilidade para pequenas perturbações, apresenta-se uma revisão mais detalhada sobre este assunto no Capítulo 4, enquanto que nesta seção apresentam-se alguns exemplos de trabalhos com propostas de aplicações com sistemas de medição fasorial sincronizada.

Em [37], apresentou-se um trabalho que fez uso de medições fasoriais sincronizadas como ferramenta de análise para estudos relacionados a estabilidade de tensão. O objetivo do referido trabalho é desenvolver um método que visa encontrar o conjunto mínimo de PMUs através de um algoritmo de alocação de PMUs, de tal forma a tornar o sistema tanto

linear quanto observável. Após a localização das PMUs, as informações adquiridas por estas, são usadas para auxiliar na tarefa de estimação de estados.

Também com respeito à estimação de estados, em [4] apresenta-se um método para alocação de PMUs visando a estimação estática linear de estados em sistemas elétricos de potência. Métodos baseados neste trabalho foram implementados e apresentados em [36].

Em [7], também apresentou-se um trabalho que fez uso de medições fasoriais sincronizadas para aplicação em controle e monitoração da estabilidade de tensão. O trabalho apresenta uma abordagem que faz uso da teoria de grafos e também da análise de coerência das áreas do sistema. Propôs-se usar os mínimos valores singulares da matriz Jacobiana como indicadores da proximidade da instabilidade de tensão. O objetivo principal do trabalho é demonstrar que pode-se realizar adequadamente a predição da instabilidade de tensão, através do uso de um conjunto reduzido de medidas. Realizam-se comparações com as predições realizadas através de todo o conjunto de medidas. Comenta-se que apesar da tendência de redução do altos custos relacionados aos dispositivos de sincronização e também dos equipamentos que compõem um sistema de medição fasorial sincronizada, devido ao crescente número de aplicações, mesmo assim é interessante investigar meios de minimizar o número de PMUs devido ao fato de que podem existir áreas que se comportam coerentemente com respeito à estabilidade de tensão, permitindo assim a instalação de apenas uma PMU em uma barra piloto adequadamente escolhida.

O conceito de coerência e distância elétrica em sistemas de potência é apresentado em [26], [30] e [48]. Diferentes critérios de coerência são propostos em outros trabalhos [7], [33], [39].

Algoritmos para identificação e localização de faltas em linhas de transmissão (LTs), podem ser implementados com o uso de sistemas de medição fasorial sincronizada. Estes métodos têm como função primeiro a detecção da existência de faltas em LTs, para então aplicar métodos de localização das faltas ocorridas. A vantagem é que com o uso de medição fasorial, pode-se melhorar a precisão no processo de localização. Em ([8] e [9]) apresenta-se uma técnica de localização de faltas em linhas de transmissão usando medição fasorial sincronizada. O trabalho propõe a implementação de um sistema de localização de faltas, baseado em medições fasoriais sincronizadas nas duas extremidades de linhas de transmissão. Vários testes foram efetuados com simulações numéricas em uma linha de transmissão de 230kV modelada através do pacote computacional ATP, sendo que os resultados numéricos demonstraram o bom desempenho do sistema de localização de faltas implementada (erro relativo máximo de 2,90%).

2.4 Conclusão

Neste capítulo, as funções e características dos principais elementos que compõem um sistema de medição fasorial sincronizada foram brevemente descritos. As unidades de medição fasorial, o concentrador de dados e sistema de posicionamento global foram apresentados. Algumas aplicações gerais foram descritas, com o objetivo de mostrar a importância do uso de sistemas de transferência de dados sincronizados com alta taxa de amostragem.

Na próximo capítulo, os métodos de posicionamento de unidades de medição fasorial sincronizada serão apresentados. Diferentes formas de analisar as informações adquiridas com PMUs serão abordadas.

Capítulo 3

Alocação de PMUs

Este capítulo é dedicado à formulação e descrição matemática do problema de posicionamento de PMUs. Apresentam-se os objetivos da alocação de PMUs e também a formulação associada ao problema. Alguns métodos de análise de diferentes matrizes de informação são apresentados e também alguns critérios de alocação já disponíveis na literatura são descritos. Novos critérios de formação de índices de alocação, também são propostos.

Neste capítulo aborda-se o tema de posicionamento de PMUs visando o desempenho dinâmico do sistema elétrico. Neste problema consideram-se tanto o posicionamento para aplicações de estabilidade transitória quanto, principalmente, para estabilidade para pequenas perturbações.

3.1 O Problema do Posicionamento de PMUs em Sistemas Elétricos de Potência

O cenário ideal dentro do problema de posicionamento de PMUs, seria ter PMUs instaladas em todas as barras do sistema elétrico. Porém as restrições de custo associadas à aquisição de PMUs e de equipamentos necessários para comunicação de dados entre PMUs e PDC, tornam esta solução inviável atualmente, sendo necessário assim limitar o número de unidades a serem posicionadas no sistema. Embora com o crescente número de aplicações que fazem uso de SMFs, os custos relacionados a estes sistemas tendem a diminuir, atualmente ainda se faz necessário realizar uma seleção adequada de barras de um sistema para o posicionamento de PMUs de acordo com algum critério de alocação pré-especificado. Este critério deve maximizar a quantidade de informações adquirida com o conjunto de medidas obtidas.

Existem alguns trabalhos que foram apresentados na literatura com respeito a este problema, nos quais foram estudadas diferentes maneiras (com diferentes objetivos) de se posicionar PMUs em um sistema elétrico de potência. Os objetivos visados com o posicionamento de PMUs podem ser diversos. Abaixo citam-se alguns exemplos:

- Estabilidade Transitória:
 - a maximização do conteúdo de informação contido em um conjunto de sinais [26];
 - a minimização da redundância na informação contida nos sinais [26];
- Estabilidade para Pequenas Perturbações:
 - a maximização da sensibilidade dos medidores aos modos eletromecânicos inter-área de baixo amortecimento [39];
 - a minimização da sensibilidade dos sensores aos modos eletromecânicos locais bem amortecidos [39];
 - alocação visando localizações que tenham informações sobre o conteúdo modal de modos pré-especificados (ou faixas de frequência pré-especificadas) [33];
- Estabilidade de Tensão:
 - alocação de PMUs para análise da estabilidade de tensão [37];
 - redução do vetor de estados para avaliação da estabilidade de tensão [7];
- Estimação de Estados:
 - alocação mínima visando a observabilidade completa do sistema [4].

Para cada um destes objetivos, existem critérios a serem implementados. Dentre os critérios existentes, alguns serão abordados neste trabalho. Cabe ressaltar que os principais objetivos do posicionamento de PMUs apresentados nesta dissertação estão associados com as diferentes maneiras de se avaliar o desempenho dinâmico de um sistema elétrico de potência. Isto é feito através de maneiras adequadas tanto de formar quanto de medir o conteúdo das matrizes que contém informações que levam em consideração a estabilidade transitória e a estabilidade para pequenas perturbações. Os critérios de formação destas matrizes serão abordados mais adiante neste trabalho, pois antes, será apresentado a formulação genérica do problema de alocação de PMUs, que segue abaixo.

O método que será descrito a seguir foi apresentado inicialmente em [26], e o presente trabalho tem dentre os seus objetivos, desenvolver e implementar uma extensão daquele método.

Considerando-se um sistema com N barras, onde são efetuadas medidas de uma variável conveniente, como ângulo, velocidade do rotor ou frequência, e onde o conjunto das barras

existentes em tal sistema é dado por $B_{\mathbb{N}} = \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$, pode-se então, definir um segundo conjunto de barras (subconjunto de $B_{\mathbb{N}}$) derivado do conjunto anterior, chamado conjunto de barras candidatas representado por $B_{\mathbb{C}} = \{B_{1c}, B_{2c}, \dots, B_{n_c}\} \subseteq B_{\mathbb{N}}$. O problema do posicionamento de PMUs consiste em selecionar adequadamente n_u barras dentre as n_c candidatas existentes, formando assim, um conjunto reduzido de barras que possui o resultado de um posicionamento ótimo de PMUs representado por $B_{\mathbb{U}} = \{B_{1u}, B_{2u}, \dots, B_{n_u}\} \subseteq B_{\mathbb{C}} \subseteq B_{\mathbb{N}}$. A seleção do conjunto ótimo deve satisfazer um conjunto de critérios que neste trabalho estão sendo denominados como critérios de alocação, já mencionados anteriormente, porém ainda não formalizados matematicamente.

Seja $\{Z_{B_{\mathbb{C}}}(t)\}$ o conjunto de medidas contendo a resposta no tempo dos sinais adquiridos. Estes sinais são provenientes das localizações das barras do conjunto de candidatas durante uma perturbação qualquer. Este conjunto será denominado neste trabalho de Matriz de Sinal. A matriz de sinal possui dimensões $M \times n_c$, onde M é o número de amostras dos sinais e n_c é o número de barras pertencentes ao conjunto de barras candidatas. Esta matriz contém as respostas no tempo de uma ou mais variáveis do sistema. Esta matriz é dada por

$$Z_{B_{\mathbb{C}}}(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) & z_2(t) & \dots & z_{n_c}(t) \end{bmatrix}, \quad t = 1, \dots, M \quad (3.1)$$

onde $z_i(t)$ é a resposta no tempo da i -ésima variável nodal z_i . As respostas temporais são dispostas em colunas dentro da matriz de sinal com intervalos de tempo discretos T e com M amostras como citado anteriormente.

A seleção de $n_u < n_c$ PMUs para serem inseridas no conjunto $B_{\mathbb{U}} \subseteq B_{\mathbb{C}}$ é ótima se há pouca ou até mesmo nenhuma perda de informação ao se substituir a matriz de sinal formada por sinais das barras candidatas $\{Z_{B_{\mathbb{C}}}\}$ pelo conjunto reduzido $\{Z_{B_{\mathbb{U}}}\}$. Em outras palavras, deseja-se encontrar um conjunto de barras para alocação de PMUs de tal forma que se tenha tanta informação quanto for possível.

Denota-se agora $\mathfrak{I}(Z_B)$ como sendo a medida do conteúdo da informação dos sinais associados a um conjunto qualquer de barras B . O objetivo é selecionar adequadamente o conjunto de barras $B_{\mathbb{U}}$ de tal forma a assegurar que $\mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{U}}}) \simeq \mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{C}}})$, ou seja, procura-se fazer com que o conteúdo de informação dos sinais do conjunto de barras selecionadas seja próximo ao conteúdo dos sinais do conjunto de barras candidatas, porém sem sinais com informações redundantes.

A seguir, apresentam-se diferentes descrições de como se formar a Matriz de Informação e também de como se analisar esta matriz e o seu respectivo conteúdo. Convém mencionar que o termo *Matriz de Informação* é usado nesta dissertação para denotar a matriz que contém dados provenientes da matriz de sinal e que foram processados de acordo com algum critério de posicionamento de PMUs. Dentre os possíveis objetivos da alocação, citam-se a observabilidade visando estimação de estados, a coerência angular para estabilidade transitória, a análise da estabilidade de tensão ou a análise modal para pequenas perturbações.

Como já citado, a estabilidade transitória e a estabilidade para pequenos sinais são os temas abordados neste trabalho.

3.2 Formação da Matriz de Informação

O critério de formação e de análise da matriz de informação tem papel fundamental no problema de como minimizar o número de unidades de medição fasorial a serem instaladas em um sistema elétrico de potência. Neste trabalho, objetiva-se posicionar PMUs sem perder um nível adequado de monitoramento dos fenômenos de natureza dinâmica que ocorrem neste sistema, tanto para a estabilidade transitória quanto para a estabilidade para pequenas perturbações. Existem diversos meios de se analisar a quantidade de informação de um conjunto de sinais, através do uso de normas específicas para este caso ou até mesmo expressões matemáticas especificamente formuladas para medir a distância elétrica entre os sinais de diferentes barras, ou seja, a medida da coerência entre áreas.

A seguir apresentam-se algumas maneiras apresentadas na literatura, de se formar a matriz de informação para o posicionamento de PMUs. O tópico de posicionamento de PMUs será abordado mais adiante. Além da formação, estes métodos são destinados à análise do conteúdo da matriz de informação para um dado conjunto de dados (respostas no tempo de uma determinada variável do sistema, como ângulo, velocidade, etc).

3.2.1 Matriz de Sinais

Uma maneira simples e eficaz de se formar a matriz de informação para o caso da estabilidade transitória, é fazê-lo diretamente através da matriz de sinais, ou seja, sem nenhum processamento intermediário dos sinais obtidos. Apenas considera-se a matriz de informação como sendo a própria matriz de sinais. Portanto, cada coluna da matriz de informação contém a resposta transitória de variável pré-especificada das barras candidatas do sistema. Neste trabalho, utilizam-se os ângulos θ_i das barras do sistema e as velocidades angulares ω_i dos rotores das máquinas síncronas como variáveis medidas (ver Capítulo 5). O conteúdo de informação desta matriz pode ser medido através da aplicação de normas adequadas, como será mostrado mais adiante na descrição do algoritmo.

3.2.2 Matriz de Entropia

Outra maneira de se formar a matriz de informação, visando a estabilidade transitória é medir a proximidade elétrica ou a coerência entre os sinais elétricos. Isto pode ser obtido através do cálculo da norma da matriz de entropia. De acordo com [30], pode-se usar a matriz

de entropia como meio de medir o conteúdo de informação presente em um determinado conjunto de sinais elétricos.

O cálculo da norma da matriz de entropia é definido da seguinte maneira:

$$\mathfrak{S}(Z_B) = \|E_B\| = \left\| \begin{array}{cccc} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n_b} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n_b} \\ \vdots & \vdots & E_{ii} & \vdots \\ E_{n_b1} & E_{n_b2} & \dots & E_{n_b n_b} \end{array} \right\| \quad (3.2)$$

onde

$$E_{ij} = \int_0^\infty \log \left(\frac{\bar{z}_{ij}(\omega)}{\sqrt{\bar{z}_{ii}(\omega)\bar{z}_{jj}(\omega)}} \right) d\omega = E_{ji} \quad (3.3)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n_b$$

onde E_{ii} é a entropia própria do i -ésimo sinal $\{z_i(t)\}$ enquanto que E_{ij} é a entropia condicional de $\{z_i(t)\}$ dado o j -ésimo sinal. Além disso, $z_{ii}(\omega)$ é a densidade espectral de energia de $\{z_i(t)\}$ [42] enquanto que $\bar{z}_{ij}(\omega)$ é o espectro cruzado de $\{z_i(t)\}$ e $\{z_j(t)\}$. Interessantemente, a entropia condicional E_{ij} pode ser uma medida efetiva da distância elétrica entre barras [30], [32]. Basta notar que para a obtenção da entropia condicional entre as barras i e j , integra-se o logaritmo do coeficiente de coerência complexa

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{\bar{z}_{ij}(\omega)}{\sqrt{\bar{z}_{ii}(\omega) \times \bar{z}_{jj}(\omega)}} \quad (3.4)$$

entre 0 e ∞ . O coeficiente de coerência complexa (que é integrado entre 0 e ∞) resulta em 1, desde que $i = j$, e conseqüentemente, o logaritmo deste valor resulta em zero, independentemente da frequência. Sendo assim, se o logaritmo do coeficiente de coerência complexa é nulo, isto corresponde a uma distância elétrica nula entre as duas barras com respostas idênticas ou até mesmo, proporcionais, o que obviamente é esperado quando $i = j$. Contrastando com a análise anterior, quando os sinais são completamente não-correlacionados, o espectro cruzado $z_{ij}(\omega)$ dos sinais é quase nulo, fato este que contribui para o aumento de $\log(\gamma_{ij})$ e como conseqüência deste fato, eleva-se também o valor da integral deste logaritmo ao infinito. Lembrando que a integral de $\log(\gamma_{ij})$ entre 0 a ∞ , representa a entropia cruzada entre i e j , pode-se dizer que o conceito apresentado anteriormente é uma forma de se medir o quão eletricamente distante está a barra i da barra j . Uma configuração adequada de PMUs deve incluir no conjunto $B_{\mathbb{U}}$, apenas barras que estão eletricamente distantes uma da outra, isto é, barras que implicam em grandes valores no cálculo da entropia cruzada.

3.2.3 Índices de Coerência

Outro meio de se formar e medir a matriz de informação para estabilidade transitória, é através da medição da coerência entre as respostas no tempo obtidas. Um grupo de barras é dito ser coerente com respeito à estabilidade angular, quando qualquer perturbação (curto-circuito em barra ou linha do sistema, perda de linha, de carga ou de bloco de geração) aplicada fora da região do grupo, resultar em variações incrementais no tempo, dos ângulos nodais $\Delta\theta(t)$ e da frequência das barras $\Delta\omega(t)$, e com todos os incrementos das variáveis dentro do grupo possuindo o mesmo sinal.

Pode-se então concluir que a resposta temporal de todos os fasores em um grupo dito coerente, pode ser satisfatoriamente aproximada através da monitoração de apenas um único fasor adequadamente selecionado dentro do grupo coerente. Conseqüentemente, não se faz necessário o posicionamento (instalação) de uma PMU em cada barra pertencente ao grupo coerente.

De acordo com [48], duas barras k e l são coerentes para uma dada perturbação d , quando o seguinte critério (ver a expressão 3.5 apresentada abaixo) está abaixo de um limiar pré-especificado, onde x_{kd} é a resposta no tempo da variável x na barra k durante a d -ésima perturbação, enquanto que T é o período de amostragem.

$$\alpha_{kl}^d = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T [\Delta\theta_{kd}(t) - \Delta\theta_{ld}(t)]^2 + [\Delta\omega_{kd}(t) - \Delta\omega_{ld}(t)]^2 \right)} \quad (3.5)$$

$$k = 1, \dots, n_b; \quad l = k + 1, \dots, n_b; \quad \alpha_{lk}^d = \alpha_{kl}^d$$

Da mesma maneira, é possível definir-se um critério de coerência de tensão baseado na resposta no tempo desta variável, para uma dada perturbação no sistema elétrico [7]. Uma possível definição que leva em consideração a resposta no tempo da variável tensão é apresentada abaixo:

$$\beta_{kl}^d = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T [\Delta V_{kd}(t) - \Delta V_{ld}(t)]^2 \right)} \quad (3.6)$$

Ao invés de se fazer uso do critério baseado na matriz de entropia (ver expressão 3.2), o comportamento do conjunto B durante a perturbação d pode ser analisado de maneira efetiva, através de um critério baseado na matriz de coerência angular ou na matriz de coerência de tensão, tal como apresentado na expressão abaixo:

$$\mathfrak{S}(Z_B) = \|C_B\| = \left\| \begin{array}{cccc} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n_b} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n_b} \\ \vdots & \vdots & \alpha_{ii} & \vdots \\ \alpha_{n_b1} & \alpha_{n_b2} & \dots & \alpha_{n_b n_b} \end{array} \right\| \quad (3.7)$$

Neste trabalho, os índices α são formados a partir dos ângulos nodais θ_i ou das velocidades dos rotores das máquinas síncronas dos sistemas considerados.

Pode ser observado que todos os elementos diagonais ($i = j$) da matriz de coerência apresentada acima são nulos. Isto obviamente significa que a coerência de uma dada barra com respeito a ela mesma é exatamente zero. De maneira mais geral, quando $i \neq j$, o índice de coerência α_{ij} tende a crescer a medida em que as barras i e j são mais eletricamente distantes uma da outra, ou seja, quando i e j pertencem a grupos coerentes diferentes. Seguindo o mesmo raciocínio, o índice de coerência α_{ij} tende a diminuir a medida em que as barras i e j são mais eletricamente próximas uma da outra, ou seja, quando i e j pertencem ao mesmo grupo coerente.

O coeficiente de coerência demonstra ser uma boa escolha para a realização da medida da distância elétrica que separa barras de um sistema elétrico de potência, da mesma forma que a análise apresentada anteriormente, que faz uso da matriz de entropia [32], [48]. Concluindo, uma seleção adequada de barras para posicionamento de PMUs deve evitar, na medida do possível, a inclusão de várias barras pertencentes ao mesmo grupo coerente no conjunto B_{\cup} , ou seja, as barras selecionadas para compor o conjunto B_{\cup} devem possuir índices de coerência “cruzada” α_{ij} com grandes valores.

3.2.4 Índices de Observabilidade

Nas subseções anteriores, apresentaram-se os critérios já abordados na literatura com respeito ao problema de posicionamento de PMUs. A seguir, tanto nesta quanto na próxima subseção, apresentam-se os dois critérios propostos neste trabalho para solucionar o presente problema, sendo que um dos critérios faz uso dos índices de observabilidade para gerar índices a serem utilizados nas equações de busca pela melhor configuração de PMUs em um dado sistema. O outro critério, que também leva em consideração a estabilidade para pequenas perturbações, faz uso de coeficientes obtidos a partir da realização da análise de Prony sobre os sinais envolvidos.

Ao se usar os índices de observabilidade está-se tratando de estabilidade para pequenas perturbações e também está sendo levado em consideração o conteúdo modal dos sinais envolvidos e armazenados no conjunto de barras candidatas B_C . Abaixo são apresentados alguns dos conceitos básicos necessários para a introdução da nova abordagem proposta.

3.2.4.1 Descrição Matemática

Considere um sistema elétrico de potência descrito pelo conjunto de variáveis contidas na equação diferencial apresentada abaixo:

$$\dot{\mathbf{x}}_o = \mathbf{f}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

A equação acima é não-linear e ao se perturbar o sistema, obtém-se:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_o + \Delta\mathbf{x} \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_o + \Delta\mathbf{u} \quad (3.9)$$

onde o prefixo Δ denota um pequeno desvio. A nova equação deve satisfazer a equação 3.8. Assim têm-se

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_o + \Delta\dot{\mathbf{x}} \quad (3.10)$$

$$= \mathbf{f}[(\mathbf{x}_o + \Delta\mathbf{x}), (\mathbf{u}_o + \Delta\mathbf{u})] \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

Supondo-se que as perturbações são pequenas, a equação 3.10 pode ser expressa em termos da expansão em série de Taylor. Assim, ao se desprezar os termos de segunda e de mais alta ordem de $\Delta\mathbf{x}$ e $\Delta\mathbf{u}$, obtém-se

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = A \Delta\mathbf{x} + B \Delta\mathbf{u} \quad (3.13)$$

$$\Delta\mathbf{y} = C \Delta\mathbf{x} + D \Delta\mathbf{u}$$

onde $\Delta\mathbf{y}$ é o vetor de saídas formado pela combinação dos estados com as estradas do sistema e as matrizes A , B , C e D são definidas da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

As derivadas parciais apresentadas acima podem ser resolvidas em um ponto de equilíbrio para o qual a pequena perturbação está sendo analisada. Nas equações apresentadas em 3.13:

$\Delta\mathbf{x}$ é o vetor de estados de dimensão n ;

$\Delta\mathbf{y}$ é o vetor de saídas de dimensão m ;

$\Delta \mathbf{u}$ é o vetor de entradas de dimensão r ;

A é a matriz de estados ou da planta de dimensões $n \times n$;

B é a matriz de controle ou de entradas de dimensões $n \times r$;

C é a matriz de saída de dimensões $m \times n$;

D é a matriz que define a proporção em que a entrada influencia diretamente na saída, de dimensões $m \times r$.

A fim de se eliminar o acoplamento cruzado entre as variáveis de estado, pode-se aplicar uma transformação de similaridade na equação 3.13, para se obter

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= \hat{A} \Delta \mathbf{z} + \hat{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \hat{C} \Delta \mathbf{z} + D \Delta \mathbf{u}\end{aligned}\tag{3.14}$$

onde

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \Phi \mathbf{z}\tag{3.15}$$

$$\hat{A} = \Phi^{-1} A \Phi = \Psi A \Phi\tag{3.16}$$

$$\hat{B} = \Phi^{-1} B = \Psi B\tag{3.17}$$

$$\hat{C} = C \Phi\tag{3.18}$$

e as matrizes Φ e Ψ são respectivamente as matrizes de autovetores à direita e à esquerda.

A principal diferença entre as equações 3.13 e 3.14, reside no fato de que \hat{A} é uma matriz diagonal, enquanto que A , normalmente é não-diagonal. O fato de \hat{A} ser diagonal implica no desacoplamento das equações de estado. Através de algumas poucas manipulações matemáticas nestas equações, pode-se facilmente encontrar relações entre as variáveis de estados e os modos presentes no sistema, como por exemplo a maneira como os estados são afetados por um determinado modo ou como uma combinação de modos afeta um estado. Através da relação 3.18, pode-se afirmar se um determinado modo é observável ou não. Mais precisamente, a i -ésima coluna da matriz \hat{C} determina se a variável z_i contribui ou não para a formação das saídas do sistema. Se a i -ésima coluna for nula, então o modo correspondente é não-observável. Isto implica no fato de que podem existir modos de baixo amortecimento que não são detectados através da observação das respostas transitórias de algumas variáveis.

Os índices de observabilidade contidos na nova matriz de saída \hat{C} , podem ser usados para formar uma matriz de informação que contenha dados sobre o conteúdo modal das variáveis

de saída definidas em \widehat{C} . Para formar a matriz de informação considerando a estabilidade para pequenas perturbações, antes deve-se aplicar uma manipulação matemática em \widehat{C} , obtendo-se \overline{C} , de tal forma a eliminar a participação de todos os modos que não fazem parte do conjunto de modos de interesse e assim, formar os vetores z_i que compõem a matriz de informação para a estabilidade para pequenos sinais. A matriz \overline{C} é obtida simplesmente ao se anular as colunas de \widehat{C} associadas aos modos que não são de interesse. Cada vetor z_i corresponde à i -ésima linha de \overline{C} associada a i -ésima barra candidata, ou seja, z_i contém somente as participações referentes aos modos de interesse para uma determinada variável de saída (neste trabalho, os ângulos nodais θ_i e as velocidades dos rotores ω das máquinas são considerados). Portanto, cada coluna da matriz de informação será formada por z_i^T .

Ao se comparar este método proposto para a estabilidade para pequenos sinais com uma maneira de se formar a matriz de informação para a estabilidade transitória, percebe-se que ao invés de fazer com que cada coluna desta matriz seja formada pelas respostas no tempo de uma determinada variável, faz-se com que as colunas da matriz de informação sejam formadas pelos índices de observabilidade normalizados e contendo informações somente sobre os modos especificados.

O vetor z_i usado para a formação da matriz de informação é do tipo:

$$z_i = [\overline{c}_{i1}, \dots, 0, \dots, \overline{c}_{ik}] \quad (3.19)$$

onde $\overline{c}_{i1}, \dots, \overline{c}_{ik}$ contém as participações normalizadas dos modos l_1, \dots, l_k de interesse das saídas envolvidas. Os elementos de z_i referentes aos modos que não são de interesse são nulos.

Ao se considerar a matriz de informação referente à estabilidade para pequenas perturbações denominada de Z_B , onde cada coluna desta matriz é formada por z_i^T , pode-se medir o conteúdo desta matriz de informação através de uma norma denominada em [26] como norma Graminiana. Para isto, faz-se necessário o cálculo de

$$Z_B^T Z_B = \begin{bmatrix} z_1 z_1^T & z_1 z_2^T & \dots & z_1 z_n^T \\ z_2 z_1^T & z_2 z_2^T & \dots & z_2 z_n^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_n z_1^T & z_n z_2^T & \dots & z_n z_n^T \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Os elementos diagonais $z_i z_i^T$ desta matriz crescem com o conteúdo modal dos modos de interesse em cada sinal de barra. Contudo, os elementos $z_i z_j^T$ localizados fora da diagonal da matriz, diminuem à medida em que os vetores z_i e z_j , referentes às barras i e j , tenderem à ortogonalidade, aumentando assim o valor da norma Graminiana da matriz $Z_B^T Z_B$. Portanto, a utilização da norma Graminiana neste caso, implica na adição de vetores que contenham mais informações sobre os modos especificados.

A seguir, simplificam-se as etapas para formação da matriz de informação para estabilidade para pequenas perturbações, usando os índices de observabilidade normalizados.

3.2.4.2 Etapas para Formação da Matriz de Informação usando Índices de Observabilidade

Este critério de alocação de PMUs, não necessita das respostas no tempo das variáveis envolvidas, mas sim das matrizes da representação de estado do sistema estudado. Mais precisamente, o método necessita da matriz \hat{C} exposta na equação 3.14. O critério de alocação baseado nestes conceitos funciona da seguinte maneira.

- Especificar quais são os modos de interesse, ou seja, sobre quais modos deseja-se obter informações. Esta especificação é muito relevante para a definição do conjunto de barras escolhidas para instalação de PMUs, pois dependendo da escolha dos modos, diferentes configurações de PMUs podem ser obtidas;
- Normalizar cada linha de \hat{C} em função do somatório do módulo dos elementos da linha correspondente¹;
- Zerar todas as colunas de \hat{C} , com exceção das colunas associadas aos modos de interesse, formando assim, a nova matriz \bar{C} . Como a matriz \hat{A} é uma matriz diagonal cujos elementos representam os modos do sistema, torna-se fácil identificar quais colunas de \hat{C} devem modificadas. Como \hat{C} determina a participação de cada modo nas saídas do sistema (compostas por uma combinação de diversos modos), então ao se executar o procedimento proposto acima, assegura-se que todas as saídas serão formadas apenas pelos modos de interesse através de \bar{C} ;
- Fazer $Z_B = \bar{C}^T$. A matriz Z_B possui dimensões $n \times m$, onde n é o número de modos e m é o número de saídas. Neste caso, a equação 3.13 foi formada de tal forma a possuir na saída a monitoração de uma variável por barra do sistema.
- Adotar algum método de análise sequencial do conteúdo de informação de Z_B , da mesma forma em que se faria caso Z_B contivesse as respostas no tempo das variáveis nodais. Alguns métodos de análise da matriz de informação serão discutidos ainda neste capítulo, porém mais adiante.

Este critério visa realizar uma alocação de PMUs tal que forneça informações sobre um determinado conjunto de modos de oscilação eletromecânicos pré-especificados. Esta ferramenta pode ser importante para a escolha de sinais estabilizantes a serem utilizados em controladores cuja estrutura faz uso de sinais locais e remotos para adicionar amortecimento ao sistema e assim, melhorar o desempenho dinâmico do mesmo. Alguns aspectos sobre a estrutura destes controladores é apresentado no próximo capítulo.

¹Isto é feito para evitar que um dado sinal de magnitude alta comparado aos outros sinais e com uma participação baixa para um modo especificado, seja escolhido como a melhor localização devido a magnitude alta, mesmo tendo uma baixa participação no modo.

3.2.5 Análise de Prony

No tópico acima, fez-se uso dos conceitos relacionados a estabilidade para pequenas perturbações e comentou-se a utilização dos índices de observabilidade como possibilidade para criação de critérios de configuração de PMUs. Como já visto nas subseções anteriores, no caso da estabilidade transitória, pode-se utilizar a coerência angular (equação 3.7) como critério de alocação de PMUs, por exemplo. Já para aplicação na estabilidade de tensão, pode-se usar a equação 3.6 para análise da coerência da magnitude de tensão, que é baseada na mesma idéia da equação da coerência angular.

Contudo, quando o enfoque é a estabilidade para pequenas perturbações, o que se deseja obter são informações sobre o conteúdo modal do conjunto de sinais disponíveis. O método anteriormente apresentado tem como objetivo a realização da alocação de PMUs com o intuito de encontrar as barras do sistema que forneçam mais informações sobre um determinado conjunto de modos de oscilação. Já nesta subseção, propõe-se um índice que estima esta informação sobre os modos de oscilação. Para atingir este objetivo, utiliza-se a análise de Prony, pois esta técnica é usada para realizar uma decomposição modal e assim identificar os modos de oscilação eletromecânicos presentes nos sinais adquiridos pelas unidades de medição fasorial.

A análise de Prony foi inicialmente apresentada no século 18, e o uso desta técnica como ferramenta matemática de auxílio em problemas práticos teve de aguardar o desenvolvimento da computação digital, pois este método trata de matrizes mal condicionadas de grande porte [43]. A análise de Prony é basicamente uma metodologia que estende a análise de Fourier estimando diretamente a frequência, o amortecimento, a magnitude e a fase do conteúdo modal de um dado sinal com período de amostragem T fixo, através de um ajuste de curva paramétrico-linear. A possibilidade de se retirar este tipo de informação de programas de simulação transitória é de grande utilidade na área de sistemas elétricos de potência. O modelo criado é formado por pólos e resíduos que, conjuntamente constituem a decomposição modal do sinal. As informações sobre o conteúdo modal do sinal estimado podem ser usados na monitoração de variáveis do sistema, estudos sobre a estabilidade do sistema, modelagem e controle de SEEs.

3.2.5.1 Descrição Matemática

Supor que um sistema linear invariante no tempo é trazido para um estado inicial $x(t_0) = x_0$ no tempo t_0 , através da aplicação de uma determinada perturbação. Então, se a entrada é removida e não existem outras entradas ou perturbações subseqüentes no sistema, o comportamento dinâmico do sistema irá decair de acordo com a seguinte equação diferencial de primeira ordem

$$\dot{x} = Ax$$

onde x , como já citado anteriormente, representa o vetor de estados do sistema de dimensão n , sendo que esta dimensão também representa a ordem do sistema. Considere λ_i , ϕ_i , ψ_i^T como sendo respectivamente, os autovalores, os autovetores à direita e à esquerda da matriz A . Então a solução para $\dot{x} = Ax$ pode ser expressa como

$$x(t) = \sum_{i=1}^n (\psi_i^T x_o) \phi_i e^{\lambda_i t} \quad (3.21)$$

$$= \sum_{i=1}^n R_i x_o e^{\lambda_i t} \quad (3.22)$$

onde $R_i = \phi_i \psi_i^T$ é a matriz dos resíduos de dimensões $n \times n$. Note que $\psi_i^T x_o$ (em 3.21) é uma constante escalar. Isto implica que, apesar de x_o (junto com ψ_i^T) determinar o estímulo para o modo associado ao autovalor λ_i , a distribuição da resposta modal entre os componentes de x é inteiramente determinada pelo autovetor à direita ϕ_i . Conseqüentemente, pode-se, ainda, extrair informações sobre ϕ_i através de uma decomposição modal adequada de $x(t)$.

Para simplificar, suponha que há apenas uma saída y no sistema e que esta saída é da forma

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.23)$$

A análise de Prony e suas recentes extensões (alguns exemplos de outros algoritmos melhorados baseados na análise de Prony serão comentados mais adiante) são projetadas para estimar diretamente os parâmetros dos termos exponenciais da equação 3.21, através da realização do ajuste de curva usando a expressão

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^Q A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (3.24)$$

para a saída monitorada $y(t)$. Ao realizar este procedimento, pode ser necessário modelar *offsets*, ruídos, entre outros efeitos estranhos presentes no sinal.

Considere que a saída $y(t)$ é composta por N amostras $y(t_k) = y(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, que são uniformemente separadas por uma quantidade Δt . A estratégia para obter a solução de Prony pode ser resumida nos seguintes passos:

- Passo 1: Construir um Modelo de Predição Linear Discreta (MPLD) que se ajuste ao sinal adquirido;
- Passo 2: Encontrar as raízes do polinômio característico associado ao MPLD criado no passo anterior;
- Passo 3: Usando as raízes calculadas no passo 2, como as frequências modais complexas para o sinal, determinar a amplitude e a fase inicial de cada modo.

Apenas para efeito de explicação, supor que $N = 2n$ e que o sinal é desprovido de qualquer ruído. A notação pode ser simplificada se 3.24 for reescrita como

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^P B_{pi} e^{\lambda_i t} \quad (3.25)$$

se assemelhando assim, às equações 3.21 e 3.22. Ao substituir o tempo de amostragem t_k , a equação acima pode ser apresentada na forma

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^P B_{pi} z_i^k \quad (3.26)$$

$$z_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad (3.27)$$

O objetivo imediato do método é encontrar valores de B_{pi} e z_i que assegurem $\hat{y}(k) = y(k)$, para todo valor de k . Para se ter uma idéia de como isto pode ser realizado, basta aplicar a equação 3.26 para cada t_k e formar a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} B_{p1}z_1^0 + \dots + B_{pn}z_n^0 \\ B_{p1}z_1^1 + \dots + B_{pn}z_n^1 \\ \vdots \\ B_{p1}z_1^{N-1} + \dots + B_{pn}z_n^{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_n^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{p1} \\ B_{p2} \\ \vdots \\ B_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

A equação acima pode ser representada de maneira mais compacta, tal como mostrado na expressão abaixo:

$$ZB_p = Y \quad (3.29)$$

A partir da obtenção de z_i , pode-se então calcular os autovalores λ_i através da expressão 3.27. O vetor z_i contém as raízes de um polinômio de n -ésima ordem com coeficientes (previamente desconhecidos) a_i e deve satisfazer a expressão abaixo:

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0) = 0 \quad (3.30)$$

O próximo passo consiste em construir a matriz de dimensões $1 \times N$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

e aplicá-la em 3.29. Após uma reordenação apropriada, obtém-se

$$\begin{aligned} \bar{A}Y &= y(n) - [a_1 y(n-1) + \dots + a_n y(0)] \\ &= \bar{A}ZB_p \\ &= B_{p1} \left[z_1^n - (a_1 z_1^{n-1} + a_2 z_1^{n-2} + \dots + a_n z_1^0) \right] + \dots \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$= 0$$

O último passo procede devido ao fato de que cada z_i satisfaz 3.30. Se o tempo inicial é escolhido arbitrariamente, então a equação 3.32 pode ser aplicada repetidamente a fim de se formar a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \dots & y(0) \\ y(n-0) & y(n-1) & \dots & y(1) \\ y(n+1) & y(n-0) & \dots & y(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \dots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n+0) \\ y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

A solução desta equação fornece os coeficientes do polinômio representado pela equação 3.30, que quando então resolvido (cálculo de z_i), é usado para o cálculo dos autovalores λ_i . Este procedimento completa os passos 1 e 2 do método básico de Prony. O passo 3 é a solução da equação 3.28 para as amplitudes complexas presentes em B_{pi} .

O uso prático desta abordagem requer refinamentos e algumas extensões, pois devido ao fato dos sistemas reais possuírem dimensões n que podem ser desconhecidas ou até mesmo muito elevadas, é bem provável que os modelos estimados devam ser aproximações de ordem reduzida. Além disto, deve-se levar em conta que modos adicionais devem ser representados para modelar ruídos e *offsets*, por exemplo. Artíficos matemáticos como Análise de Valores Singulares entre outras abordagens, podem ser usadas como ferramentas auxiliares para a execução da análise de Prony.

A seguir, apresentam-se brevemente alguns exemplos das extensões realizadas baseadas na abordagem da análise de Prony.

3.2.5.2 Algoritmo e Métodos Melhorados

Além da abordagem básica do método de Prony, surgiram outras propostas para melhoramento da técnica anteriormente apresentada. Uma das novas abordagens se baseia na capacidade de melhorar a precisão na execução da estimação do conteúdo modal dos sinais reais. A precisão da aproximação realizada é limitada pela existência de ruídos no sinal original. A abordagem básica da análise de Prony, assume a existência de um sistema com apenas uma saída. Na presença de um sistema com múltiplas saídas, o procedimento adotado é então processar sequencialmente uma saída por vez, ou seja, executar o algoritmo n vezes (dado a existência de n sinais a serem processados) para cada sinal de maneira independente. Isto freqüentemente implica em complicações na identificação das freqüências dos modos e na estimação dos coeficientes de amortecimento dos mesmos. Tudo devido aos efeitos dos ruídos e também da necessidade de usar mais modos para modelar estes “sinais estranhos”.

Em [53], uma extensão para a análise de Prony é apresentada. O referido trabalho propõe um novo procedimento para a realização da decomposição modal de múltiplos sinais ao invés de apenas um sinal por vez (no caso de um sistema multi-saídas). Ou seja, o método permite encontrar um único conjunto de modos através da análise de vários sinais simultaneamente. O trabalho conclui afirmando de que a nova extensão melhora a precisão da estimação dos modos e também simplifica os passos da abordagem básica.

Além do uso da análise de Prony para criação de modelos equivalentes de sistemas elétricos de potência ([22] e [38]) e análise sobre modos de oscilação eletromecânicos ([15] e [22]), outras utilidades foram exploradas através do uso da análise de Prony. Como exemplo, pode-se citar o trabalho proposto em [54]. Neste artigo, apresenta-se uma abordagem para aplicação da análise de Prony como ferramenta de auxílio no projeto de PSSs. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma técnica de obtenção de modelos reduzidos precisos de funções de transferência de PSSs. No artigo utilizou-se técnicas de controle descentralizado seqüencial e lugar das raízes baseadas nas funções de transferência estimadas através do método da análise de Prony, para o projeto de dois PSSs.

3.2.5.3 Proposta de Índice Baseado no Conteúdo Modal Estimado

A partir dos elementos de B_{pi} obtidos através da análise de Prony, podem ser definidos vetores $z_i = [B_{pi1}, \dots, B_{pik}]$, onde B_{pi1}, \dots, B_{pik} contém informações sobre amplitude e fase inicial dos modos $\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{ik}$ de interesse, que correspondem à participação destes modos no sinal da i -ésima barra, e que serão usados para formar a matriz de informação de maneira semelhante à usada na abordagem que faz uso dos índices de observabilidade.

Diferentemente do método que faz uso dos índices de observabilidade, aqui não se escolhem modos específicos, mas sim a faixa de frequência de interesse. Dentro desta faixa de frequência, ainda assim, existem modos que são acrescentados para que o MPLD se ajuste aos sinais originais. O método de Prony é um método que lida com matrizes mal condicionadas, portanto uma das maneiras de se obter parâmetros que forneçam um modelo fiel, é superestimar a ordem do modelo. Sendo assim, criam-se modos que na verdade não existem no sistema, mas que surgem ao se realizar a análise de Prony. Porém, o método pondera estes modos artificiais de maneira a não permitir que estes governem inadequadamente o comportamento dinâmico do MPLD.

3.3 Algoritmo de Alocação de PMUs

Nesta seção, apresentam-se as etapas do algoritmo de posicionamento de unidades de medição fasorial. Na descrição das etapas do algoritmo, as opções de diferentes critérios de alocação também são comentadas. O algoritmo principal desenvolvido neste trabalho é uma

extensão do algoritmo inicialmente apresentado em [26], que serve de base para o presente trabalho. Independentemente da escolha do critério para a formação da configuração de PMUs, o algoritmo realiza uma alocação seqüencial de PMUs, ou seja, a cada iteração do algoritmo, escolhe-se uma barra que é julgada, de acordo com algum critério, a mais adequada para ser adicionada no conjunto de barras escolhidas para instalação de PMUs. Alternativamente, dependendo da abordagem escolhida, deve-se escolher qual é a barra que deve ser retirada do conjunto de barras selecionadas. O fato de se adicionar ou excluir uma determinada barra depende do método escolhido. Caso seja uma abordagem de maximização da quantidade de informação não redundante adquirida, o processo é de adição seqüencial. Caso a abordagem implementada seja a de minimização das perdas de informação, o processo é de eliminação seqüencial. Isto ficará mais claro a partir da apresentação dos algoritmos para ambas abordagens.

3.3.1 Formulação do Problema para a Alocação Seqüencial

Os diversos critérios estudados anteriormente sugerem que uma configuração restrita de PMUs é adequada se ela obtém o mesmo conteúdo de informação (ou o mais semelhante possível) que pode ser adquirido ao se monitorar os sinais provenientes de todas as barras candidatas do sistema. Contudo, considerando-se que a máxima “quantidade de informação disponível” para uma dada perturbação é $\mathfrak{I}(Z_{B_C})$, o objetivo do algoritmo é encontrar um conjunto B_U , dadas n_u PMUs a serem alocadas ($n_u < n_c$), de tal forma a minimizar a perda de informação. Em outras palavras, o intuito é fazer com que a quantidade de informação contida em $\mathfrak{I}(Z_{B_U})$ seja tão semelhante a $\mathfrak{I}(Z_{B_C})$ quanto possível. Formaliza-se matematicamente o problema da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \underbrace{\text{Minimizar}}_{B_U \subseteq B_C \subseteq B_N} \quad C(B_U) &= \mathfrak{I}(Z_{B_C}) - \mathfrak{I}(Z_{B_U}) \\ \text{sujeito à:} \quad n_u &< n_c \end{aligned} \tag{3.34}$$

onde $\mathfrak{I}(Z_B)$ é uma medida do conteúdo de informação contido nas respostas no tempo do conjunto de sinais $\{Z_B(t)\}$ proveniente do conjunto B durante a perturbação d . Contudo, quando vários cenários de operação são considerados, as respostas dos sinais são modeladas como variáveis aleatórias, fazendo com que a função custo do problema também seja de natureza aleatória. Para cada cenário, considera-se o mesmo conjunto de perturbações N_C em um período de observação, cujo intervalo de amostragem é T .

Considere o conjunto de todos os possíveis cenários Ω e considere também p_s , $s \in \Omega$, como sendo a probabilidade ou o peso associado a cada cenário s . Assim, a equação 3.34 torna-se

$$\begin{aligned} & \underbrace{\text{Minimizar}}_{B_U \subseteq B_C \subseteq B_N} g(B_U) \\ & \text{sujeito à: } n_u < n_c \end{aligned} \quad (3.35)$$

onde

$$g(B_U) := \sum_{s \in \Omega} p_s [E \{C(B_U, d, s)\}] \quad d = 1, 2, \dots, N_c$$

$$\sum_{s \in \Omega} p_s = 1$$

Deve ser observado que todo cenário s é caracterizado por uma medida de desempenho $E_{d \in \Omega} \{C(B_U, d, s)\}$ associada ao dado conjunto de localizações B_U . Calcula-se a média (operador expectativa) sobre as N_c perturbações consideradas no conjunto de contingências d , para realizar a medida do desempenho de cada cenário dentre os possíveis cenários considerados. Também deve-se observar que os cenários são considerados de acordo com:

- níveis de carregamento sazonais, ou seja, carregamentos de pico ou fora de pico para diferentes períodos do ano;
- diferentes topologias de rede para cada nível de carregamento sazonal, como consequência das quedas de geração, perda de linhas e de transformadores, sejam estas planejadas ou não.

Esta abordagem que leva em consideração diferentes cenários, cada um contendo suas diferentes topologias de redes e diferentes contingências, não será implementada neste trabalho. Contudo cabe salientar que não há grandes dificuldades na sua implementação pois, sucintamente falando, esta abordagem nada mais é do que várias simulações sucessivas do algoritmo de alocação sequencial, sendo que cada simulação é executada para cenários modificados (não abruptamente modificados) em certos aspectos (tais como níveis de carregamento, perda de linhas de transmissão, de blocos de geração ou de cargas). No final da execução de todo o “universo” de possibilidades levadas em consideração, leia-se, para todas as contingências e diferentes topologias abordadas, realiza-se um estudo probabilístico de tal forma a verificar quais foram as barras mais vezes selecionadas para a instalação de PMUs e em que condições elas foram escolhidas para o propósito mencionado.

A função custo em 3.34 assume um processo de alocação que começa com um vasto conjunto de possíveis localizações (caso o sistema seja de médio a grande porte), para então realizar a escolha adequada das barras que devem ser retiradas do conjunto e assim reduzi-lo a um conjunto mínimo que constitui a configuração ótima de PMUs, de acordo com alguns procedimentos de minimização da função custo. É possível, e as vezes mais eficaz, analisar o problema através de uma abordagem “dual”, assumindo um conjunto inicial pequeno (ou

vazio) de barras equipadas com PMUs para então estendê-lo a um tamanho pré-especificado limitado pelo número máximo de PMUs já definido em uma etapa anterior. Naturalmente, para que a solução encontrada através do processo seja atrativa, o número de barras equipadas com PMUs deve ser bem menor que o número total de barras do sistema.

Deve-se lembrar que $B_{\mathbb{U}}$ denota o conjunto de $n_u \leq n_c \leq N$ barras que serão equipadas com unidades de medição fasorial. O desempenho de qualquer tentativa de configuração pode ser facilmente avaliado através da quantidade de informação $\mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{U}}})$ associada a uma determinada perturbação. A função objetivo dual (relacionada à equação 3.34) consiste então em encontrar um conjunto de localizações que maximize a atual medida do conteúdo de informação da configuração, dado o número de PMUs a serem alocadas. A abordagem dual é formalizada matematicamente como segue:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\text{Maximizar}}_{B_{\mathbb{U}} \subseteq B_{\mathbb{C}} \subseteq B_{\mathbb{N}}} J(B_{\mathbb{U}}) = \mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{U}}}) \\ & \text{sujeito à: } n_u < n_{umax} \leq n_c \end{aligned} \quad (3.36)$$

onde n_{umax} é uma restrição superior para o número de PMUs permitidas para instalação no sistema, enquanto que $\mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{U}}})$ é a medida da quantidade de informação do conjunto de sinais gravados contendo as respostas no tempo $\{Z_{B_{\mathbb{U}}}(t)\}$ das barras pertencentes ao conjunto $B_{\mathbb{U}}$, durante a perturbação d .

Ainda não se discutiu sobre qual método de resolução numérica da norma das matrizes de informação (ver equações 3.2, 3.7 e 3.38) será utilizado neste trabalho. Independentemente, se o critério escolhido é o de verificar a coerência entre as respostas transitórias ou se o de analisar um grupo de modos de oscilação eletromecânicos de interesse, ainda assim deve-se encontrar uma forma adequada para avaliar as informações obtidas através de diferentes normas para as diferentes matrizes de informação. Este tópico é muito relevante para o problema de posicionamento de PMUs, pois é a através do cálculo da medida do conteúdo de informação contida na matriz de informação que se pode tomar as decisões sobre qual barra incluir no conjunto de localizações (ou excluir, dependendo se a abordagem escolhida foi a de maximizar a quantidade de informações obtidas ou minimizar a perda de informação).

Uma das maneiras de se medir o conteúdo de uma matriz de informação é através da análise de seu subespaço dominante. Ao invés de se procurar um conjunto de barras para alocação de PMUs visando a “maximização da informação” adquirida usando as respostas no tempo dos sinais envolvidos, pode-se analisar o problema de uma maneira complementar, visando então a “minimização da correlação” entre os sinais envolvidos. Enquanto ainda se procura incorporar barras cujos sinais contenham informações “novas” e distintas, este método visa descartar barras redundantes cujos sinais contém informações similares. Procedendo-se desta maneira, contribui-se para o alívio de congestionamento da infraestrutura de comunicação de dados associada aos SMFs, pois assim, não será necessário realizar o processamento das informações que não adicionam grandes contribuições no que se refere

à informação.

Considerando-se novamente a matriz de sinal contendo as respostas no tempo das variáveis envolvidas $Z_B(t)$ (lembrando que as respostas temporais dos sinais estão dispostos em colunas), se existirem exatamente $n_b - n_u$ colunas de $Z_B(t)$ cujos sinais contém informações redundantes que podem ser expressas como combinações lineares do conjunto remanescente formado pelas n_u colunas independentes, então estas n_u colunas independentes constituem um conjunto ótimo de localizações para instalações de PMUs $B_{\mathbb{U}}$. Esta afirmação está baseada no fato de que não há perda de informação quando $Z_B(t)$ é substituído por $Z_{B_{\mathbb{U}}}(t)$, ou seja, $\mathfrak{S}(Z_{B_{\mathbb{U}}}) \equiv \mathfrak{S}(Z_B)$. Observando o problema deste ponto de vista, percebe-se que a tarefa da escolha de localizações adequadas para instalação de PMUs, nada mais é do que um problema de redução de posto de uma matriz de grande porte. Em álgebra linear, sabe-se que a *Decomposição em Valores Singulares* (conhecida na literatura pela denotação SVD - *Singular Value Decomposition*) é a ferramenta matemática ideal para este tipo de problema [49]. Esta ferramenta permite realizar a separação de um espaço vetorial em outros dois subespaços, sendo um dominante $\vec{U}(n_u)$ e o outro subdominante $\vec{U}(n_b - n_u)$, onde $\vec{U}(n)$ denota o subespaço gerado pelas n colunas da matriz U . Isto pode ser apresentado matematicamente através da expressão abaixo:

$$\begin{aligned} Z_B &= U \Sigma V^T \\ Z_B &= [U(n_u) | U(n_b - n_u)] \times \begin{bmatrix} \Sigma(n_u) & 0 \\ 0 & \Sigma(n_b - n_u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^T(n_u) \\ V^T(n_b - n_u) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.37)$$

onde $\Sigma(n_b)$ é a matriz diagonal consistindo de n_b valores singulares de $Z_B(n_b)$, e os subespaços $\vec{U}(n_u)$ e $\vec{U}(n_b - n_u)$ podem ser utilizados em uma soma direta para reconstituir o subespaço $\vec{Z}_{B(n_b)}$:

$$\vec{Z}_{B(n_b)} = \vec{U}_{B(n_u)} \oplus \vec{U}_{B(n_b - n_u)} \quad (3.38)$$

Esta decomposição de subespaços é equivalente à aproximação via mínimos quadrados da matriz $Z_B(n_b)$ de n_b colunas pela matriz de posto reduzido $U(n_u)$ de n_u colunas. Este procedimento vai de encontro aos objetivos da alocação de PMUs, que consiste na escolha de barras do sistema para a inclusão no conjunto $B_{\mathbb{U}}$ de tal forma que os erros decorrentes da aproximação via mínimos quadrados de $\vec{Z}_{B(n_b)}$ por $\vec{U}_{B(n_u)}$ sejam pequenos. A magnitude do erro de aproximação pode ser medida pelos valores singulares correspondentes $\Sigma(n_b - n_u)$. Caso todos os valores singulares associados sejam nulos, então o erro de aproximação é nulo e a configuração de PMUs representada pelo conjunto $B_{\mathbb{U}}$ é portanto, estritamente ótima. Caso contrário, a configuração de PMUs é a melhor que se poderia conseguir com n_u PMUs posicionadas, mas não pode-se classificar esta configuração como sendo estritamente ótima. Em outras palavras, mais de n_u PMUs devem ser analisadas com o intuito de se reduzir o erro de aproximação.

Várias outras maneiras de se medir a matriz de informação são possíveis, incluindo as seguintes opções apresentadas abaixo:

- $\sqrt{\sum_i \sum_j (Z_B^T(i, j) Z_B(i, j))}_{i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,n_b}$: Norma de Frobenius da matriz Z_B de dimensões $M \times n_b$;
- $\min(\sigma_i)$: Norma baseada na Decomposição em valores singulares de Z_B , onde $\{\sigma\}_{i=1,2,\dots,n_b}$ são tanto os valores singulares de Z_B quanto os autovalores da matriz de informação $Z_B^T Z_B$;
- $\det(Z_B^T Z_B)^{1/n_b}$: Denominada em [26] pelo termo *Norma Gramiana*.

Este último critério (denominado norma Gramiana) oferece algumas interpretações interessantes no contexto do posicionamento de PMUs baseado na resposta no tempo, pois esta abordagem visa a maximização da informação contida na matriz de sinal $\{Z_B(t)\}$, cujas colunas contém a resposta no tempo dos sinais das barras candidatas à posicionamento de PMUs. Algumas das características relacionadas à norma Gramiana estão apresentadas abaixo:

$$\|Z_B\| = \left\| \begin{array}{cccc} z_1(1) & z_2(1) & \dots & z_{n_b}(1) \\ z_1(2) & z_2(2) & \dots & z_{n_b}(2) \\ \vdots & \vdots & z_i(t) & \vdots \\ z_1(M) & z_2(M) & \dots & z_{n_b}(M) \end{array} \right\|$$

- Ao se definir a resposta geral de um dado conjunto de localizações, como sendo a soma dos quadrados das respostas no tempo adquiridas nas barras correspondentes (para um certo período de tempo de interesse), torna-se evidente que os elementos diagonais de $Z_B^T Z_B$ influenciam a resposta geral dos sensores. Sendo este Gramiano uma matriz positiva semi-definida, o seu determinante aumenta com o aumento dos seus elementos diagonais;
- Os termos fora da diagonal de $Z_B^T Z_B$ influenciam a correlação entre as respostas dos sensores. O determinante de uma matriz positiva semi-definida diminui com a existência de elementos grandes em magnitude localizados fora das diagonais;
- O expoente $(1/n_b)$ faz com que a unidade do critério medido tenha a mesma dimensão física das respostas no tempo que constituem as colunas de Z_B .

3.3.2 Solução do Problema via *Greedy Optimization*

Primeiramente, é interessante se fazer uma recapitulação das propriedades relevantes do presente problema.

- As variáveis de decisão são números inteiros (0 ou 1), pois uma barra é selecionada para instalação de PMU ou não;
- Tanto a função custo “de perdas” usada na abordagem da minimização de perdas de informação (equação 3.34) quanto a função objetivo de “rendimento” usada na abordagem da maximização da quantidade de informação (equação 3.36), são particularmente não-lineares e aleatórias, devido à consideração de múltiplos cenários e perturbações no problema;
- A dimensão do problema é de grande porte: um sistema teste para estudos pode possuir entre 500 a 1000 barras. Supondo-se que 10% das barras de um sistema com 500 barras devem ter PMUs instaladas, pode-se calcular o número total de possíveis escolhas de posicionamento de PMUs através da expressão $(500!)/[50!(500 - 50)!]$, o que resulta em um número consideravelmente elevado. Uma enumeração exaustiva do espaço das possíveis soluções definitivamente não é uma técnica apropriada para resolver um problema com dimensões realísticas.

Por todas estas razões, optou-se por não atacar o problema usando diretamente um método de otimização, mas sim usando um algoritmo chamado *Greedy Optimization* [12]. Traduzindo do inglês para o português, o termo “Greedy Optimization” significa “Otimização Gulosa”. O nome é dado ao método devido ao fato de que o algoritmo forma B_{\cup} de maneira sequencial, seguindo uma estratégia de expansão (ou dependendo da função custo, de eliminação) incremental de barras. A idéia por trás da abordagem é simples. Para a estratégia de expansão, que faz uso da função objetivo de rendimento (maximização da quantidade de informações contida nos sinais), assume-se um conjunto B_{\cup}^k consistindo de k barras na iteração k . A próxima barra a ser acrescentada ao conjunto é a que gerar o maior incremento imediato no valor da função objetivo, se tal barra existir, explicando assim o porquê do termo “Otimização Gananciosa”. Além disso, uma vez tendo-se selecionado uma barra para instalação de PMU, esta mesma é retida no conjunto B_{\cup} durante a execução das demais iterações do algoritmo.

Por outro lado, ao se usar o processo de eliminação fazendo uso da função custo de perdas (minimização das perdas de informação), inicia-se o algoritmo a partir do conjunto de todas as barras candidatas B_{\subset} . Na iteração k , a barra a ser descartada do conjunto das barras selecionadas será aquela que produzir o menor decréscimo imediato no valor da função custo. Ou seja, será aquela que possuir a menor quantidade de informação comparada à totalidade de informações contida nos demais sinais do conjunto. O processo continua então até a iteração em que $n_c - n_u$ barras tenham sido eliminadas, resultando em um conjunto de n_u barras retidas.

3.3.3 Maximização da Quantidade de Informações via Adição Sequencial [26]

Supor que para cada cenário $s \in \Omega$ e para cada perturbação $d \in D$, um conjunto de N respostas no tempo, com N sendo o número de barras do conjunto $B_{\mathbb{N}}$, é obtido através do uso de programas de análise de estabilidade via simulações de contingências. Programas como o ANATEM (*Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos*), PACDYN (*Programa de Estabilidade a Pequenas Perturbações*), ambos desenvolvidos pelo CEPTEL (*Centro de Pesquisas em Energia Elétrica*), ou até mesmo uma *toolbox* de MATLAB tal como o PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) [2] podem ser usados para este propósito. Assumir também que estas respostas são amostradas (podendo ter intervalos iguais ou não) em uma janela de tempo (de 0 a T) com M pontos, incluindo M_0 pontos que foram amostrados antes da ocorrência da perturbação, mas que serão excluídos para a análise da coerência das barras.

Explica-se a seguir as principais etapas dos dois algoritmos (maximização do conteúdo de informação e minimização das perdas de informação) em mais detalhes.

1. **Inicialização da fase 1:** Definir o conjunto de barras candidatas para escolha de posicionamento de PMUs: $B_{\mathbb{C}} = \{B_{1c}, B_{2c}, \dots, B_{n_c}\}$. Selecionar o máximo número de PMUs $n_{umax} < n_c$ a serem instaladas no sistema;
2. Inicialização da fase 2: Assumir a existência de um conjunto inicial de n_0 barras que já tenham PMUs instaladas: $B_{\mathbb{U}} = \{B_{1u}, B_{2u}, \dots, B_{n_u}\} \subset B_{\mathbb{C}}$. Caso não haja PMUs instaladas previamente, então $B_{\mathbb{U}} = \emptyset$ e $n_a = 0$
3. Definir um novo conjunto de barras candidatas excluindo todas as barras que já possuem PMUs instaladas
4. Enquanto $n_a \leq n_{umax}$, faça:
 - (a) Executar a decomposição em valores singulares de $Z_{B_{\mathbb{U}}}$ e calcular o seu conteúdo de informação de acordo com a norma Gramiana

$$\mathfrak{I}(Z_{B_{\mathbb{U}}}) = \det(Z_{B_{\mathbb{U}}}^T Z_{B_{\mathbb{U}}})^{1/n_a} = \left(\prod_{i=1}^{n_a} \sigma_i \right)^{1/n_a}$$

- (b) Para $l = 1, 2, \dots, n_c$

- i. Construir a matriz de sinal

$$Z_{B_{\mathbb{C}}} = \left[\begin{array}{cccc} z_1 & z_2 & \dots & z_{n_a} & z_l \end{array} \right] \Big|_{B_{1c} \subset B_{\mathbb{C}}}$$

cujas primeiras n_a colunas são associadas com as n_a barras já equipadas com PMUs e cuja última coluna consiste da l -ésima barra candidata para instalação de PMU.

- ii. Executar a decomposição em valores singulares de Z_{B_C} e calcular o seu conteúdo de informação de acordo com a norma Gramiana

$$\mathfrak{I}(Z_{B_C}) = \det(Z_{B_C}^T Z_{B_C})^{1/n_a+1} = \left(\prod_{i=1}^{n_a+1} \sigma_i \right)^{1/n_a+1}$$

- iii. Calcular o valor da função objetivo para a tentativa atual

$$B_C : J(B_{B_C}) = \mathfrak{I}(Z_{B_U}) = J_l$$

- (c) Analisar os valores de $\{J_l\}$. A barra l_{add} a ser adicionada para o posicionamento da próxima PMU é aquela que maximizar o incremento de informação, ou seja, aquela que contribuir com o maior acréscimo de informação de B_U comparado à B_C . O maior acréscimo de informação corresponde ao maior valor de J_l

$$l_{add} = \arg \left(\max_l \{J_l\} \right)$$

- (d) Reduzir em uma unidade o número de barras candidatas n_c para o próximo passo ($n_c \leftarrow n_c - 1$). Incrementar em uma unidade o número de barras que já possuem PMUs instaladas ($n_a \leftarrow n_a + 1$). Definir um novo conjunto de barras candidatas (excluindo a barra l_{add}) e um novo conjunto de barras já equipadas com PMUs
5. As n_{umax} barras escolhidas para posicionamento de PMUs no passo 4, estão contidas no conjunto B_U : Esta é a solução para o problema da configuração ótima de n_{umax} PMUs.

3.3.4 Minimização das Perdas de Informações via Eliminação Sequencial [26]

Assumir agora que, para cada cenário $s \in \Omega$ e cada perturbação $d \in D$, têm-se disponível um conjunto com N respostas no tempo, sendo N o número de barras candidatas no conjunto B_N . O processo de eliminação de barras para minimizar as perdas de informação segue os seguintes passos:

1. **Inicialização da fase 1:** Definir o conjunto de barras candidatas para escolha de posicionamento de PMUs: $B_C = \{B_{1c}, B_{2c}, \dots, B_{n_c}\} \subset B_N$. Selecionar o número de PMUs $n_u < n_c$ a serem instaladas no sistema;
2. Definir o número máximo de barras a serem eliminadas, $n_{emax} = n_c - n - u$ e fazer $n_e = 0$
3. Enquanto $n_e \leq n_{emax}$, faça:

- (a) Executar a decomposição em valores singulares de Z_{B_C} e calcular o seu conteúdo de informação de acordo com a norma Gramiana

$$\mathfrak{S}(Z_{B_C}) = \det(Z_{B_C}^T Z_{B_C})^{1/n_c} = \left(\prod_{i=1}^{n_c} \sigma_i \right)^{1/n_c}$$

- (b) Para $l = 1, 2, \dots, n_c$

- i. Construir um novo conjunto de configuração de PMUs, excluindo a l -ésima barra
- ii. Executar a decomposição em valores singulares de Z_{B_U} e calcular o seu conteúdo de informação de acordo com a norma Gramiana

$$\mathfrak{S}(Z_{B_U}) = \det(Z_{B_U}^T Z_{B_U})^{1/n_c-1} = \left(\prod_{i=1}^{n_c-1} \sigma_i \right)^{1/n_c-1}$$

- iii. Calcular o valor da função objetivo para a tentativa atual

$$B_U : C(B_{B_U}) = \mathfrak{S}(Z_{B_C}) - \mathfrak{S}(Z_{B_U}) = C_l$$

- (c) Analisar os valores de $\{C_l\}$. A barra l_{sub} a ser eliminada na próxima etapa do algoritmo de alocação de PMUs é aquela que minimiza as perdas de informação a medida em que se transforma o conjunto B_C em B_U . A menor perda de informação corresponde ao menor valor de C_l

$$l_{sub} = \arg \left(\min_l \{C_l\} \right)$$

- (d) Reduzir em uma unidade o número de barras candidatas n_c para o próximo passo ($n_c \leftarrow n_c - 1$). Incrementar em uma unidade o número de barras descartadas para o posicionamento de PMUs ($n_e \leftarrow n_e + 1$). Definir um novo conjunto de barras candidatas (excluindo a barra l_{sub}),

4. As n_u barras não descartadas no processo descrito acima são as escolhidas para posicionamento de PMUs. Estas barras estão agora contidas no conjunto $B_C = B_U$, que por sua vez é então a solução para o problema de configuração ótima de n_u PMUs.

Na seção anterior, apresentaram-se as etapas dos algoritmos propostos por [26] para maximizar a quantidade de informação contida nos sinais e para minimizar a correlação entre os sinais, sendo que estas duas abordagens complementares necessitam dos sinais temporais adquiridos na barras candidatas à instalação de PMUs.

Para os casos em que a matriz de informação é formada usando os índices de observabilidade ou a análise de Prony, o algoritmo é o mesmo, porém o que muda é a maneira

que se forma esta matriz. No caso da estabilidade transitória, a entrada de dados consiste nas respostas temporais das variáveis envolvidas. Para o caso da estabilidade para pequenas perturbações, as entradas podem ser tanto a matriz $Z_B = \bar{C}^T$ quanto a matriz $Z_B = \bar{B}_p^T$, onde B_p contém informações sobre o módulo e a fase dos sinais estimados através da análise de Prony. A matriz \bar{B}_p é obtida ao se retirar os modos fora da faixa de interesse de B_p da mesma forma que é feito para obter \bar{C} à partir de C .

3.4 Conclusão

Neste capítulo, são abordados diferentes métodos de posicionamento de unidades de medição fasorial sincronizada. A estabilidade transitória e a estabilidade para pequenas perturbações foram consideradas.

Para a estabilidade transitória, o objetivo é encontrar localizações não coerentes. Após a ocorrência de uma perturbação, as respostas no tempo das barras candidatas são analisadas para se encontrar as barras que forneçam a maior quantidade de informações sobre o período transitório da resposta temporal.

No caso da estabilidade para pequenas perturbações, o objetivo é encontrar as localizações que forneçam a maior quantidade de informações sobre um modo ou conjunto de modos de oscilação eletromecânica do sistema. Os índices de observabilidade e a análise de Prony são utilizadas para este objetivo.

Dois algoritmos levando em consideração o uso da resposta transitória foram apresentados. Os algoritmos considerando a estabilidade para pequenas perturbações não foram apresentados, devido à semelhança com os mostrados neste capítulo. Basicamente, a única diferença entre os algoritmos, seria a forma de criar a matriz de informação.

No Apêndice B apresentam-se alguns comentários pertinentes aos programas e subrotinas computacionais criadas para os estudos realizados nesta dissertação de mestrado.

Capítulo 4

Aplicações de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada em Sistemas Elétricos de Potência

4.1 Introdução

O objetivo principal deste capítulo é mostrar que pode-se melhorar o desempenho dinâmico de SEEs através do uso de SMFs. Dentre as aplicações mencionadas, citam-se o controle para pequenas perturbações que envolve o projeto de controladores cuja estrutura permite a utilização de sinais locais e remotos, o controle de emergência que engloba a tomada automática de decisões para assegurar a operação de SEEs face a grandes perturbações e também, a análise da estabilidade de tensão a curto e a longo prazos. Inicia-se o capítulo apresentando-se uma estrutura de controle que usa sinais remotos e um método para o projeto de controladores usando estes sinais remotos. Em seguida apresentam-se algumas idéias para o aproveitamento das informações adquiridas com SMFs para implementação de métodos de controle de emergência. Uma breve descrição de como a estabilidade de tensão pode ser melhorada com o uso de medição fasorial sincronizada também é discutida ao final do capítulo.

4.2 Estabilidade para Pequenos Sinais

Em sistemas elétricos de potência, a estabilidade para pequenas perturbações pode ser definida como a capacidade que as máquinas do sistema têm de apresentar amortecimento adequado após a aplicação de uma pequena perturbação no sistema. De maneira mais formal,

diz-se que a estabilidade à pequenos sinais está relacionada ao comportamento da trajetória do sistema em uma vizinhança de um ponto de equilíbrio. As perturbações consideradas são pequenas e as equações diferenciais não-lineares do sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio. Diversas ferramentas úteis associadas à teoria de sistemas lineares bem como o uso de modelos linearizados podem ser utilizadas para avaliar a estabilidade para pequenas perturbações de um sistema. Dentre estas ferramentas, podem-se citar a modelagem via equações no espaço de estados, o uso dos autovalores e autovetores da matriz de estados para aquisição de índices de sensibilidade, bem como informações sobre pólos e zeros do sistema linearizado. Um estudo de estabilidade para pequenas perturbações deve indicar se variações de carregamento ou variações na topologia do sistema resultam em um ponto de equilíbrio para o qual o sistema se ajusta com amortecimento suficiente ([29] e [50]).

Atualmente, a expansão dos sistemas elétricos de potência para atender a uma crescente demanda tem se combinado com diversas mudanças ocorridas no setor e, devido à severas restrições ambientais e econômicas, a operação dos sistemas de potência têm se tornado cada vez mais complexa. Vários são os fatores envolvidos que tendem a retardar investimentos na expansão do sistema. Assim, os sistemas tendem a operar cada vez mais próximos dos limites de segurança e, em especial, dos limites de estabilidade. Como consequência, tem-se um sistema menos tolerante à saída de equipamentos e a operação mais dependente de dados corretos. Outra preocupação decorrente destes problemas é que não raras vezes podem ocorrer problemas relacionados à modos de oscilação eletromecânicos com pouco amortecimento ou até mesmo instáveis, devido aos fatores mencionados e também a ação de reguladores de tensão de resposta rápida e com altos ganhos. Todas estas características acabam por naturalmente degradar e diminuir as margens de estabilidade da operação de sistemas elétricos de potência.

Devido à estes problemas entre outros existentes, surge então uma tendência de se procurar soluções alternativas, tais como o aumento das margens de estabilidade por ação do controle. A operação com menores margens de segurança requer um correto conhecimento do sistema, para evitar que fenômenos não previstos pelos modelos disponíveis ou dados incompletos de condições de operação e eventos, possam causar um colapso no sistema, em casos onde a ação de operadores poderia ser decisiva para evitá-lo. Ações de controle para aumentar as margens de segurança também dependem do conhecimento do modelo assim como da aquisição de sinais adequados para o controle. O uso de medições fasoriais fornece novas possibilidades para abordar estas questões.

4.2.1 Estrutura Convencional de PSS

Como solução para os problemas associados ao comportamento dinâmico de sistemas com modos de baixo amortecimento ou até mesmo com modos instáveis, surgiu na década de 70 um interesse maior na busca por fontes de amortecimento para os modos de

oscilação problemáticos, pois os reguladores de tensão em algumas ocasiões introduziam amortecimento negativo no comportamento dinâmico de sistemas elétricos [29]. Desde então começou-se a utilizar o PSS (*Power System Stabilizer*) como fonte de amortecimento para o sistema usando sinais estabilizantes para controlar o sistema de excitação dinâmico das máquinas síncronas envolvidas. Diversas técnicas de projeto de controladores foram sugeridas na literatura, abrangendo diversos métodos, tais como posicionamento de pólos [6], controle ótimo com restrições estruturais [19], controle adaptativo [5], entre outros.

No passado, existiam outros meios de controle disponíveis, tais como o chaveamento de capacitores e/ou indutores. Sabia-se que estes dispositivos exerciam influência na dinâmica dos sistemas, porém devido aos limites de rapidez de resposta, estes dispositivos tinham uma ação de controle limitada naquela época. Porém, com os avanços da eletrônica de potência, permitiu-se o desenvolvimento de diversos dispositivos controláveis e de alta velocidade de resposta, que podem dar uma contribuição considerável ao desempenho dinâmico de um sistema de potência. Dentre estes dispositivos, pode-se citar o *Compensador Estático de Reativo* (CER ou SVC), o *Unified Power Flow Controller* (UPFC), o *Thyristor Controlled Serial Compensator* (TCSC), entre outros. Estes novos dispositivos são bastante flexíveis no que se refere ao controle, e por esta razão, esta tecnologia é conhecida na literatura pelo termo FACTS (*Flexible AC Transmission System*). Após o desenvolvimento da tecnologia FACTS, além do uso de estabilizadores de sistemas de potência, começou-se a usar controladores FACTS como novas fontes de amortecimento para o sistema [50].

A abordagem de projeto de estabilizadores de sistema de potência convencionais (ver Figura 4.1), é normalmente realizada para um determinado ponto de operação do sistema, não considerando as variações de carregamento e de topologia que podem ocorrer no sistema. Um característica importante das abordagens de controle convencionais é que nos métodos clássicos o sistema é representado através do modelo máquina-barras infinita (OMIB). Para o caso de sistemas multimáquinas, quando deseja-se projetar vários controladores para diferentes localizações, faz-se um processo seqüencial, fazendo algumas considerações com respeito às máquinas remotas (representadas por barras infinitas) e às máquinas mais próximas (com geração representada por impedância negativa) da máquina que se deseja instalar um PSS. A desvantagem desta abordagem é que não são consideradas as possíveis interações entre os diversos controladores dos diversos geradores do mesmo sistema. Outra limitação da estrutura convencional de estabilizadores é o uso de sinais locais. Sabe-se que podem ocorrer situações em que as áreas de maior observabilidade e controlabilidade não coincidem. Atualmente, com a real possibilidade de se usar sinais remotos através de SMFs, novas abordagens de projeto coordenado de controladores considerando robustez, uso de sinais remotos, possíveis atrasos de tempo e perda de sinais remotos, devem ser estudadas.

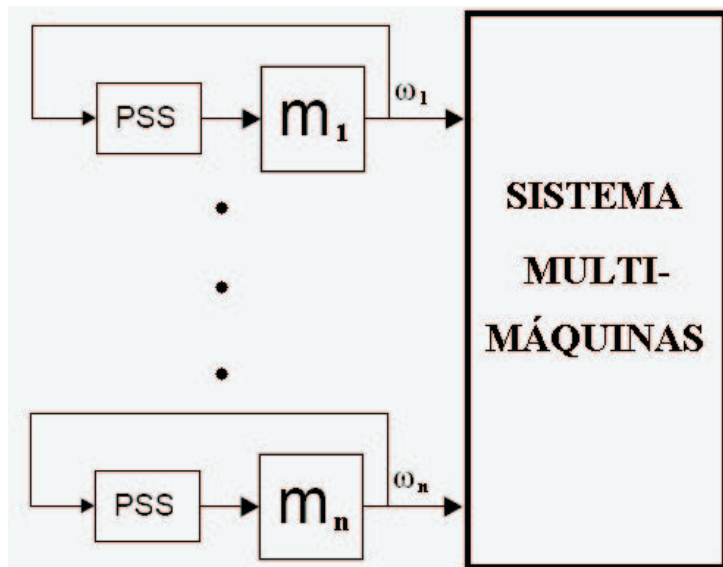


Figura 4.1: Estrutura convencional de PSS com sinal local.

4.2.2 Estrutura de PSS com Sinal Remoto

O uso de medição fasorial no contexto da estabilidade para pequenas perturbações traz a possibilidade de se usar sinais remotos para os controladores e eventualmente a possibilidade de usar sinais que não eram disponíveis anteriormente, como as partes real e imaginária das tensões de barra. O uso dos sinais remotos torna mais fácil a implementação de controladores globais. Os controladores globais podem usar indistintamente sinais locais ou remotos ou combinação de ambos (ver Figura 4.2). O uso de sinais remotos é importante para o caso de modos interárea, onde a observabilidade dos modos ocorre em uma área e a controlabilidade ocorre em outra. Neste caso informação remota deve ser usada.

Antes da síntese de controladores, deve-se escolher quais máquinas necessitam de controladores e quais sinais suplementares serão usados. Métodos de posicionamento de PMUs visando obter informações sobre modos de oscilação eletromecânica podem ser utilizados para escolher as melhores localizações para fins de controle (ver Capítulo 3).

Em SEEs de grande porte, o número de modos inter-área dominantes, freqüentemente são bem superiores ao número de controladores disponíveis para controlá-los. Alguns trabalhos focalizando especificamente este tópico têm sido apresentados nos últimos anos ([10], [11], [25] e [28]) propondo novas metodologias para o projeto de controladores que usem múltiplos sinais de entrada, com a possibilidade de combinar o uso de sinais locais e remotos com diferentes conteúdos modais. Portanto, novas estruturas de controle são requeridas para aproveitar os benefícios relacionados aos SMFs para adicionar amortecimento para múltiplos modos de oscilação usando em cada máquina um controlador com uma única entrada, combinando sinais locais e remotos, ou várias entradas, correspondentes à sinais locais e

remotos.

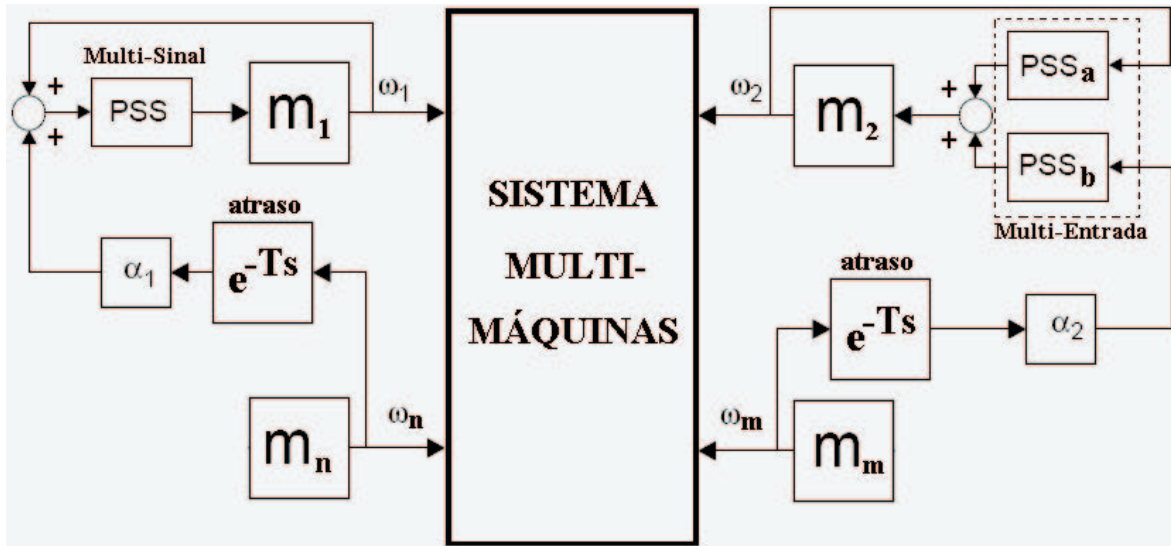


Figura 4.2: Estrutura de PSS com sinal local e remoto.

4.2.2.1 Estruturas de Controle Utilizadas

As estruturas de controle utilizadas nesta dissertação são descritas a seguir.

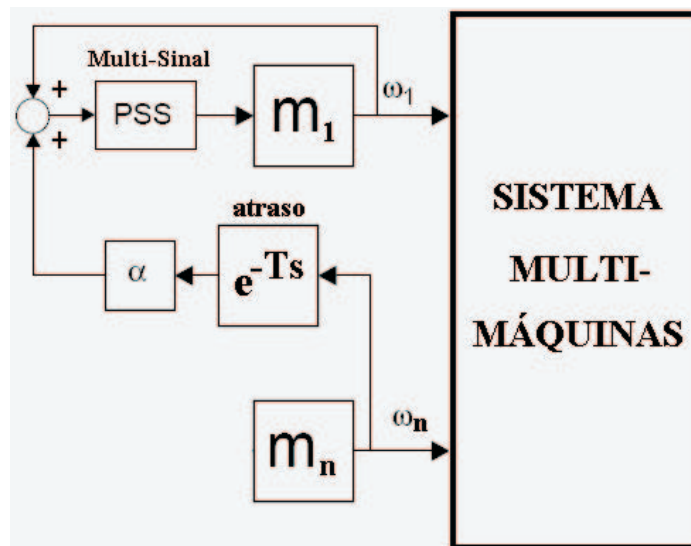


Figura 4.3: Estrutura de controle multi-sinal.

Controlador Multi-sinal:

Neste trabalho, denomina-se o termo controlador multi-sinal, como sendo um controlador

cuja estrutura permite uma única entrada composta por uma combinação de sinais locais e remotos. Esta estrutura é apresentada na Figura 4.3.

Observa-se que existe uma máquina com um único controlador com apenas uma entrada. Esta entrada como visto na Figura 4.3, é uma combinação de um sinal local com um sinal remoto. Pode-se considerar atrasos de tempo associados ao sinal remoto, bem como a atribuição de um peso para este sinal. Pode-se simular a perda do sinal remoto, fazendo $\alpha = 0$. Como vantagem desta abordagem, cita-se a simplicidade do controlador. Mesmo se tratando de mais de um sinal suplementar, apenas um controlador é projetado.

Controlador Multi-entrada:

Nesta seção, denomina-se o termo controlador multi-entrada, como sendo um controlador cuja estrutura permite o uso de múltiplos sinais de entrada. Para o caso onde o controlador têm duas entradas, a estrutura é formada por duas funções de transferência (uma para cada sinal de entrada). As entradas são compostas por um sinal local e um sinal remoto. Este esquema de controle pode ser visualizado na Figura 4.4.

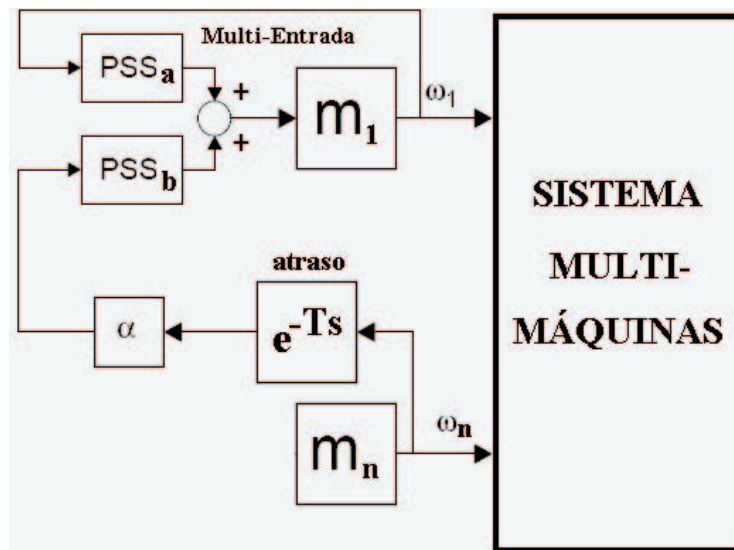


Figura 4.4: Estrutura de controle multi-entrada.

Observa-se que existe uma máquina com uma única estrutura de controle multi-entrada. Apesar de existirem duas funções de transferência, estas funções são coordenadamente projetadas e podem ser implementadas com apenas um dispositivo de controle multi-entrada. Cada função de transferência desta estrutura têm uma entrada específica (ver Figura 4.4). Uma função de transferência está associada ao sinal local e a outra ao sinal remoto. Atrasos de tempo podem ser considerados neste esquema, tal como pesos associados aos sinais e a perda de sinais remotos ($\alpha = 0$). Apesar da necessidade de projeto coordenado de duas

funções de transferência, como vantagem desta abordagem, cita-se a robustez conferida pela estrutura multi-entrada, no caso da perda de sinal remoto.

A diferença entre as estruturas de controle apresentadas, é que ao se utilizar a estrutura de controle multi-sinal, com apenas um controlador pode-se realizar uma combinação de múltiplos sinais e assim, formar uma única entrada para um único controlador. Com a estrutura de controle multi-entrada, têm-se um sistema de controle com possibilidade para várias entradas, cada uma associada a uma função de transferência, o que proporciona mais flexibilidade e robustez ao esquema de controle no caso de perda de links de comunicação. Atualmente, este tipo de controlador já é comercializado na sua versão digital, o que possibilita a implementação de várias funções de transferência no mesmo processador.

4.2.3 Atrasos de Comunicação

Neste trabalho, considerada-se a existência de atrasos de tempo associados ao sinal remoto. Este atraso ocorre devido ao tempo gasto com o processamento dos sinais, bem como a transmissão dos mesmos para os dispositivos de controle. Estes sinais são adquiridos através das unidades de medição fasorial e são enviados ao concentrador de dados. No PDC ocorre o processamento destes sinais para posterior disponibilização. O esquema de controle considerando atrasos de tempo fixo na disponibilização dos sinais remotos, pode ser visto nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Nestas figuras, o coeficiente T é quem determina quanto tempo o sinal demora para ser disponibilizado para o centro de controle. T pode variar da ordem de dezenas de ms à centenas de ms. Os atrasos de tempo considerados neste trabalho são do tipo fixo e são modelados através da aproximação de Padé de primeira ordem seguindo a referência [18], apresentada a seguir

$$e^{-Ts} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s} \quad (4.1)$$

4.2.4 Métodos de Projeto

A seguir, apresenta-se uma breve revisão de alguns métodos de projeto de controladores que consideram o uso de sinais locais e remotos. Questões relacionadas aos atrasos de tempo envolvidos na disponibilização dos sinais bem como a robustez dos controladores face a perda de um sinal remoto, são discutidas. Um método de projeto baseado no controle ótimo com restrições estruturais é apresentado.

4.2.4.1 Métodos de Projeto Propostos na Literatura

Existem diversas particularidades relevantes no projeto de controladores que combinam sinais locais e remotos. Um dos obstáculos que pode ser considerado (e na prática, deve

ser levado em consideração), é a existência de possíveis atrasos de tempo envolvidos entre o instante em que o sinal é adquirido e o instante em que as informações contidas no sinal são disponibilizadas para os controladores. Estes atrasos podem ser da ordem de poucas dezenas de milissegundos (30 a 70ms) ou até mesmo da ordem de algumas centenas de milissegundos (100 a 500ms). Este atraso pode ser considerado como de tempo fixo ou de tempo variável, sendo o último caso, o mais realista dentre as duas possibilidades. Cabe salientar também que estes atrasos sempre diminuem as margens de estabilidade dos sistemas de qualquer natureza. Outro problema associado ao uso de SMFs para melhorar o desempenho dinâmico de SEEs, é a perda de links de comunicação, ou seja, a possibilidade de se perder um sinal escolhido como sinal suplementar para ser usado em um controlador. Este problema é menos crítico com a utilização de uma estrutura descentralizada/hierárquica do que usando-se uma estrutura completamente centralizada, pois mesmo diante da possibilidade de uma perda de sinal, na estrutura de controle descentralizada, ainda têm-se o a vantagem de se ter um backup, ou seja, caso se perca algum sinal remoto por alguma razão, ainda pode-se utilizar os sinais locais e também outros sinais remotos que ainda estejam disponíveis. Em [28] apresentou-se um trabalho baseado em uma abordagem Descentralizada/Hierárquica envolvendo o projeto de controladores usando sinais locais e remotos através do uso de SMFs. O trabalho enfatiza as potencialidades do uso de sistemas de medição fasorial sincronizada para melhoria da performance dinâmica de sistemas elétricos de potência. Algumas limitações da abordagem proposta são apresentadas, tais como o fato de não se levar em consideração no estudo, a existência de atrasos de tempo na disponibilização dos sinais adquiridos pelas PMUs, bem como a perda de sinais remotos de controle.

Em [25] apresenta-se uma abordagem que faz uso de medições fasoriais sincronizadas locais e remotas para o projeto de controladores. A metodologia apresentada é dividida em duas etapas. A primeira etapa envolve a implementação de um algoritmo que executa a identificação de um modelo MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*) para pequenos sinais, de ordem reduzida, para um sistema em malha aberta. A segunda etapa se resume à escolha de uma estrutura de controle apropriada e o ajuste dos parâmetros dos controladores. O trabalho conclui que as informações obtidas através de sistemas de medição fasorial sincronizada tem um valor econômico considerável em termos de disponibilização da capacidade de transmissão, devido a efetividade da abordagem de projeto de controladores apresentada. Obviamente, não se aumenta a capacidade nominal de transmissão de potência do sistema em questão, apenas alcança-se uma melhor utilização do mesmo de tal forma a viabilizar um aumento na quantidade de potência transmitida nas linhas de transmissão do sistema.

Para o caso em que se consideram atrasos de tempo fixos entre o instante da aquisição do sinal e o da disponibilização do mesmo, pode-se utilizar diferentes técnicas de projeto de sistemas de controle, como por exemplo, adicionar uma quantidade adequada de avanço de fase na função de transferência do PSS [11], ou utilizar sistemas preditores para auxiliar na solução do problema [10]. Um método heurístico e consideravelmente simples de se adicionar um avanço de fase na função de transferência do controlador pode ser realizado

ao se projetar um PSS usando os sinais de ângulo como sinais suplementares e, após esta etapa, implementar o mesmo controlador, porém agora usando os sinais de frequência como sinais suplementares, pois esta é uma maneira simples e barata de se adicionar um avanço de fase de 90° na função de transferência do PSS. Contudo quando os atrasos de tempo (mesmo sendo fixos) são da ordem de mais de um segundo, este procedimento começa a se tornar inadequado e impraticável, devido aos grandes avanços de fase necessários para compensação. Neste caso, o trabalho apresentado em [27] propõe a técnica de controle Bang-Bang não-linear como sendo uma ferramenta adequada (porém segundo o próprio autor, não tão efetiva) para auxiliar na solução do problema. Outra forma de tratar o problema é considerar a planta como sendo um sistema do tipo *Dead-Time*, ou seja, considerar que a saída medida leva um certo tempo até afetar a entrada de controle e também a ação da entrada de controle leva um determinado tempo antes de influenciar as saídas medidas. Neste caso, um sistema preditor pode ser usado para atacar este tipo de problema. Em [10] apresentou-se um trabalho que leva em consideração a existência de atrasos (de tempo fixo) da ordem de 0,75 s. A abordagem apresentada faz uso de um preditor do tipo USP (*Unified Smith Predictor*) para realizar a formulação do projeto de um controlador para adicionar amortecimento a sistemas elétricos de potência e tem como objetivo eliminar qualquer tipo de resposta não-controlável que possa dominar a performance do controlador. Um controlador do tipo \mathcal{H}_∞ é projetado resolvendo-se o problema via LMIs - *Linear Matrix Inequalities* [24], [44] com restrições adicionais de alocação de pólos. Outros trabalhos também destacam o potencial do uso de SMFs como fonte de sinais suplementares para adicionar amortecimento à modos mal amortecidos com PSSs [47] e também dispositivos FACTS - *Flexible AC Transmission System* [57].

Com respeito ao projeto de controladores via *Desigualdades Matriciais Lineares* (LMIs), pode-se citar como vantagens encontradas nesta metodologia o fato de que uma grande variedade de problemas em sistemas de controle podem ser formulados (ou reformulados) como problemas de otimização convexa envolvendo LMIs, isto é, um conjunto de restrições que requerem uma combinação de matrizes simétricas para serem positivas semidefinidas. Um exemplo de LMI é a equação de Lyapunov. A equação diferencial

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) \quad (4.2)$$

é estável se e somente se existe uma matriz P positiva definida que satisfaça

$$A^T P + PA < 0 \quad (4.3)$$

A restrição $P > 0$, $A^T P + PA < 0$ é o que se conhece por desigualdade de Lyapunov em P , o que é uma forma especial de uma desigualdade matricial linear. Esta LMI pode ser resolvida, ou seja, pode-se encontrar um P que satisfaça as restrições descritas, solucionando-se a equação de Lyapunov. Existem programas computacionais especializados na resolução de LMIs tais como a “LMI Control Toolbox” (Matlab), a “Lmitool” (Matlab e Scilab), entre

outros.

Na próxima seção, apresenta-se a técnica de controle utilizada neste trabalho para o projeto de controladores que fazem uso de sinais remotos para adicionar amortecimento à modos de oscilação eletromecânicos do sistema.

4.2.4.2 Controle Ótimo com Restrições Estruturais

O objetivo principal desta seção não é a apresentação de uma nova abordagem de projeto de estabilizadores, mas sim de mostrar uma maneira de como o uso de SMFs, ou seja, o uso de sinais transmitidos remotamente para os controladores, pode ser incorporado em uma abordagem de projeto de PSSs. O enfoque principal dado na seção seguinte é para a descrição da abordagem de controle ótimo com restrições estruturais, porém com algumas variações incluídas, tal como apresentado em [19]. Inicialmente apresenta-se brevemente a descrição matemática do sistema aumentado (sistema e controlador) e o *Problema do Regulador Linear Quadrático (PRLQ)*.

Novamente, considere as equações lineares de estado que representam um modelo linearizado de um sistema invariante no tempo

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A x + B u \\ y &= C x\end{aligned}\quad (4.4)$$

onde, x é o vetor das variáveis de estado, u representa as entradas do sistema e y as saídas do mesmo.

As equações de estado do controlador na *Forma Canônica Observável (FCO)* são dadas por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= A_c x_c + B_c u_c \\ y_c &= C_c x_c + D_c u_c\end{aligned}\quad (4.5)$$

A saída y do sistema é a entrada u_c do controlador. A saída y_c do controlador é a entrada u do sistema.

Pode-se combinar a equação

$$y = Cx$$

que define as saídas do sistema, com as equações de estado do controlador na *Forma Canônica Observável (FCO)* para formar um sistema aumentado [40] representado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A + B D_c C) & B C_c \\ B_c C & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix}\quad (4.6)$$

A equação matricial acima pode ser re-escrita como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Fazendo

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_a = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad C_a = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix}$$

as equações do sistema aumentado podem ser representadas de maneira compacta por:

$$\dot{x}_a = (A_a + B_a G C_a) x_a \quad (4.8)$$

onde

$$x_a = \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

As matrizes A_c e C_c são conhecidas previamente, pois os pólos do controlador são fixados. Ou seja, a ordem do controlador é fixada e o sistema então possui realimentação dinâmica. As incógnitas do problema são as matrizes B_c e D_c . Estas matrizes são obtidas a partir da matriz de ganhos G , que pode ser obtida usando controle ótimo. Portanto, a síntese de um controlador dinâmico é equivalente ao cálculo da realimentação estática das saídas do sistema aumentado. Este esquema pode ser visto na Figura 4.5.

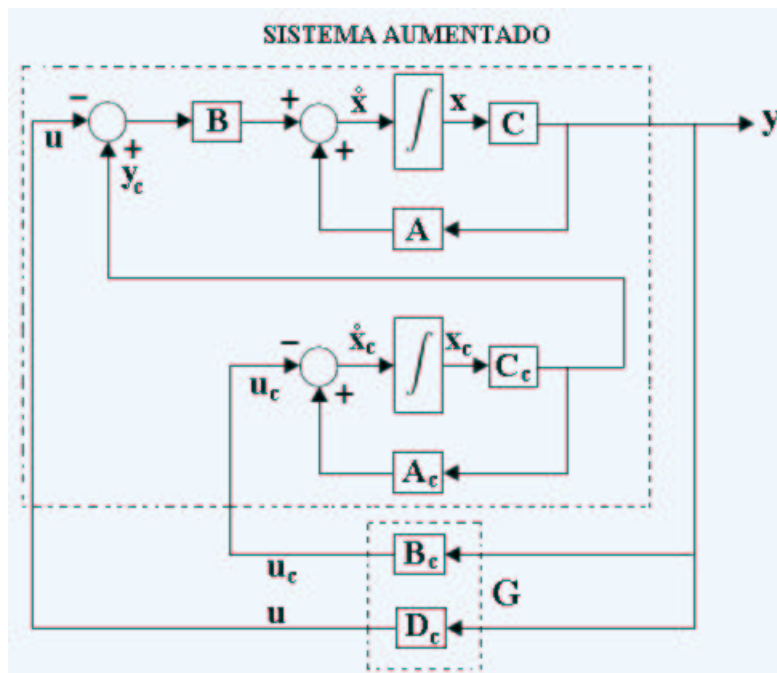


Figura 4.5: Diagrama de blocos do sistema aumentado.

Ao se definir uma função objetivo quadrática a ser minimizada tal como

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T [x^t Q x + u^t R u] dt \quad (4.10)$$

sujeito as restrições da equação 4.4, onde Q é a matriz que pesa o desvio dos estados e R pesa o esforço de controle, então pode-se afirmar que uma lei de controle ótima (Equação 4.11) pode ser obtida.

$$u = -K^* x \quad (4.11)$$

onde $K^* = R^{-1} B^t P^*$ é o ganho ótimo e P^* é a solução positiva semi-definida e simétrica da equação de Ricatti:

$$A^t P^* + P^* A - P^* B R^{-1} B^t P^* + Q = 0 \quad (4.12)$$

Como característica positiva, esta abordagem confere uma certa robustez ao sistema assegurando uma margem de fase de pelo menos 60° . Porém como desvantagem, surge o fato de que a implementação física desta abordagem nem sempre é viável, pois esta técnica de controle exige a disponibilidade de todas as variáveis de estado. Para os sistemas em que a medição de todas as variáveis de estado não podem ser medidas, ainda existe a possibilidade de se usar observadores de estado. No caso de sistemas de potência, tanto a disponibilidade de todas as variáveis de estado não é permitida (devido a restrições físicas tal como medição de ângulo de geradores) quanto o uso de observadores de estado se torna proibitivo devido ao fato de que sistemas elétricos de potência são sistemas não-lineares complexos e de ordem elevada. A partir de todas estas dificuldades, surge a idéia de se utilizar a realimentação das saídas do sistema.

Assim, pode-se associar os estados representados por x , com as saídas dadas por y , através de uma lei de controle do tipo

$$u_s = -G y \quad (4.13)$$

tal que

$$K = G C \quad (4.14)$$

O ganho K só pode ser encontrado se a seguinte equação for satisfeita

$$K - K C^t (C C^t)^{-1} C = 0 \quad (4.15)$$

Caso K satisfaça a equação acima, então o ganho de realimentação de saídas é dado por

$$G = K C^t (C C^t)^{-1} \quad (4.16)$$

A obtenção da expressão matemática acima pode ser feita ao se pós-multiplicar por C^t a Equação 4.14 em ambos os lados, e logo em seguida efetuarem-se algumas simples manipulações matemáticas.

Pode-se perceber que a nova lei de controle apesar de ser uma realimentação de saídas, ainda está associada aos estados, pois

$$u_s = -Gy \quad (4.17)$$

$$= -GCx \quad (4.18)$$

A solução do problema de controle ótimo é apresentada em [20], através da solução de uma equação de Ricatti generalizada:

$$A^t P + PA - PBR^{-1}B^t P + Q + L^t RL = 0 \quad (4.19)$$

onde

$$K + L = R^{-1}B^t P \quad (4.20)$$

Mostra-se em [20] que a matriz K obtida através da solução desta equação, estabiliza o sistema. A matriz L permite que as restrições estruturais sejam consideradas.

O valor da função custo pode então ser calculado por

$$J(K) = \frac{1}{2}x_0^t P x_0 \geq \frac{1}{2}x_0^t P^* x_0 = J(K^*) \quad (4.21)$$

onde, $J(K) \geq J(K^*)$ é o preço que se paga para atender as restrições estruturais.

Um algoritmo para a resolução do PRLQ com restrições estruturais foi apresentado em [19] e usado aqui no projeto dos controladores.

Algoritmo

1. Faça $j = 0$ e $P_0 = P^*$;
2. Determine $L_{j+1} = F(R^{-1}B^t P_j)$
3. Defina $Q_{j+1} = Q + L_{j+1}^t RL_{j+1}$ e resolva a seguinte equação de Ricatti generalizada

$$A^t P_{j+1} + P_{j+1}A - P_{j+1}BR^{-1}B^t P_{j+1} + Q_{j+1} = 0$$

4. Se $\rho \leq \varepsilon$ para $\varepsilon \geq 0$ suficientemente pequeno, ir para o passo 5, senão incremente j e retorne ao passo 2, sendo que ρ pode ser determinado pelos seguintes critérios de convergência [19]:

$$\rho = \frac{\|P_{j+1} - P_j\|}{\|P_j\|}, \text{ ou} \quad (4.22)$$

$$\rho = \frac{\|L_{j+1} - L_j\|}{\|L_j\|}, \text{ ou} \quad (4.23)$$

$$\rho = \frac{\|J(K_{j+1}) - J(K_j)\|}{\|J(K_j)\|} \quad (4.24)$$

5. Determine o ganho de realimentação através de

$$K = R^{-1}B^t P_j - L_{j+1}$$

4.3 Estabilidade Transitória

A estabilidade transitória pode ser definida como a capacidade das máquinas de um sistema manterem sincronismo quando ocorrem grandes perturbações, tais como curto-circuitos, queda de linhas de transmissão importantes, entre outras. Ou seja, se está interessado em saber se o sistema é capaz de manter o sincronismo durante e logo após a perturbação. O primeiro ciclo do período transitório é muito importante para avaliar a estabilidade transitória do sistema. Para este tipo de análise, necessita-se de modelos não-lineares para o sistema.

O problema do posicionamento de PMUs também é importante para aplicações relacionadas à estabilidade transitória, tais como esquemas de proteção, controle de emergência, entre outros. Este problema foi abordado no Capítulo 3.

Em [52], sugere-se que nos EUA, uma das grandes motivações para a iniciativa de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para a monitoração de sistemas elétricos de potência, bem como de novas aplicações nas áreas de controle e proteção, foi o *blackout* de agosto de 2003 ocorrido na região nordeste dos EUA, entre outros eventos semelhantes que também ocorreram na mesma época naquela região. Estas ocorrências salientaram a necessidade de novas metodologias para tomada automática de decisões visando a melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência diante de ocorrências indesejáveis e face as novas mudanças introduzidas atualmente no setor de SEE.

No artigo citado acima, o alvo de pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema cuja função é de monitorar SEEs de grande porte e também tomar automaticamente decisões para realizar chaveamento de capacitores shunt e em série, corte de cargas e também desligamento de geradores. O surgimento do projeto WACS (*Wide Area Stability and Voltage Control System*), é consequência de um esforço que data de 1996 por parte da BPA (*Bonneville Power Administration*). O WACS é uma plataforma flexível para implementação rápida de *tripping* de geradores e chaveamento de dispositivos de compensação de energia reativa visando a melhoria da estabilidade transitória e da estabilidade de tensão de SEEs de grande porte. Assim, não apenas nos EUA através da BPA, mas em diferentes países têm-se apresentado um crescente interesse pela utilização de sistemas de medição fasorial para aplicações de sistemas de proteção e de controle de emergência. Além de Brasil e EUA, países como Suécia, Canadá, Noruega, Finlândia, Islândia e Dinamarca já apresentaram o seus respectivos

interesses nesta área, com alguns resultados promissores já apresentados na literatura ([14], [17], [45], [47] e [13]).

Em [55] apresentou-se um esquema de controle emergencial rápido para prevenção de interrupções devido a faltas severas em sistemas de EHV (*Extra High Voltage*) com grande transferência de potência entre áreas. O método se baseia em duas etapas principais. A primeira etapa consiste em executar um sistema de detecção/localização de faltas, fazendo uso das informações provenientes de PMUs. Esta etapa é importante para iniciar o controle emergencial e assim, evitar uma seqüência indesejada de *trips* em relés de proteção. A etapa seguinte consiste em usar as medidas fasoriais em tempo real para estimar os parâmetros de um sistema do tipo OMIB (*One Machine-Infinite Bus*). É proposto corte de carga (*Load Shedding*) e controle de atuação rápida de válvulas de turbinas (*Fast Turbine Valving - FTV*) como medidas emergenciais. A abordagem apresentada sugere o uso do critério das áreas iguais para a determinação do tempo de atuação e a quantidade de carga a ser cortada.

Ainda na área de controle emergencial, em [56] apresenta-se um trabalho em que faz-se uso de medições fasoriais sincronizadas para realizar a detecção/localização de faltas. Após a etapa de detecção/localização de faltas, os centros de controle tem a tarefa de realizar a seleção adequada de geradores para receber sinais de corte de geração, através de simulações off-line e buscas de dados on-line. Através do uso de PMUs, realiza-se também a monitoração dinâmica do sistema através do uso de diferentes curvas e diagramas derivados de variáveis de estado medidas.

Esquemas de emergência para controle de frequência também podem ser desenvolvidos fazendo uso de SMFs. Em [31], propôs-se um método preditivo coordenado para controle emergencial de frequência para detectar perturbações e determinar ações de controle adequadas para limitar ou ainda, evitar colapsos no sistema. O método de predição da progressão da frequência proposto evita as desvantagens de esquemas de corte de carga (*load shedding*) local face a subfrequência, tais como atraso na resposta e super-dimensionamento do corte de carga. Da mesma forma que em [55], o trabalho faz uso de medições fasoriais sincronizadas para a determinação de um modelo equivalente OMIB para cada área. Além do modelo máquina-barras infinita, calcula-se a sensibilidade da frequência das cargas usando as informações obtidas com as PMUs.

Abaixo, apresenta-se um exemplo de uma aplicação de controle de emergência que faz uso de informações provenientes de SMFs, ou seja, que faz uso de medidas fasoriais sincronizadas disponibilizadas por PMUs. Basicamente, o método é um esquema de tomada rápida de decisões de controle com o objetivo de evitar *blackouts* devidos a grandes perturbações e sucessivas atuações de relés, evitando assim o desligamento de várias linhas de transmissão importantes de um dado sistema elétrico de potência. O método foi inicialmente proposto em [55].

A abordagem proposta necessita de PMUs instaladas junto aos geradores e também nas principais linhas de transmissão do sistema. O método também necessita de um algoritmo

de detecção/localização de faltas para detectar/localizar as faltas ocorridas no sistema. Os SMFs podem ser usados neste processo para garantir a precisão e a sincronização necessária na aquisição dos sinais para iniciar as ações de controle emergencial a fim de se evitar uma seqüência indesejada de eventos envolvendo atuações de relés sempre que necessário. Após a etapa de detecção/localização de faltas, utilizam-se as medidas fasoriais sincronizadas para estimar os parâmetros de um sistema do tipo Máquina-Barra-Infinita (OMIB). As ações de controle emergencial consistem em corte de carga e controle de atuação rápida nas válvulas das turbinas. A estratégia para determinação do tipo de ação de controle e do tempo de atuação da mesma é baseada no já bem conhecido critério das áreas iguais. Para resumir, as etapas para a tomada de decisões e de ações de controle podem ser descritas como segue abaixo:

- Através das informações provenientes dos SMFs (PMUs instaladas nas barras de geração e nas principais linhas de transmissão do sistema), o centro de controle deve executar um aplicativo baseado em um algoritmo de detecção/localização de faltas para iniciar o processo de controle;
- A partir da ocorrência de uma dada falta, que foi devidamente detectada/localizada na etapa anterior, deve-se separar o sistema multimáquinas em duas áreas coerentes (uma área contendo o conjunto crítico de máquinas e a outra com as máquinas restantes). A seguir, deve-se transformar os dois subconjuntos de máquinas em duas máquinas equivalentes para em seguida, transformá-los em um sistema do tipo OMIB;
- Determinar os parâmetros relacionados às ações de controle (tipo, montante e tempo de atuação). As ações de controle se restringem em corte de carga e atuação rápida nas válvulas das turbinas (*fast valving*) e são baseadas no critério das áreas iguais.

Para a primeira etapa usam-se algoritmos como os apresentados em [8]. Para a etapa de identificação parte-se da equação diferencial que descreve o comportamento do sistema OMIB, dada por

$$\ddot{\delta} = P + B \cos(\delta) + C \sin(\delta) \quad (4.25)$$

A equação acima pode ser aproximada pela seguinte expressão:

$$\ddot{\delta}(m\Delta t) \approx \frac{\delta((m+1)\Delta t) - 2\delta(m\Delta t) + \delta((m-1)\Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad m = 1, \dots, N-1 \quad (4.26)$$

Os coeficientes P , B e C da equação 4.25, são os parâmetros que devem ser estimados. Para a realização desta estimativa, devem-se ter disponíveis os ângulos dos geradores do sistema. Estes ângulos são fornecidos pelo PDC, que por sua vez é alimentado pelas PMUs instaladas nas barras de geração do sistema. A estimativa dos parâmetros é realizada minimizando-se o erro de estimativa através do método dos mínimos quadrados, onde o erro

de estimação $e(t)$ é dado por

$$e(t) = \ddot{\Delta} - P - B \cos \delta(t) - C \sin \delta(t) \quad (4.27)$$

Deve-se fazer com que o erro $e(t)$ seja o menor possível, e pode-se alcançar isto minimizando

$$\text{Min } P, B, C \sum_{m=1}^{N-1} e^2(m\Delta t)$$

onde o somatório é realizado de 1 a $N - 1$, devido ao fato de $\ddot{\delta}(0)$ e $\ddot{\delta}(N\Delta t)$ não estarem disponíveis.

Ao se considerar

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos \delta(\Delta t) & \sin \delta(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \delta((N-1)\Delta t) & \sin \delta((N-1)\Delta t) \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \ddot{\delta}(\Delta t) \\ \vdots \\ \ddot{\delta}((N-1)\Delta t) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

pode-se encontrar a estimativa dos parâmetros via mínimos quadrados através da seguinte expressão

$$\begin{bmatrix} P \\ B \\ C \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.29)$$

Sabe-se que quando um sistema do tipo OMIB sofre uma dada perturbação, isto faz com que a máquina do sistema comece a oscilar contra a barra infinita e que pode-se usar o critério das áreas iguais para determinar a estabilidade do sistema sob condições transitórias sem necessitar resolver a equação da oscilação. Para isto utilizam-se as curvas $P - \delta$ para analisar as condições físicas do sistema antes, durante e depois da falta. Assim, pode-se executar ações de controle emergencial com mais precisão.

Para a etapa de quantificação de ações de controle, podem-se ser utilizados alguns métodos apresentados na literatura ([31], [55] e [56]).

Os resultados apresentados na referência, comprovaram que a intenção da abordagem em melhorar a precisão e a rapidez no processo de tomada de decisões face a grandes perturbações no sistemas, foi alcançada.

4.4 Estabilidade de Tensão

Sistemas de proteção de sistemas de grande porte, baseados em medições fasoriais sincronizadas, devem propiciar o aumento da capacidade de transmissão de potência e também da confiabilidade do sistema, e devem limitar a severidade de perturbações através de

um sistema de detecção/localização de faltas seguido pela proposição e execução de medidas estabilizadoras coordenadas. Em [46] apresenta-se um projeto de um sistema baseado em medições fasoriais sincronizadas com objetivo de executar esquemas de proteção para frequência, estabilidade angular à pequenos sinais e instabilidade de tensão. O principal enfoque do trabalho é a aplicação de SMFs para controle emergencial da estabilidade de tensão. O trabalho apresenta em detalhes o desenvolvimento de um sistema de proteção que faz uso de SMFs. O sistema proposto baseia-se em estimação linear de estados para fazer a avaliação da estabilidade e também para a determinação de decisões de correções de emergência.

Na atualidade, já existe a possibilidade de implementação de métodos computacionalmente efetivos para predição de colapso de tensão em tempo real fazendo uso de medições fasoriais sincronizadas. Informações como magnitude e ângulo das tensões nodais podem ser obtidas através de SMFs. Vários métodos para predição de colapso de tensão e tomada de decisões de controle de emergência foram propostos na literatura [7], porém poucas técnicas *online* foram apresentadas [21]. Na atualidade percebe-se a necessidade da implementação de uma abordagem que possa ser viabilizada para execução *online*. Alguns métodos de análise e predição de colapso de tensão são brevemente discutidos a seguir.

A análise da estabilidade de tensão usando o sinal de tensão de apenas uma barra específica não dará uma informação adequada sobre um colapso de tensão iminente. Algumas vezes, os níveis de tensão podem cair abaixo dos limites aceitáveis devido a um alto carregamento de um momento de pico. Porém isto é apenas uma condição de baixa tensão e não necessariamente leva um sistema a um colapso de tensão. Conseqüentemente, apenas monitorar os níveis de tensão também não é a opção mais adequada para ser usada como índice para predição de colapso de tensão. Um método bastante difundido e explorado pelas empresas do setor de energia elétrica é o método de cálculo e traçado das curvas $P - V$ e $P - Q$ das barras de carga selecionadas. Apesar da grande importância e utilidade desta abordagem, geralmente estas curvas são geradas através da execução de diversos fluxos de potência, utilizando para isto métodos e modelos convencionais para SEEs e seus elementos. Estas técnicas podem ser exaustivas do ponto de vista computacional para uso em aplicações *online*. Sendo assim, não se obtém as informações necessárias para tomada de decisões de controle em tempo hábil para controle em tempo real. Além disso, este tipo de procedimento focaliza barras individualmente, ou seja, as características de estabilidade de tensão são traçadas ao se carregar cada barra, independentemente do carregamento das outras barras do sistema. Este procedimento pode acabar distorcendo de certa forma a realidade das condições da estabilidade do sistema sob estudo. Por fim, alguns índices de sensibilidade podem ser obtidos ao se usar a matriz Jacobiana. Porém, quando o sistema está sob um carregamento muito elevado, os geradores podem alcançar os seus limites de fornecimento de energia reativa. Como os índices de sensibilidade são baseados na execução de seguidos fluxos de potência, no caso de um alto carregamento, as barras $P - V$ serão redefinidas como barras $P - Q$, pois a geração de energia reativa deixa de ser uma incógnita para ser fixada nos valores máximos de fornecimento de cada gerador, e portanto, os índices de sensibilidade

certamente sofrerão mudanças consideráveis. Existem outros métodos propostos de análise da estabilidade de tensão para previsão de colapsos de tensão, sendo que muitos são apenas variações das técnicas brevemente citadas acima.

Pode-se concluir a partir dos comentários apresentados acima, que na atualidade há a necessidade de métodos de análise e previsão de instabilidade de tensão, que trabalhem com diferentes condições de operação e que levem em consideração outros parâmetros relevantes do sistema, além das informações dos fasores de tensão, que podem ser adquiridos através dos SMFs. Com os crescentes avanços da tecnologia dos sistemas de telecomunicações e de processamento de dados, informações provenientes de SMFs podem ser usadas pelas empresas do setor elétrico como um modo de realizar a previsão e a análise *online* da estabilidade de tensão.

Apenas para se ter um exemplo de um método eficiente e viável para execução *online* de análise da estabilidade de tensão, apresenta-se abaixo o método proposto em [3]. O método faz uso das magnitudes e dos ângulos das tensões das barras do sistema e também da matriz das admitâncias nodais do sistema. A técnica apresentada é derivada das equações básicas do fluxo de potência e esta abordagem é aplicável para qualquer número de barras de um sistema. A proposta do método é fazer uso dos benefícios existentes de SMFs para obter as magnitudes e os ângulos das tensões das barras participantes do sistema. O objetivo do trabalho é definir um índice de previsão de colapso de tensão. O índice criado é denominado VCPI (do termo em inglês *Voltage Collapse Prediction Index*) e é definido para cada barra do sistema. Os valores de VCPI determinam a proximidade de uma determinada barra ao colapso de tensão. A descrição matemática detalhada do método pode ser encontrada em [3], porém abaixo apresenta-se a expressão matemática do índice VCPI.

$$VCPI_{barra\ i} = \left| 1 - \frac{\sum_{m=1, m \neq k}^N V'_m}{V_k} \right| \quad (4.30)$$

onde

$$V'_m = \frac{Y_{km}}{\sum_{j=1, j \neq k}^N Y_{kj}} V_m \quad (4.31)$$

é a tensão complexa na barra m e Y_{kj} é a admitância entre as barras k e j .

Como vantagem desta abordagem, pode-se citar a inclusão dos efeitos das cargas nas outras barras ao se estimar VCPI em uma determinada barra. Outra vantagem é que o método requer apenas uma pequena quantidade de cálculos para prever o colapso de tensão em uma barra e que a inversão de matrizes não são necessárias, o que economiza um tempo considerável de CPU no caso de sistemas de grande porte.

Este método mostra que com o uso de SMFs, pode-se realizar uma monitoração *online* do sistema para ajudar os operadores a tomarem ações preventivas em tempo real baseadas em estudos *off-line*, perante a ocorrência de contingências.

4.5 Conclusão

O principal objetivo deste capítulo foi enfatizar as diversas possibilidades de aplicações associadas aos SMFs. A estabilidade transitória, para pequenas perturbações e a estabilidade de tensão foram abordadas, com a apresentação de diversas aplicações apresentadas na literatura.

Com respeito a estabilidade para pequenas perturbações, um método de controle ótimo com restrições estruturais foi discutido. Este método foi utilizado para o projeto de controladores que fazem uso de sinais locais e remotos nesta dissertação. Discutiu-se também, a existência de atrasos de tempo associados a disponibilização dos sinais remotos do concentrador de dados aos centros de controle. Foi mostrado que estes atrasos podem ser levados em consideração através da aproximação de Pade [18].

No próximo capítulo, os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introdução

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos nesta dissertação de mestrado. As aplicações estudadas referem-se principalmente à estabilidade para pequenas perturbações. As seções deste capítulo estão divididas em duas partes, cada uma abrangendo um sistema teste diferente.

Os sistemas teste utilizados neste trabalho são o Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado de 7 barras e 5 máquinas e o Sistema Teste New England de 39 barras e 9 máquinas. Para cada sistema serão apresentados os resultados do posicionamento de PMUs e do controle para pequenas perturbações, bem como uma análise das características do comportamento dinâmico. Para o equivalente Sul Sudeste será dado um maior enfoque para a alocação visando a estabilidade para pequenas perturbações e para o controle dos modos de oscilação eletromecânicos com desempenho dinâmico insatisfatório. Alguns testes envolvendo atrasos de tempo fixo associados aos sinais remotos serão analisados. Para o sistema New England serão apresentados resultados da alocação de PMUs tanto para estabilidade transitória, quanto para a estabilidade para pequenos sinais, porém alguns resultados obtidos para o controle de modos de oscilação de baixo amortecimento são também apresentados.

5.2 Sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste Modificado

O sistema está representado na Figura 5.1. Os dados do sistema estão apresentados no Apêndice A e também podem ser encontrados em [34]. O sistema é um equivalente modificado de 7 barras da região sul-sudeste brasileira. A usina hidrelétrica de Itaipú está conectada

à região sudeste (representada por uma carga estática e um grande motor síncrono) através de uma linha de transmissão de 765 kV com compensação série. Há também uma barra intermediária de 765 kV interconectada a uma rede de transmissão de 500 kV contendo outras 3 usinas hidrelétricas (Salto Santiago, Salto Segredo e Foz do Areia). Este sistema foi inicialmente utilizado nos estudos de planejamento para o complexo de geração de Itaipu junto com as linhas de transmissão em corrente alternada associadas. Os modelos de reguladores de tensão considerados são baseados em um sistema simples de primeira ordem, que por sua vez é comum a todas as máquinas, com o intuito de simplificar a análise do sistema. Todas as cargas estáticas do sistema são do tipo impedância constante. O ponto de operação considerado é derivado de uma condição de carregamento pesado do sistema original, porém a quantidade de potência transmitida na linha de 765 kV foi aumentada em 10%. Abaixo apresenta-se um resumo das aplicações que serão executadas para a obtenção de resultados neste sistema.

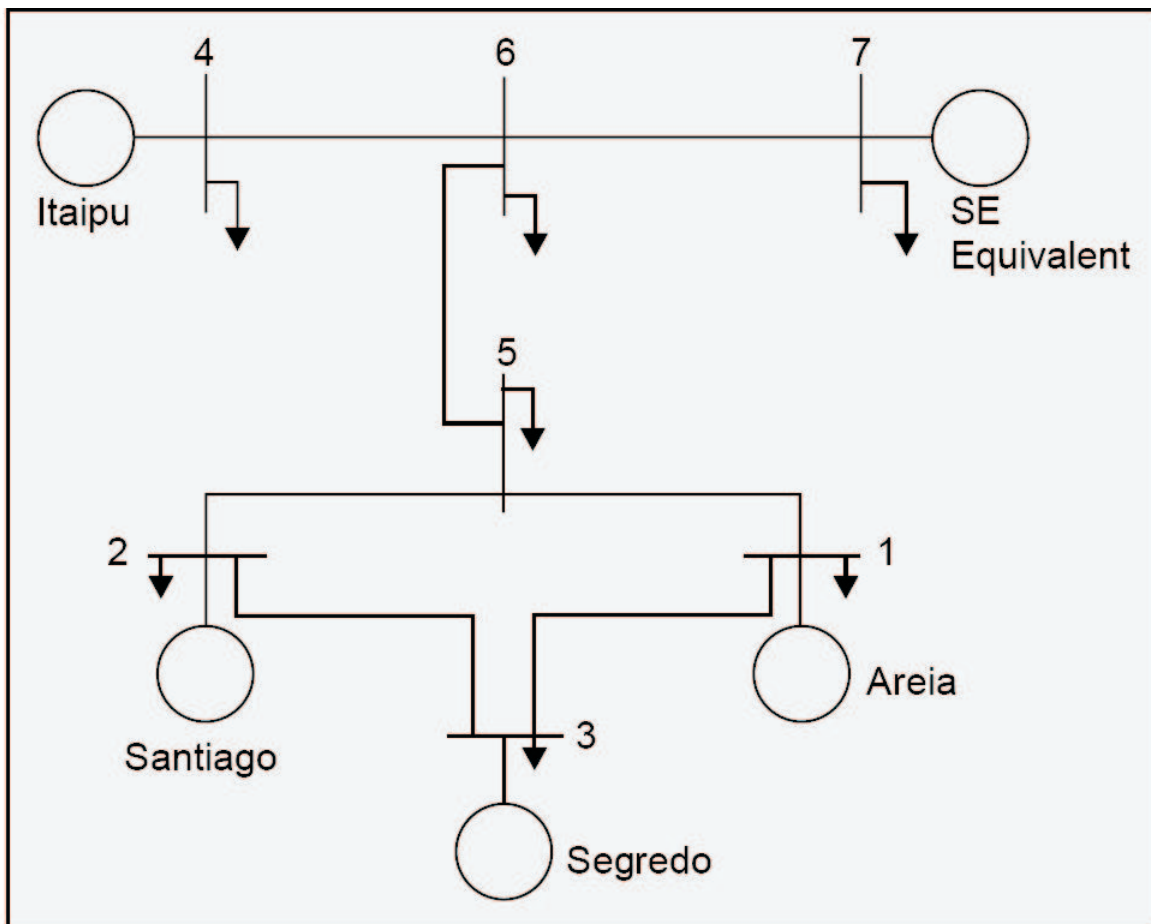


Figura 5.1: Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado.

- Alocação de PMUs usando o critério que faz uso dos índices de observabilidade (ver seção 3.2.4);
- Alocação de PMUs usando a Norma Gramiana aplicada na matriz de informação for-

mada pelas respostas no tempo (Z_B) das variáveis medidas;

- Melhoria do desempenho dinâmico do sistema através do projeto de apenas um PSS cuja estrutura, permite o uso de combinações de medidas locais e remotas;
- Melhoria do desempenho dinâmico do sistema através do projeto de PSSs (um para cada entrada), utilizando medidas locais e remotas;
- Consideração da perda de sinais remotos envolvidos;
- Consideração de atrasos de tempo envolvidos na disponibilização dos sinais remotos.

O enfoque principal dos testes realizados para este sistema é na estabilidade para pequenos sinais. Mais adiante, na seção 5.2.2, serão discutidos algumas das características deste sistema, que o tornam de interesse.

Tabela 5.1: Autovalores do sistema em malha aberta (sem PSSs).

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp(%)	Part. Factor					
1	,64646	5,3919	5,4305	,85815	-11,90%	DELT	4	ITAIPU	#	4	O
2	,64646	-5,3919	5,4305	-,85815	-11,90%						
3	-,22564	5,877	5,8813	,93535	3,84%	DELT	3	SALTSEGR	#	3	O
4	-,22564	-5,877	5,8813	-,93535	3,84%						
5	-1,8012	9,1759	9,351	1,4604	19,26%	DELT	2	SALTSANT	#	2	O
6	-1,8012	-9,1759	9,351	-1,4604	19,26%						
7	-2,0128	9,1678	9,3861	1,4591	21,44%	DELT	1	FOZAREIA	#	1	O
8	-2,0128	-9,1678	9,3861	-1,4591	21,44%						
9	-5,1883	6,2711	8,1391	,99808	63,75%	EQ'	3	SALTSEGR	#	3	O
10	-5,1883	-6,2711	8,1391	-,99808	63,75%						
11	-5,4722	4,0265	6,7939	,64083	80,55%	EQ'	4	ITAIPU	#	4	O
12	-5,4722	-4,0265	6,7939	-,64083	80,55%						
13	-5,944	2,3801	6,4028	,3788	92,83%	EQ' '	7	EQUIV SSE	#	7	O
14	-5,944	-2,3801	6,4028	-,3788	92,83%						
15	-29,193	0,	29,193	0,	100,00%	ED' '	3	SALTSEGR	#	3	O
16	-27,82	0,	27,82	0,	100,00%	EQ' '	2	SALTSANT	#	2	O
17	-27,67	0,	27,67	0,	100,00%	EQ' '	1	FOZAREIA	#	1	O
18	-24,662	0,	24,662	0,	100,00%	EQ' '	3	SALTSEGR	#	3	O
19	-22,626	0,	22,626	0,	100,00%	EFD	4	ITAIPU	#	4	O
20	-22,367	0,	22,367	0,	100,00%	EFD	7	EQUIV SSE	#	7	O
21	-18,497	0,	18,497	0,	100,00%	ED' '	2	SALTSANT	#	2	O
22	-18,039	0,	18,039	0,	100,00%	EFD	1	FOZAREIA	#	1	O
23	-17,193	0,	17,193	0,	100,00%	EFD	2	SALTSANT	#	2	O
24	-12,892	0,	12,892	0,	100,00%	ED' '	1	FOZAREIA	#	1	O
25	-7,1641	0,	7,1641	0,	100,00%	ED' '	4	ITAIPU	#	4	O
26	-4,1236	0,	4,1236	0,	100,00%	EQ'	7	EQUIV SSE	#	7	O
27	-1,4671	0,	1,4671	0,	100,00%	EQ'	2	SALTSANT	#	2	O
28	-,84195	0,	,84195	0,	100,00%	EQ'	3	SALTSEGR	#	3	O
29	,44409e-15	0,	,44409e-15	0,	10000,00%	WW	4	ITAIPU	#	4	O

5.2.1 Posicionamento de PMUs

A alocação de PMUs será executada visando os modos de oscilação eletromecânicos de interesse, pois este estudo visa a melhoria de modos eletromecânicos instáveis ou pouco

amortecidos através do uso de controladores (estabilizadores de sistemas de potência) cujas estruturas permitem a inclusão de sinais localizados remotamente. Os autovalores para o sistema considerado em malha aberta, são dados na Tabela 5.1.

Percebe-se que os modos de 0.858 Hz (modo isntável) e de 0.935 Hz (modo de baixo amortecimento) são os modos problemáticos deste sistema. De agora em diante, os modos acima mencionados serão denominados respectivamente de modo 1 (0.858 Hz) e modo 2 (0.935 Hz). Para o posicionamento de PMUs serão utilizadas as matrizes de informação obtidas pelos índices de observabilidade e usando respostas no tempo.

5.2.1.1 Matriz de Informação formada pelos Índices de Observabilidade

Para a realização desta etapa são necessárias as matrizes de estado do sistema linearizado em torno de um ponto de operação. A relação de entradas e saídas do sistema é mostrada na Tabela 5.2. O programa de posicionamento de PMUs foi executado visando obter informações sobre os modos 1 e 2. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Variáveis de entrada e saída da função de transferência multivariável.

SAÍDAS		ENTRADAS	
Sinal	Barra	Sinal	Barra
ω	Foz do Areia	V_{ref}	Foz do Areia
ω	Salto Santiago	V_{ref}	Salto Santiago
ω	Salto Segredo	V_{ref}	Salto Segredo
ω	Itaipú	V_{ref}	Itaipú

Tabela 5.3: Posicionamento de PMUs visando o conteúdo modal.

Resultados	
Modos Especificados	Barras Escolhidas
$-0.22564 \pm j5.877$	3 - Salto Segredo
$0.64646 \pm j5.3919$	4 - Itaipú

Estes resultados foram obtidos ao se utilizar o método apresentado na seção 3.2.4 e são coerentes com os resultados obtidos através dos “Mode Shapes”, Fatores de Participação e também dos Índices de Observabilidade. Portando, nas aplicações de controle para pequenas perturbações, pode-se usar estes resultados para se ter informações sobre quais máquinas possuem o sinal de velocidade dos rotores que dão informações sobre os modos especificados.

5.2.1.2 Matriz de Informação formada pelas Respostas no Tempo

A idéia inicial era fazer com que o conteúdo modal dos sinais obtidos junto a um programa de simulações não-lineares, fosse estimado através da análise de Prony. Porém, como visto na Tabela 5.1, o sistema é instável. Portanto, ao se aplicar uma perturbação, as variáveis envolvidas começarão a oscilar e estas oscilações crescerão com o tempo. Para este caso, encontrou-se problemas numéricos para estimar os sinais e realizar a decomposição modal.

Optou-se então por estudar como os sinais de ângulo das barras se comportam no que se refere à coerência angular. Mesmo com os ângulos crescendo indefinidamente no tempo, ainda assim, cada sinal associado a uma variável responderá de acordo com os modos que o compõem. Logo, mesmo com as oscilações crescendo no tempo, pode-se medir a coerência entre estes sinais e executar o método de posicionamento de PMUs para encontrar as localizações que forneçam a menor quantidade de redundância nas informações. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.4 e pode-se verificar que as duas primeiras barras escolhidas são as mesmas apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.4: Posicionamento de PMUs usando respostas no tempo.

Resultados	
Barras Candidatas θ_i	Barras Escolhidas
1 - Foz do Areia	4 - Itaipú
2 - Salto Santiago	3 - Salto Segredo
3 - Salto Segredo	6 - Barra de carga
4 - Itaipú	2 - Salto Santiago
4 - Itaipú	5 - Barra de carga
5 - Barra de carga	1 - Salto Santiago

Seis barras foram consideradas no conjunto de candidatas para o posicionamento de PMUs. A barra 7 (equivalente Sudeste) não foi incluída neste conjunto, pois esta barra representa um sistema equivalente. O objetivo deste estudo é escolher as primeiras barras que não sejam coerentes entre si. A Figura 5.2 mostra que a partir de um determinado número de PMUs adicionadas, as novas informações que acompanham as próximas PMUs são redundantes e não fornecem muito mais informações do que as obtidas através do conjunto de barras selecionadas. Novamente, ao se escolher duas localizações para a instalação de PMUs, as barras de geração de Itaipú e de Salto Segredo seriam as melhores opções.

Um estudo para determinar as localizações associadas aos modos escolhidos usando índices como “mode shapes”, índices de observabilidade e fatores de participação ([29] e [35]), indicou as mesmas barras escolhidas pelo programa de alocação de PMUs usando a matriz de informação formada pelo conteúdo modal e também formada pelas resposta no tempo, Isto demonstra coerência nos resultados obtidos.

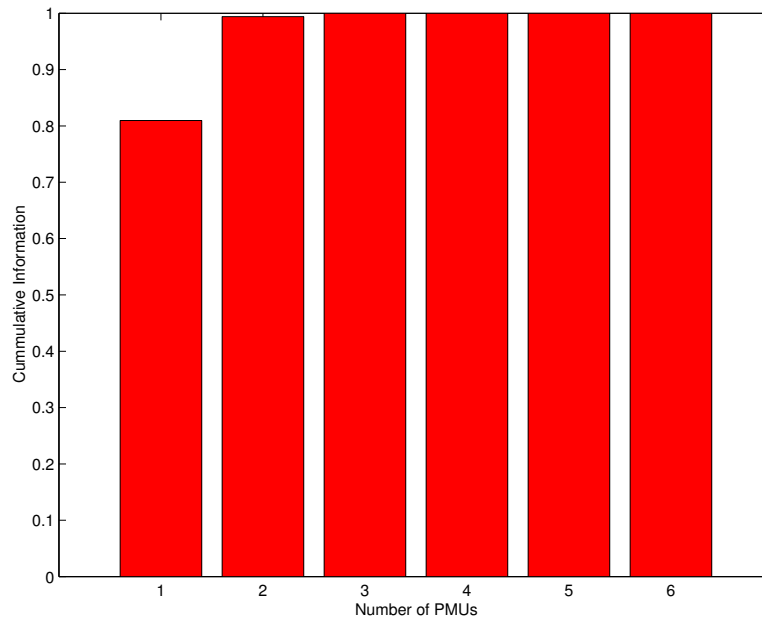


Figura 5.2: Quantidade de informação à cada barra adicionada.

5.2.2 Controle da Estabilidade para Pequenas Perturbações

5.2.2.1 Características Dinâmicas do Sistema

Este sistema possui algumas particularidades interessantes, portanto antes de se apresentar os resultados do controle, apresenta-se uma breve discussão sobre as características do seu comportamento dinâmico, já bem estudado na literatura ([11] e [34]).

A Tabela 5.5, mostra a presença de um par de pólos complexos conjugados posicionados no semi-plano direito do plano complexo. Este resultado indica que o sistema é instável. Portanto, o principal objetivo é melhorar o desempenho dinâmico destes modos. Na mesma tabela verifica-se a presença de um par de zeros complexos conjugados localizados no lado direito do plano complexo. Da teoria de sistemas lineares, sabe-se que o posicionamento de zeros da *função de transferência em malha aberta* (FTMA) de um sistema linear está intimamente associado à dificuldade de controlá-lo. Caso os zeros da FTMA deste sistema estejam posicionados no lado direito do plano complexo, o sistema se tornará instável para ganhos suficientemente elevados.

Por meio dos índices de controlabilidade, verifica-se que a usina de Itaipú é a melhor localização para instalação de um PSS. Os resultados da alocação de PMUs usando índices de observabilidade indicam que o sinal de velocidade do rotor desta usina possui informações sobre o modo instável. Neste sistema, se apenas um controlador com estrutura convencional for usado, há grande dificuldade em se estabilizar o sistema. A razão disto é que o sistema é de fase não-mínima e portanto, existirão ramos do lugar das raízes terminando no lado direito do plano complexo.

Tabela 5.5: Pólos e Zeros da FTMA para a máquina de Itaipú - $\omega(s)/V_{ref}(s)$.

Pólos da FTMA		Zeros da FTMA	
N	Itaipu - WW/VREF		
1	-29.1932		-29.1885
2	-27.8201		-27.8201
3	-27.6703		-27.6705
4	-24.6624		-24.6623
5	-22.6256		-22.3524
6	-22.3665		-18.5022
7	-18.4965		-17.1965
8	-18.0385		-18.0442
9	-17.1931		-2.0118 + j9.1660
10	-12.8915		-2.0118 - j9.1660
11	-2.0128 + j9.1678		-1.8016 + j9.1716
12	-2.0128 - j9.1678		-1.8016 - j9.1716
13	-1.8012 + j9.1759	0.0495	+ j5.9087
14	-1.8012 - j9.1759	0.0495	- j5.9087
15	0.6465 + j5.3919		-12.8298
16	0.6465 - j5.3919		-5.1329 + j5.8673
17	-0.2256 + j5.8770		-5.1329 - j5.8673
18	-0.2256 - j5.8770		-7.2343
19	-5.1883 + j6.2711		-6.2080 + j2.4691
20	-5.1883 - j6.2711		-6.2080 - j2.4691
21	-5.4722 + j4.0265		-1.7758 + j1.9575
22	-5.4722 - j4.0265		-1.7758 - j1.9575
23	-0.0000		-0.7503
24	-0.8420		-1.3095 + j0.1447
25	-1.4671		-1.3095 - j0.1447
26	-5.9440 + j2.3801		
27	-5.9440 - j2.3801		
28	-7.1641		
29	-4.1236		

Em [34] mostra-se que com quatro controladores pode-se estabilizar o sistema. Nota-se que três estabilizadores foram instalados nas usinas de Foz do Areia, Salto Segredo e Salto Santiago, porém com a função de deslocar o par de zeros de fase não-mínima para uma localização adequada, permitindo assim que o PSS instalado em Itaipú fosse mais efetivo na estabilização do sistema. Mostra-se em [34], que ao se retirar o PSS de Itaipú, ainda com três controladores o modo instável permaneceu praticamente inalterado, mesmo com os ganhos elevados até o infinito.

Estas características tornam este sistema muito difícil de ser controlado, necessitando de diversos controladores com estrutura convencional para estabilizar o sistema, ou de novas estruturas que utilizem sinais locais e remotos para adicionar amortecimento ao sistema.

5.2.2.2 Resultados Obtidos

A síntese de controladores é baseada no controle ótimo com restrições estruturais apresentada no Capítulo 4. Duas possibilidades são estudadas. A primeira abordagem considera um controlador com uma única entrada constituída por uma combinação de sinais locais e remotos. Na outra abordagem, projeta-se um controlador com duas entradas, sendo que uma entrada é um sinal local e a outra é um sinal remoto. Esta última abordagem implica que o PSS corresponde a duas funções de transferência. Em ambos os casos, avalia-se a robustez do projeto ao se retirar propositadamente o sinal remoto, de tal forma a simular uma possível perda de elo de comunicação e verificar a robustez do sistema perante esta ocorrência. Serão considerados casos com diferentes valores para o atraso de tempo fixo na disponibilização do sinal remoto. Os atrasos de tempo existentes foram modelados pela aproximação de Padé de primeira ordem [18] (ver seção 4.2.3).

A Tabela 5.5 mostra que os modos dominantes deste sistema são representados pelos autovalores $0.64646 \pm j5.3919$ e $-0.22564 \pm j5.877$, denominados anteriormente de modos 1 e 2 de aproximadamente 0.86 Hz e 0.94 Hz respectivamente. A Figura 5.3 demonstra que o modo 1 consiste na oscilação entre a usina de Itaipú contra o equivalente Sudeste. O modo 2 existe devido às oscilações entre o sistema Sul composto pelas usinas de Foz do Areia, Salto Santiago e Salto Segredo contra o sistema equivalente Sudeste e a Usina de Itaipú, como pode ser visto na Figura 5.3. Estes resultados foram obtidos através do programa PACDYN.

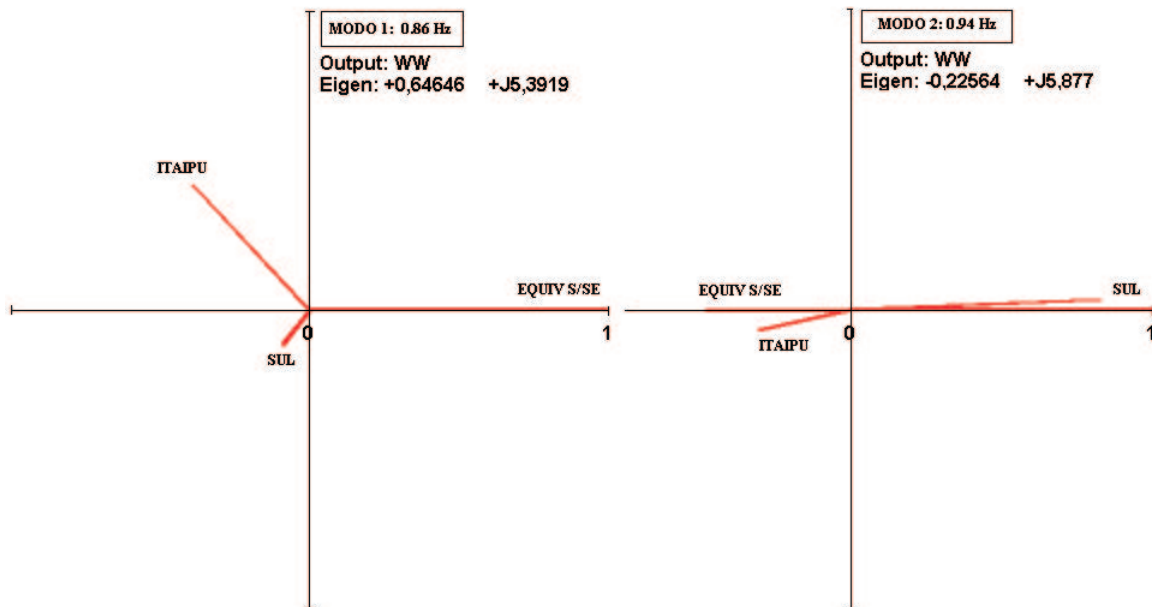


Figura 5.3: Análise modal dos modos 1, de 0.86 Hz e 2, de 0.94 Hz.

Uma análise dos autovalores indica a presença de dois modos de oscilação eletromecânica dominantes, sendo que um deles é instável. O modo instável é difícil de ser controlado pelas características dinâmicas do sistema. Ao se usar controladores com estruturas convencionais,

mais de um controlador é necessário para estabilizar o sistema, pois com apenas um controlador, mostrou-se que o modo instável permanece praticamente inalterado mesmo com ganhos elevados. Como sistemas elétricos de potência são altamente não-lineares e de grande porte, é normal existirem ocasiões em que o número de modos a serem controlados seja maior que o número de controladores disponíveis. Contudo, um PSS pode ser ajustado para influenciar mais de um modo de oscilação. O objetivo desta seção é usar controladores com sinais locais e remotos para modificar múltiplos modos de oscilação eletromecânica. Casos usando um controlador com uma única entrada (combinação de um sinal local e um remoto) e com duas entradas (uma função de transferência para cada entrada) serão apresentados. A robustez dos controladores será testada perante atrasos de tempo fixo e face à perda do sinal remoto.

5.2.2.3 Resultados Usando Controlador Multi-sinal

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos ao se utilizar o controlador multi-sinal cuja estrutura permite uma única entrada composta por uma combinação de sinais locais e remotos. Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 5.4, à esquerda do Sistema Multi-máquinas.

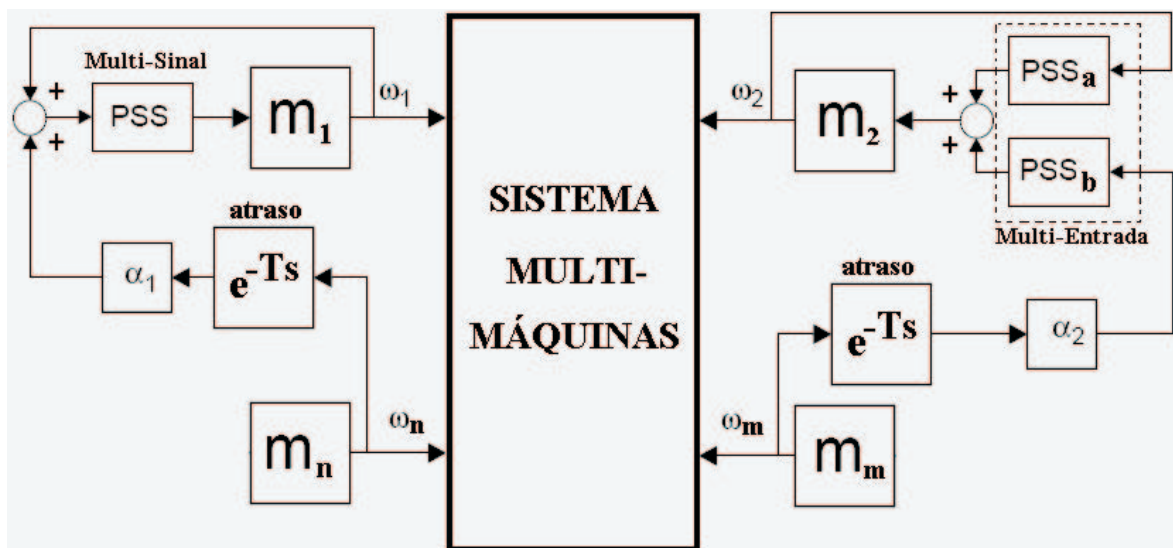


Figura 5.4: Sistema com controladores multi-Sinal e multi-Entrada.

Todos os PSSs utilizados nas seções de controle deste trabalho foram projetados através do método de controle ótimo com restrições estruturais, ou seja, respeitando o fato de que não se têm disponíveis todos os estados do sistema para fins de realimentação, logo, as saídas serão utilizadas para este fim. Em [19], o problema do controle ótimo com restrições estruturais foi formulado de tal forma a se obter uma realimentação de saídas descentralizadas, pois devido as dificuldades em realizar realimentações usando sinais remotos envolvendo

grandes distâncias entre as usinas envolvidas, porém este problema já pode ser resolvido após o surgimento dos sistemas de medições fasoriais sincronizadas. Os pólos da função de transferência do PSS projetado (instalado em Itaipú) foram fixados com valores parecidos aos projetados em [11]. A função está apresentada abaixo:

$$PSS_1(s) = \frac{3.6026513s^2 + 25712.294s + 2900.496}{1.0s^2 + 13.0s + 812.0} \quad (5.1)$$

O posicionamento de PMUs indicou as barras de Itaipú e de Salto Segredo como as melhores localizações para fornecer informações sobre os modos 1 e 2. Portanto o sinal de entrada para este controlador é formado pela equação 5.2, onde o coeficiente α é considerado igual a 0.5, tal como sugerido em [11]. Neste caso, este coeficiente determina o peso dado ao sinal remoto. O PSS está instalado em Itaipú, portanto esta usina terá uma entrada a mais no seu regulador de tensão, junto com o somador da tensão de referência. O o sinal de tensão originado pelo PSS irá modular a ação do regulador de tensão.

$$Input(s) = \omega_{ITA} + \alpha\omega_{S.SEG} \quad (5.2)$$

As Tabelas 5.6 e 5.7, mostram os autovalores do sistema equivalente Brasileiro Sul-Sudeste modificado para os seguintes testes:

- Sem controlador;
- Com controlador sem considerar atraso de tempo (T=0);
- Com controlador sem considerar atraso de tempo, mas considerando perda de sinal remoto (T=0ms, $\alpha = 0$);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=20ms);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=60ms);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=99ms).

Tabela 5.6: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema					
Sem Controlador	$\zeta(\%)$	Com Controlador	$\zeta(\%)$	Perda de Sinal	$\zeta(\%)$
$0.64646 \pm j5.3919$	-11.9%	$-0.57551 \pm j6.2972$	9.10%	-0.38859 ± 12.057	3,22%
$-0.22564 \pm j5.877$	3.84%	$-1.9479 \pm j8.7462$	21.74%	0.09787 ± 5.8967	-1,66%

Neste trabalho, a perda do elo de comunicação e os atrasos de tempo são associados apenas aos sinais remotos. O coeficiente α pode ser associado tanto aos sinais locais quanto

aos sinais remotos. Para simular perda de sinal, basta anular o coeficiente alfa associado ao sinal perdido.

O sistema parte de um ponto de operação instável, devido a presença de um autovalor posicionado no lado direito do plano complexo ($0.64646 \pm j5.3919$). Após a adição do PSS_1 , tanto o modo 1 ($0.64646 \pm j5.3919$) quanto o modo 2 ($-0.22564 \pm j5.877$) foram melhorados e os novos coeficientes de amortecimento são respectivamente 9.10% e 21.74% tal como pode ser visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.7: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema Considerando Atrasos de Tempo					
T=20ms	$\zeta(\%)$	T=60ms	$\zeta(\%)$	T=99ms	$\zeta(\%)$
$-0,40288 \pm j6,3702$	6.31%	$-0,15317 \pm j6,3913$	2.40%	$-0,00031 \pm j6.3551$	+0.00%
$-2,0522 \pm j8,7779$	22.77%	$-2,1858 \pm j8.8822$	23.9%	$-2.2416 \pm j8.9846$	24.21%

Como esperado, a Tabela 5.7 mostra que ao aumentar o valor de T , os modos são modificados. Um dos modos tem o seu amortecimento deteriorado a medida que T cresce. O sistema se torna instável para um atraso de tempo maior que 100 ms, na disponibilização do sinal de velocidade da usina de Salto Segredo para o PSS_1 localizado em Itaipú.

Isto salienta a importância do sinal remoto para este sistema. Já se sabia anteriormente que este sistema era praticamente não controlável usando apenas um único sinal local e que eram necessários outros controladores para deslocar o par de zeros de fase não-mínima que estava atraindo pólos para uma região instável do plano complexo. Isto novamente é ressaltado ao se analisar os autovalores para o caso em que se considera a perda do sinal. Porém desta vez, o autovalor relacionado à usina de Salto Segredo é o que tem amortecimento negativo.

Cabe ressaltar que este sistema foi simplificado e modificado de forma a se obter as características dinâmicas discutidas, que não são encontradas com frequência em sistemas de potência. A justificativa para o uso de sistemas de medição fasorial sincronizada é o fato de que os modos do sistema são difíceis de serem controlados com PSSs convencionais e mostrou-se que com apenas um PSS com estrutura que permite a entrada de sinais remotos é possível estabilizar o sistema.

5.2.2.4 Resultados Usando o Controlador Multi-entradas

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos ao se utilizar o controlador multi-entradas, cuja estrutura permite o uso de múltiplos sinais de entrada. A estrutura deste controlador é formada por duas funções de transferência, sendo uma associada à cada sinal

(local e remoto). Este esquema de controle é ilustrado no lado direito da Figura 5.4, ou seja, à direita do bloco do sistema multimáquinas.

Os controladores serão instalados em Itaipú. As funções de transferência do controlador multi-entradas projetadas através do método de controle ótimo com restrições estruturais são apresentadas a seguir:

$$PSS_2(s) = \frac{12.764431s^2 + 26528.787s + 10326.291}{1.0s^2 + 13.0s + 812.0} \quad (5.3)$$

$$PSS_3(s) = \frac{-4.510814s^2 + 5892.6569s - 3673.551}{1.0s^2 + 13.0s + 812.0} \quad (5.4)$$

O sinal de entrada para os controladores PSS_2 e PSS_3 são respectivamente ω_{ITA} e $\alpha\omega_{S.SEG}$. O coeficiente α para o sinal remoto é considerado igual a 1 neste caso. As Tabelas 5.8 e 5.9 mostram os autovalores do sistema equivalente brasileiro sul-sudeste modificado para testes na seguinte ordem:

- Sem controladores;
- Com controladores sem considerar atraso de tempo (T=0);
- Com controladores sem considerar atraso de tempo, mas considerando perda de sinal remoto (T=0ms, $\alpha = 0$);
- Com controladores considerando atraso de tempo (T=20ms);
- Com controladores considerando atraso de tempo (T=60ms);
- Com controladores considerando atraso de tempo (T=131.4ms).

Tabela 5.8: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema					
Sem Controlador	$\zeta(\%)$	Com Controlador	$\zeta(\%)$	Perda de Sinal	$\zeta(\%)$
$0.64646 \pm j5.3919$	-11.9%	-1.7858 ± 4.2268	+38.92%	-1.6347 ± 3.3876	+43.46%
$-0.22564 \pm j5.877$	+3.84%	-0.10351 ± 5.9068	+1.75%	0.09681 ± 5.8995	-1.64%

Novamente, os estudos foram realizados a partir de um ponto de operação instável, devido a presença de um par de pólos complexos conjugados posicionados no lado direito do plano complexo. Após a adição dos PSS_2 e PSS_3 , o sistema foi estabilizado tal como visto na Tabela 5.8. O modo 1 teve um considerável acréscimo no seu amortecimento, enquanto que o modo 2 teve o seu amortecimento levemente deteriorado, contudo não restaram autovalores no lado direito do plano complexo.

Na Tabela 5.9 observa-se que ao aumentar o valor de T , os modos também são alterados. Com o aumento de T , o modo 1 que adquiriu um amortecimento elevado após a inclusão dos controladores, teve seu amortecimento levemente deteriorado. Esta diminuição do coeficiente de amortecimento também ocorre para o modo 2, que já possuía um amortecimento baixo e que foi ainda mais reduzido após a inclusão do controlador formado pelos PSSs 2 e 3.

Tabela 5.9: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema Considerando Atrasos de Tempo					
T=20ms	$\zeta(\%)$	T=60ms	$\zeta(\%)$	T=131.4ms	$\zeta(\%)$
-1.6931 ± 4.2465	+37.03%	-1.517 ± 4.2391	+33,69%	-1.2828 ± 4.1378	+29.61%
-0.10088 ± 5.939	+1.70%	-0.0763 ± 5.9974	+1.27%	-0.00026 ± 6.0554	+0.00%

Anteriormente, quando se utilizou apenas um PSS, com $T > 99ms$ já se instabilizava o sistema. Com a inclusão da estrutura multi-entrada, o sistema passou a ser instável apenas quando $T > 131.4ms$. Novamente, ao se simular a perda do sinal remoto, o sistema se tornou instável, novamente com um dos modos se movendo para o lado direito do plano complexo. Anteriormente, com o uso de apenas uma entrada, o modo 2 se tornou instável e o modo 1 passou a ter um amortecimento muito baixo. Agora, o modo 2 se tornou instável, porém o modo associado a usina de Itaipú, ou seja, o modo 1 permaneceu com um valor muito elevado de amortecimento.

Ao se comparar as duas estruturas de controle, percebeu-se que em ambas, o sinal remoto tem uma importância elevada para a garantia da estabilidade do sistema. Em ambos os casos, percebeu-se que a existência de atrasos envolvidos na disponibilização do sinal remotos, implicam na redução da margem de estabilidade. Convém mencionar que os PSSs projetados (PSS_1 e o par PSS_2 e PSS_3) foram calculados para um sistema sem modelagem de atrasos de tempo. Os blocos contendo a aproximação de Padé de primeira ordem, foram incluídos após o cálculo dos parâmetros dos controladores via controle ótimo com restrições estruturais. Sabe-se que caso os atrasos fossem incluídos previamente na modelagem do sistema, os resultados seriam melhores, pois esta característica já seria levada em consideração na fase de projeto de PSSs. Outras formas de levar em consideração atrasos de tempo envolvidos no processamento e disponibilização de sinais remotos poderiam ter sido contemplados. Entre outras técnicas que abordam este tópico, menciona-se métodos de predição tal como controle adaptativo, métodos que levam em consideração perda dos sinais remotos por apenas alguns ciclos e métodos que consideram atrasos de tempo variáveis.

A primeira estrutura apresentou melhores resultados quando não se consideram atrasos de tempo. Porém quando se utilizou o controlador com duas entradas, os resultados obtidos sem considerar atrasos de tempo envolvidos foram piores, mas o sistema é ainda estabilizado. Mas à medida em que se aumentavam os atrasos de tempo, o sistema permanece menos

sensível ao aumento de T comparado ao caso com a estrutura multi-sinal. Utilizando o PSS multi-sinal, o sistema atinge o limiar da instabilidade com $T = 99ms$. Com o controlador multi-entradas, o sistema alcançou este ponto crítico de operação com $T = 131.4ms$.

5.3 Sistema Teste New England

O sistema estudado neste seção é o Sistema teste New England. Este sistema foi escolhido devido a ser de maior porte comparado ao estudado na seção anterior. O sistema teste New England é formado por trinta e nove barras, sendo que dez destas barras, são barras de geração. Os dados estáticos e dinâmicos deste sistema se encontram no Apêndice A. O sistema New England é apresentado na Figura 5.5. Abaixo apresenta-se um resumo das aplicações que serão executadas para a obtenção de resultados neste sistema.

- Alocação de PMUs usando Norma Gramiana aplicada na matriz de informação formada pelas respostas no tempo (Z_B) das variáveis medidas;
- Alocação de PMUs usando o critério de coerência angular definido na seção 3.2.3;
- Alocação de PMUs usando o critério que faz uso dos índices de observabilidade (ver seção 3.2.4);
- Alocação de PMUs usando o critério baseado na decomposição modal via análise de Prony, tal como apresentado na seção 3.2.5;
- Melhoria do desempenho dinâmico do sistema através do projeto de apenas um PSS cuja estrutura, permite o uso de combinações de medidas locais e remotas;
- Melhoria do desempenho dinâmico do sistema através do projeto de PSSs (um para cada entrada), utilizando medidas locais e remotas;
- Consideração da perda de sinais remotos envolvidos;
- Consideração de atrasos de tempo envolvidos na disponibilização dos sinais remotos.

5.3.1 Posicionamento de PMUs

No sistema estudado nas seções anteriores, deu-se um maior enfoque para a parte de estabilidade para pequenos sinais, devido às características dinâmicas interessantes relacionadas ao equivalente do sul do Brasil. Nesta seção, como o sistema é de maior porte em relação ao anterior, também serão testadas duas maneiras de formar a matriz de informação para posicionamento de PMUs usando as respostas transitórias das variáveis envolvidas.

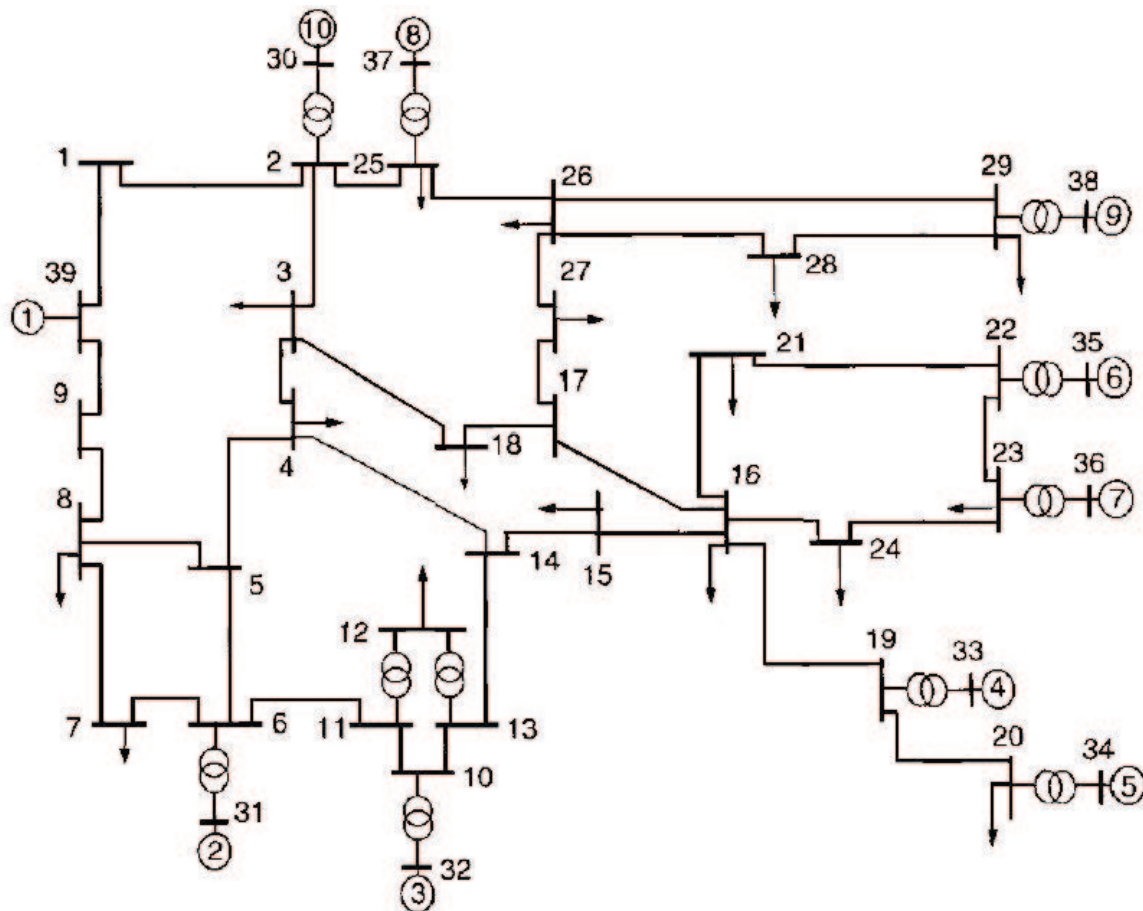


Figura 5.5: Configuração do Sistema Teste New England.

5.3.1.1 Matriz de Informação formada pelas Respostas no Tempo

Nesta seção, procura-se maximizar a quantidade de informações a serem adquiridas das respostas no tempo das variáveis escolhidas. Neste caso, a matriz de informação será formada pelas respostas transitórias do sistema. Deseja-se analisar a coerência angular das barras do sistema, portanto escolheram-se os desvios angulares das barras como variáveis a serem monitoradas pelas PMUs. Todas as barras estão sendo monitoradas e são consideradas como candidatas para instalação de PMUs nesta etapa. Como programa de simulação de transitórios não-lineares, escolheu-se o PSAT ([2] e [36]). A perturbação simulada foi um curto circuito trifásico na barra 17 localizada no centro do sistema. A duração da falta foi de $0.01s$ e a reatância da falta foi $x_f = 0.01pu$. O objetivo neste caso é obter localizações eletricamente distantes, pois deseja-se monitorar fenômenos com informações novas a cada barra selecionada, e assim, evitar sinais e informações redundantes. A Figura 5.6 contém as respostas no tempo das variáveis especificadas. O aumento dos ângulos em regime permanente é devido ao fato de que não há barra infinita modelada no sistema, mas sim uma aproximação desta representada pelo modelo clássico de máquina. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.10.

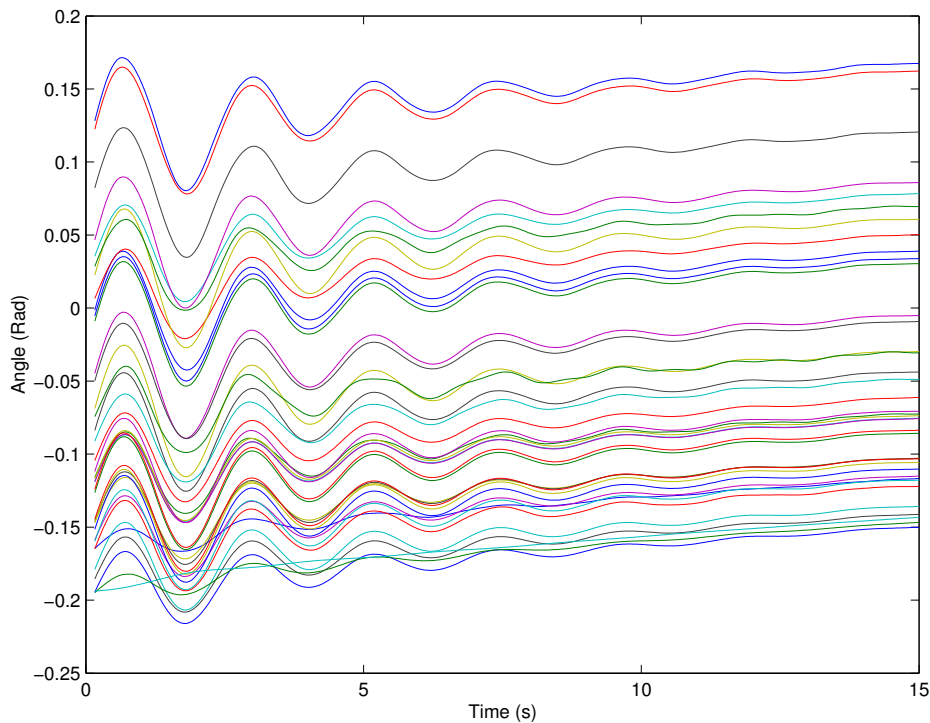


Figura 5.6: Variação angular nodal após perturbação.

Na entrada de dados do programa de alocação, pode-se definir o número máximo de PMUs a serem instaladas no sistema. O programa define uma lista com as melhores localizações, independentemente de quantas barras serão escolhidas para instalação. Nesta simulação, foi especificado que dez barras seriam selecionadas, apenas para mostrar quais seriam as dez melhores localizações, porém apenas cinco PMUs foram selecionadas para instalação no sistema. A razão para se ter escolhido apenas cinco localizações pode ser explicada através do gráfico apresentado na Figura 5.7.

Percebe-se que com cinco PMUs instaladas no sistema, já se obtém praticamente 100% das informações do ponto de vista transitório, que seriam obtidas caso todas as 39 barras fossem monitoradas. A Figura 5.8 mostra como ficou a configuração do sistema com cinco PMUs instaladas.

Os resultados evidenciaram que as barras de geração foram as melhores escolhas para

Tabela 5.10: Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.

Resultados Obtidos	
Variável Escolhida	Ângulos Nodais
Barras Candidatas	Todas
Barras Selecionadas	
[34 39 30 38 31]	37 36 35 32 33

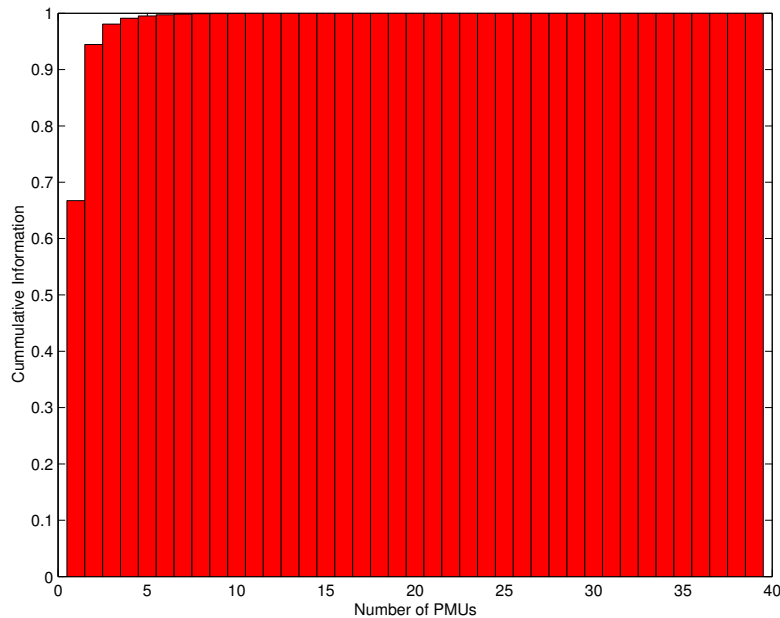


Figura 5.7: Acréscimo de informação à cada PMU adicionada.

a função objetivo escolhida, maximizando a quantidade de informações obtidas durante o período transitório. O programa de posicionamento de PMUs indicou localizações eletricamente distantes. Ao se comparar as respostas transitórias angulares das cinco primeiras barras escolhidas, pode-se verificar que os sinais angulares são diferentes entre si.

Neste caso, as primeiras cinco localizações escolhidas foram barras de geração. Estas localizações estão eletricamente bem separadas entre si, mostrando que o algoritmo procura novas informações a cada PMU instalada.

5.3.1.2 Matriz de Informação formada pelos Índices de Coerência

Agora utiliza-se o algoritmo que utiliza os índices de coerência definidos pela Equação 3.5 para encontrar as melhores localizações que não são coerentes entre si. Apenas as barras de geração são consideradas no conjunto de barras candidatas e neste caso, duas variáveis serão medidas separadamente. As variáveis medidas são as velocidades do rotores das máquinas e os ângulos nodais. Neste teste, deseja-se verificar se as barras de geração também são escolhidas em uma ordem semelhante ao teste anterior, pois o objetivo é fazer uma medida da proximidade elétrica das barras de geração. Espera-se que as primeiras localidades escolhidas sejam entre geradores que possuem comportamentos dinâmicos diferentes. A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos. Os resultados foram semelhantes comparados às barras selecionadas ao se utilizar a matriz de informação formada diretamente pela matriz de sinais composta pelas respostas no tempo. A única diferença entre os resultados foi que no primeiro caso, a barra 31 foi selecionada, e agora a barra 32 foi escolhida. Porém ambas estão posicionadas em um regiões eletricamente próximas.

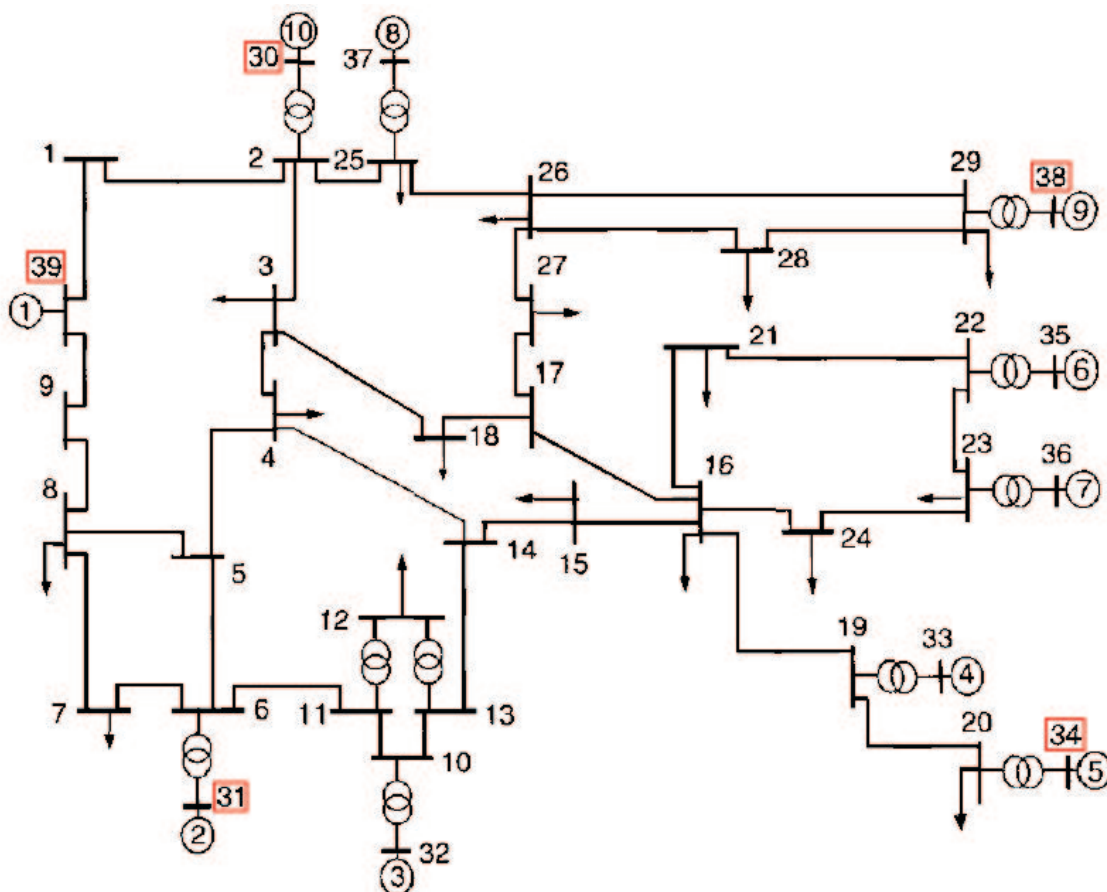


Figura 5.8: Configuração de PMUs do Sistema New England.

A Figura 5.9 apresenta os sinais utilizados para a próxima execução do programa de posicionamento de PMUs.

A Tabela 5.12 mostra que ao se utilizar os sinais das velocidades angulares dos rotores das máquinas os resultados foram muito semelhantes aos obtidos ao se usar os sinais de ângulo das barras de geração. Os resultados mostram que com cinco PMUs instaladas no sistema, praticamente toda a informação que seria obtida ao se medir todas as barras candidatas.

A Tabela 5.13 apresenta um resultado comparativo da configuração de PMUs obtida para os três casos testados.

Tabela 5.11: Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.

Resultados Obtidos	
Variável Escolhida	Ângulos nodais
Barras Candidatas	Todas as barras de geração
Barras Selecionadas	
[34 39 30 32 38] 31 36 37 33 35	

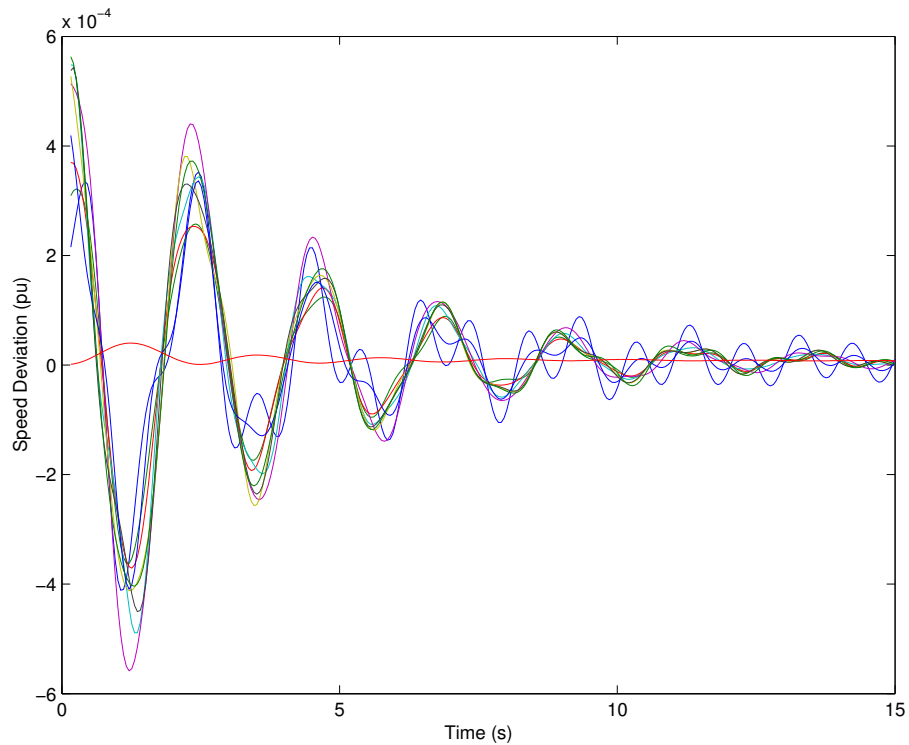


Figura 5.9: Desvio de velocidade das máquinas após perturbação.

Tabela 5.12: Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.

Resultados Obtidos	
Variável Escolhida	Velocidades angulares dos rotores
Barras Candidatas	Todas as barras de geração
Barras Selecionadas	
[34 39 30 36 37] 31 33 35 38 32	

Vários testes indicaram que melhores resultados são obtidos ao se utilizar respostas no tempo de variáveis que tendem à uma mesma referência em regime permanente, ou seja, que possuam valores próximos um do outro após o término das oscilações existentes no período transitório. Independentemente da natureza do sinal que está sendo processado pelo algoritmo, as melhores escolhas são os desvios em torno do ponto de operação antes do período transitório, pois assim problemas numéricos são evitados no cálculo da quantidade de informação acrescentada à cada localização escolhida e resultados mais coerentes são obtidos.

Para solucionar este problema, basta escolher sinais que tendem ao mesmo ponto em regime permanente tais como desvios dos ângulos nodais e velocidade em *p.u.* Nos testes apresentados anteriormente, os desvios angulares e de velocidade foram escolhidos. Um outro exemplo de sinal para qual o método se comporta bem, é o sinal de frequência das barras, pois após uma dada perturbação, os sinais tendem a se acomodar no valor de frequência

Tabela 5.13: Posicionamento de PMUs para estabilidade transitória.

Resultados Obtidos p/ Estabilidade Transitória		
Resposta no Tempo	Índices de Coerência	Índices de Coerência
$\theta_i, i = 1, \dots, 39$	$\theta_i, i = 30, \dots, 39$	$\omega_i, i = 30, \dots, 39$
34	34	34
39	39	39
30	30	30
38	32	36
31	38	37
37	31	31
36	36	33
35	37	35
32	33	38
33	35	32

base.

5.3.1.3 Matriz de Informação formada pelos Índices de Observabilidade

Esta seção focaliza a estabilidade para pequenas perturbações e o posicionamento de PMUs, portanto visa obter localizações que possuam informações sobre o modo ou conjunto de modos escolhidos. Os modos especificados podem ser quaisquer, porém modos de oscilação eletromecânica instáveis ou com pouco amortecimento são escolhidos neste trabalho. A Tabela 5.14 apresenta os autovalores do sistema teste New England. Mostra-se também que os fatores de participação indicaram as variáveis ω_{30} e δ_{38} estão associadas aos modos 1 e 2 especificados.

Tabela 5.14: Autovalores do sistema em malha aberta.

Apenas os modos de oscilação eletromecânicos foram apresentados na Tabela 5.14. Ao se analisar os autovalores, percebe-se que todos os autovalores estão posicionados no semi-plano esquerdo do plano complexo, com exceção de um pólo localizado na origem. Caso uma máquina fosse definida como a referência de velocidade do sistema, este autovalor desapareceria. Embora todos os modos de oscilação sejam estáveis, todos possuem baixo amortecimento. Os modos 1 e 2 são os que possuem os menores coeficientes de amortecimento, de sendo 1.35% e 2.75% respectivamente. Estes modos serão os modos especificados para obtenção das melhores localizações para formar uma configuração de PMUs que adquira informações sobre modos de oscilação.

Para a obtenção das localizações adequadas, necessita-se definir uma função de transferência para obtenção dos modos de oscilação a serem localizados pelo programa de posicionamento de PMUs e também para definir as saídas que formarão a matriz C . A entrada

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp(%)	Part. Factor		
1	,00002	0,	,00002	0,	-100,00%	DELT	Generator	# 39 0
2	-,0961	7,0979	7,0985	1,1297	1,35%	WW	Generator	# 30 0
3	-,0961	-7,0979	7,0985	-1,1297	1,35%			
4	-,08687	3,1572	3,1584	,50248	2,75%	DELT	Generator	# 38 0
5	-,08687	-3,1572	3,1584	-,50248	2,75%			
6	-,25755	7,5347	7,5391	1,1992	3,42%	WW	Generator	# 32 0
7	-,25755	-7,5347	7,5391	-1,1992	3,42%			
8	-,21856	6,3081	6,3119	1,004	3,46%	WW	Generator	# 31 0
9	-,21856	-6,3081	6,3119	-1,004	3,46%			
10	-,21176	5,8808	5,8846	,93595	3,60%	WW	Generator	# 38 0
11	-,21176	-5,8808	5,8846	-,93595	3,60%			
12	-,27062	6,9771	6,9823	1,1104	3,88%	WW	Generator	# 35 0
13	-,27062	-6,9771	6,9823	-1,1104	3,88%			
14	-,37509	8,6144	8,6226	1,371	4,35%	WW	Generator	# 33 0
15	-,37509	-8,6144	8,6226	-1,371	4,35%			
16	-,40287	8,7868	8,796	1,3985	4,58%	WW	Generator	# 37 0
17	-,40287	-8,7868	8,796	-1,3985	4,58%			
18	-,45766	8,9561	8,9678	1,4254	5,10%	WW	Generator	# 36 0
19	-,45766	-8,9561	8,9678	-1,4254	5,10%			

definida é a tensão de referência de todas as máquinas e as saídas definidas são as velocidades dos rotores de também de todas as máquinas.

Tabela 5.15: Variáveis de entrada e saída da função de transferência multivariável.

SAÍDAS		ENTRADAS	
Sinal	Barra	Sinal	Barra
ω	30	V_{ref}	30
ω	31	V_{ref}	31
ω	32	V_{ref}	32
ω	33	V_{ref}	33
ω	34	V_{ref}	34
ω	35	V_{ref}	35
ω	36	V_{ref}	36
ω	37	V_{ref}	37
ω	38	V_{ref}	38
ω	39	V_{ref}	39

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.16.

A máquina 39 não foi definida como máquina infinita, porém nos dados dinâmicos desta máquina, especificou-se a inércia desta máquina com um valor consideravelmente maior que as demais, para fazê-la comportar-se como se uma barra infinita. Esta máquina foi representada através do modelo clássico de representação de máquinas síncronas, ou seja, uma fonte de tensão atrás de uma reatância transitória. Esta barra não foi considerada candidata para instalação de PSS, mas foi considerada na função de transferência cujas entradas e saídas são mostradas na Tabela 5.15.

Mode 1				Mode 2			
Module	Phase	Bus Name		Module	Phase	Bus Name	
1	1,	-30,881	Generator # 30	1	1,	130,5	Generator # 34
2	,37182	-45,822	Generator # 37	2	,83371	132,58	Generator # 38
3	,26916	-174,34	Generator # 35	3	,82714	131,61	Generator # 33
4	,26774	-169,5	Generator # 36	4	,82533	131,7	Generator # 35
5	,25731	140,33	Generator # 38	5	,82231	131,76	Generator # 36
6	,2088	119,36	Generator # 31	6	,65696	132,01	Generator # 32
7	,1687	30,583	Generator # 34	7	,62154	132,37	Generator # 31
8	,14045	130,42	Generator # 32	8	,60801	132,21	Generator # 37
9	,04152	-166,91	Generator # 33	9	,59095	134,41	Generator # 30
10	,00105	143,66	Generator # 39	10	,03025	-50,115	Generator # 39

O programa de alocação de PMUs indicou as barras 30 e 38 como as melhores localizações para obter informações sobre os modos especificados. A Tabela 5.17 apresenta os resultados dos índices de observabilidade calculados com o Pacdyn para os modos 1 e 2 com relação ao sinal de velocidade das máquinas do sistema. Percebe-se que no caso do modo 1 de 1.13 Hz, o sinal de velocidade da máquina da barra 30 é o sinal que possui a maior observabilidade. No caso do modo 2, sendo este um modo interárea de frequência igual a 0.50 Hz, os índices de observabilidade apontam o sinal de velocidade da máquina da barra 34 como sendo o mais indicado, e o sinal da barra 38 sendo o segundo mais associado. No programa de alocação de PMUs, pode-se definir quantas PMUs serão posicionadas, e ao se selecionar 3 PMUs ou mais a serem alocadas, logo após a escolha das barras 30 e 38, o programa indica a barra 34 como a próxima barra escolhida, indicando que os resultados são coerentes.

5.3.1.4 Matriz de Informação formada pelas Coeficientes da Análise de Prony

Nesta seção, utilizam-se duas formas diferentes de se chegar à uma configuração de PMUs. Uma das maneiras é estimar o conteúdo modal à partir das respostas transitórias das variáveis envolvidas. Após a execução da análise de Prony, obtém-se a matriz B_p , que contém informações sobre módulo e fase dos modos envolvidos nos sinais estimados. A partir desta matriz, com algumas manipulações matemáticas, são extraídas as informações sobre os modos de oscilação que estão dentro da faixa de frequência especificada e que serão utilizadas para formar uma matriz de informação. A outra forma é realizar a análise de Prony e obter todos os coeficientes necessários para realizar a predição dos sinais medi-

Tabela 5.16: Posicionamento de PMUs visando o conteúdo modal.

Resultados	
Modos Especificados	Barras Escolhidas
$-0.0961 \pm j7.0979$	30
$-0.08687 \pm j3.1572$	38

Tabela 5.17: Índices de observabilidade para os modos 1 e 2, usando sinal de velocidade.

dos e selecionar uma faixa de frequência de interesse para reconstrução destes sinais. Os sinais então serão reconstruídos mantendo apenas o conteúdo modal que está dentro da faixa de frequência especificada. Após esta etapa, executa-se o algoritmo de posicionamento de PMUs que usa os sinais temporais para formação da matriz de informação. Esta análise é uma combinação do posicionamento de PMUs para estabilidade transitória com o utilizado para estabilidade para pequenas perturbações.

Abaixo estão os resultados obtidos ao se escolher em B apenas os modos desejados. Diferentemente do método que faz uso dos índices de observabilidade, aqui não se escolhe modos específicos, mas sim a faixa de frequência de interesse. A faixa definida para obter os resultados apresentados na Tabela 5.18 é de 0.4 à 1.2 Hz que abrange tanto o modo interárea quanto o modo com menor coeficiente de amortecimento do sistema (1.35%), ou seja, o modo dominante de 1.12 Hz. Dentro desta faixa de frequência, existem modos que são acrescentados para que o MPLD se ajuste aos sinais originais, pois se superestima a ordem do modelo para obter uma boa estimativa. Os resultados são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18: Posicionamento de PMUs usando coeficientes de B .

Resultados Obtidos	
Variável Escolhida	Velocidade dos rotores
Barras Candidatas	Barras 30 à 38
Barras Selecionadas	
[34 30] 38 31 36 32 35 33 37	

Os resultados obtidos usando os índices de observabilidade na formação da matriz de informação indicaram que as barras selecionadas foram as barras 30 e 38. Como eram apenas dois modos, escolheram-se apenas duas barras, pois a partir da terceira localização, nenhuma informação nova era obtida. Porém mesmo assim, a terceira barra selecionada era a barra 34. Agora no caso destes resultados, as barras 34 e 30 foram selecionadas, e a barra 38 foi a escolhida em terceiro lugar.

Tabela 5.19: Posicionamento de PMUs usando reconstrução de sinais.

Resultados Obtidos	
Variável Escolhida	Velocidade dos rotores
Barras Candidatas	Barras 30 à 38
Barras Selecionadas	
[34 30] 38 32 31 36 37 35 33	

A Tabela 5.19, mostra os resultados obtidos a partir do uso da matriz de sinais reconstruídos. Este sinais são usados para formação da matriz de informação para uma análise

de coerência. Novamente as três primeiras barras selecionadas foram as barras 34, 30 e 38. Verifica-se que apenas as duas primeiras barras já fornecem praticamente 100% das informações que seriam obtidas com todos os sinais de velocidade reconstruídos.

Tanto ao se usar os índices de observabilidade, os índices da matriz B_p , ou os sinais reconstruídos com os modos dentro da faixa de frequência especificada, as três primeiras barras selecionadas são as barras 30, 38 e 34. As duas barras selecionadas para alocar PMUs no sistema são as barras 30 e 38, pois o posicionamento de PMUs usando os índices de observabilidade para formar a matriz de informação indicou que estas barras são as mais informativas do ponto de vista modal para os autovalores especificados. A tabela abaixo apresenta como exemplo, os resultados obtidos com a análise de Prony para o sinal de velocidade angular da barra 30.

```

=====
                                PRONY ANALYSIS RESULTS
                                The Duplicated and Off-Set Modes were Excluded
=====
Eigenvalue      Mag      Rel Mag   Phase   Freq Hz   Freq rad/s   Damping
-----
-0.0839  6.4459  1.1479e-003  0.0514   55.8078   1.0260   6.4465   0.0130
-0.1877  5.0761  1.5151e-004  0.0068  -73.5549   0.8084   5.0795   0.0370
-0.2949  2.8330  2.2314e-002  1.0000 -123.5250   0.4533   2.8483   0.1035
-----

Model Order      Max Mismatch   Signal/Noise Rate   Condition Number of H
      50              0.0019              90.4666              365051208.6179
-----

                                ROBSON LUIS VALIM MARINI
=====

```

Pode-se observar nos resultados acima, que houveram três modos dentro da faixa de frequência especificada. Existem muitos outros modos estimados além dos que foram apresentados na saída do programa, pois a ordem especificada para ajustar as curvas dos sinais de velocidade das máquinas das barras 30 à 38, foi igual à 50. Apesar das curvas terem sido estimadas com uma taxa sinal ruído considerada muito boa, ainda assim os modos não são exatamente os mesmos obtidos com uma análise modal. Ao se observar os resultados acima, percebe-se a existência do modo interárea com frequência de 0.45 Hz ao invés de 0.50 Hz. Este é o modo de maior magnitude neste sinal. Tanto o sinal original quanto o estimado, podem ser vistos na Figura 5.10. Outro modo que aparece neste resultado é o de frequência 1.026 Hz que possui um coeficiente de amortecimento 1.3%. Pode-se comparar este modo com o de frequência de 1.12 Hz com 1.35% de amortecimento, obtido através de uma análise modal. A existência do outro modo estimado é explicado pelo fato da ordem especificada ser elevada, pois este terceiro modo possui uma magnitude relativa (0.0068) consideravelmente

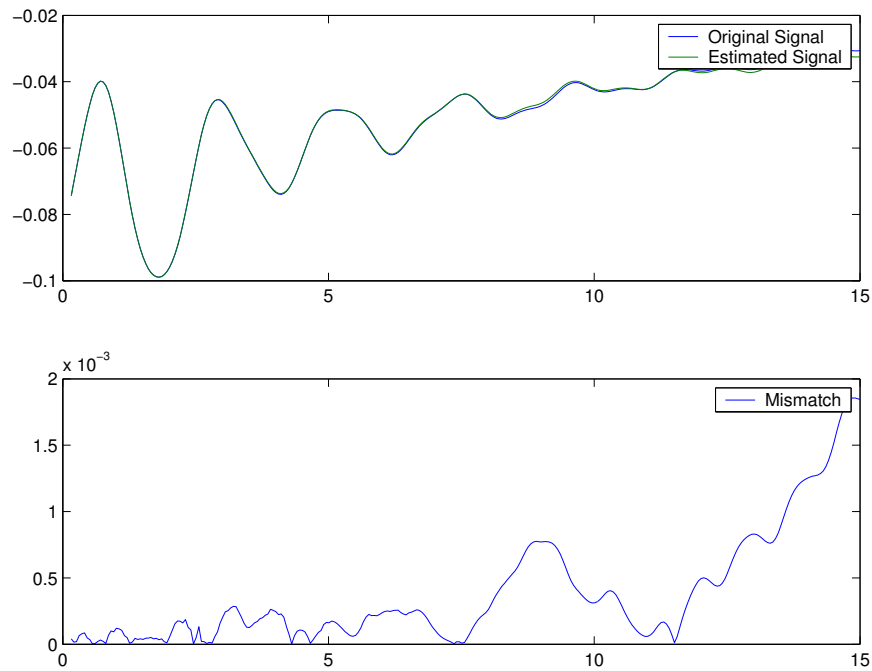


Figura 5.10: Sinais de velocidade angular ω_{30} medida e estimada.

pequena comparado ao de maior magnitude que é a do modo interárea (1.00). Conclui-se que o método de Prony implementado neste trabalho, mesmo obtendo bons resultados na reconstrução dos sinais, ainda pode ser melhorado com respeito a precisão da obtenção dos modos e por esta razão, prefere-se dar mais credibilidade aos resultados obtidos com o programa de alocação usando os índices de observabilidade do que usando o conteúdo modal estimado através da análise de Prony, embora os resultados de ambos sejam coerentes.

Os resultados apresentados na Tabela 5.20, indicam que as barras 30 e 38 são boas localizações para fins de controle dos modos especificados. Estes resultados vão de encontro aos resultados obtidos com o programa de posicionamento de PMUs usando os índices de observabilidade na formação da matriz de informação. Estes resultados também justificam a escolha das barras 30 e 38 como as melhores localizações para instalação de PMUs visando o conteúdo modal dentro faixa de frequência escolhida.

Tabela 5.20: Índices de controlabilidade para os modos 1 e 2, usando sinal de velocidade.

5.3.2 Controle da Estabilidade para Pequenas Perturbações

5.3.2.1 Características Dinâmicas do Sistema

Este sistema possui diversos modos de oscilação eletromecânica mal amortecidos como pode-se verificar na Tabela 5.14. Como existem vários modos neste sistema que precisam de

	Module	Mode 1			Module	Mode 2			
	Module	Phase	Bus Name		Module	Phase	Bus Name		
1	1,	114,73	Generator # 30	1	1,	-7,5472	Generator # 30		
2	,32051	-87,416	Generator # 38	2	,3871	-32,115	Generator # 38		
3	,19496	-38,57	Generator # 36	3	,24851	-38,463	Generator # 33		
4	,18861	-43,839	Generator # 35	4	,19435	-33,645	Generator # 32		
5	,12696	83,932	Generator # 37	5	,19254	-34,502	Generator # 35		
6	,1239	-107,9	Generator # 31	6	,19254	-37,44	Generator # 34		
7	,12196	-94,013	Generator # 32	7	,19051	-37,089	Generator # 36		
8	,09208	178,61	Generator # 34	8	,1331	-37,066	Generator # 31		
9	,04763	-56,906	Generator # 33	9	,10317	-30,32	Generator # 37		
10	0,	0,	Generator # 39	10	0,	0,	Generator # 39		

acréscimo de amortecimento, ao se utilizar controladores com estruturas convencionais que fazem uso apenas de sinais locais, seriam necessários vários controladores para melhorar o desempenho dinâmico do sistema. Os mesmos testes realizados no sistema equivalente Sul-Sudeste da seção 5.2.2 são executados aqui para este sistema, com o objetivo de testar a efetividade do uso de apenas um controlador usando poucos sinais suplementares para melhorar o desempenho dinâmico de múltiplos modos de oscilação.

O objetivo desta seção é melhorar o desempenho dinâmico dos modos 1 ($-0.0961 \pm j7.0979$) e 2 ($-0.08687 \pm j3.1572$). As Tabelas 5.17 e 5.20 mostram que no caso do modo 2, as regiões de maior observabilidade e controlabilidade não coincidem. Pois os índices de observabilidade usando o sinal de velocidade, indicam as barras 34, 38 e 33 como as barras de maior observabilidade deste modo através dos sinais de saída, porém as barras 30 e 38 são as barras que exercem maior influência de controle em ambos os modos, pois estas são as que possuem maior controlabilidade sobre o modo especificado.

5.3.2.2 Controlador multi-sinal

Este controlador tem como entrada uma combinação de sinais locais e remotos. Esta estrutura pode ser visualizada com clareza no lado esquerdo da Figura 5.4, ou seja, à esquerda do sistema elétrico de potência multi-máquinas.

O PSS_1 será instalado na barra 30, pois o resultado do programa de alocação de PMUs usando os índices de observabilidade e o cálculo dos índices de controlabilidade para o sinal de velocidade das máquinas, indicam que esta barra tem informações sobre os modos de oscilação eletromecânica especificados e também exerce influência de controle sobre estes modos. Para a obtenção do controlador projetado nesta seção, utilizou-se a abordagem de controle ótimo com restrições estruturais que permite a realimentação das saídas disponíveis do sistema (ver seção 4.2.4.2). A função de transferência do PSS projetado é apresentada a seguir:

$$PSS_1(s) = \frac{17.329128s^2 + 11918.686s + 6933.0251}{1.0s^2 + 40.0s + 400.0} \quad (5.5)$$

O sinal de entrada para este controlador é formado pela equação abaixo, onde o coeficiente α é considerado igual a 0.5. Portanto, neste caso, o sinal local é o sinal que está sendo ponderado através de α . O PSS está instalado na máquina da barra 30.

$$Input(s) = \alpha\omega_{30} + \omega_{38} \quad (5.6)$$

As Tabelas 5.21 e 5.22, mostram os autovalores do sistema teste New England para os seguintes testes:

- Sem controlador;
- Com controlador sem considerar atraso de tempo (T=0);
- Com controlador sem considerar atraso de tempo, mas considerando perda de sinal remoto (T=0ms, $\alpha = 0$);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=20ms);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=60ms);
- Com controlador considerando atraso de tempo (T=98.3ms).

Como pode ser observado na Tabela 5.14, o sistema possui vários modos de oscilação eletromecânica mal amortecidos. Dentre estes nove modos de oscilação eletromecânica, escolheu-se focalizar nos dois primeiros modos de menor coeficiente de amortecimento, sendo eles o modo 1 ($0.0961 \pm j7.0979$ com $\zeta = 1.35\%$) e o modo 2 ($-0.08687 \pm j3.1572$ com 2.75%).

Tabela 5.21: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema					
Sem Controlador	$\zeta(\%)$	Com Controlador	$\zeta(\%)$	Perda de Sinal	$\zeta(\%)$
$-0.0961 \pm j7.0979$	1.35%	$-1.3875 \pm j7.949$	17.20%	-0.74564 ± 7.8582	9.45%
$-0.08687 \pm j3.1572$	2.75%	$-0.94674 \pm j5.1147$	18.20%	-0.50135 ± 3.0959	15.99%

A Tabela 5.21 mostra que após a inclusão do controlador multi-sinal, os autovalores foram posicionados adequadamente no plano complexo conferindo um melhor desempenho dinâmico ao sistema. Como visto na Tabela 5.14, vários modos possuíam baixo coeficiente de amortecimento antes da consideração do controlador, e apenas os modos de oscilação 1 e 2 foram escolhidos para melhoria do desempenho dinâmico do sistema. Os resultados sem considerar os atrasos de tempo mostram que houve uma sensível melhora com relação à estes modos mesmo considerando a perda do sinal remoto. Os outros modos de oscilação não estão apresentados para não sobrecarregar a apresentação, porém estes foram pouco alterados com relação ao caso do sistema sem controlador algum.

Também serão considerados atrasos de tempo para as simulações executadas neste sistema. A modelagem destes atrasos, novamente foi realizada utilizando-se a aproximação de Padé (ver Equação 4.1) de primeira ordem. Os atrasos de tempo estão associados ao sinal remoto. Para o sistema equivalente Sul-Sudeste, o controlador multi-sinal utilizou um fator de peso $\alpha = 0.5$ no sinal remoto. Neste caso, percebeu-se que um melhor desempenho do controlador multi-sinal foi alcançado ao se pesar o sinal local também com $\alpha = 0.5$. Porém, a consideração da perda de link de comunicação foi novamente associada ao sinal remoto.

Tabela 5.22: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema Considerando Atrasos de Tempo					
T=20ms	$\zeta(\%)$	T=60ms	$\zeta(\%)$	T=98.3ms	$\zeta(\%)$
$-1.251 \pm j8.0519$	15.35%	$-1.06 \pm j8.125$	12.94%	$-0.94852 \pm j8.1383$	11.58%
$-0.91476 \pm j5.0193$	17.93%	$-0.83085 \pm j4.8687$	16.82%	$-0.74355 \pm j4.7593$	15.44%

A Tabela 5.22 apresenta os resultados quando consideram-se atrasos de tempo presentes na disponibilização do sinal remoto (ω_{38}). Observa-se que os modos 1 e 2 permaneceram com um comportamento dinâmico satisfatório nos três casos considerando atrasos de tempo fixo. Em todas as simulações deste trabalho foram simulados três casos com diferentes valores de T . Sempre no primeiro caso se considera $T = 20ms$, o segundo considera $T = 60ms$, e no terceiro caso os valores de T diferem, pois são casos particulares de cada sistema. Na terceira simulação, considera-se o máximo valor de T para o qual o sistema permanece estável. Mesmo com o aumento de T , os autovalores 1 e 2 foram degradados mas permaneceram estáveis e com valores razoáveis de amortecimento. Fato que não pode ser afirmado com relação aos outros modos que já estavam com coeficientes de amortecimento baixo. O PSS_1 foi projetado através de um método de controle ótimo com restrições estruturais para melhorar os modos 1 e 2. As Tabelas 5.23 e 5.24 apresentam as mudanças ocorridas para primeiro modo que cruza o eixo imaginário quando $T > 98.3ms$. Este modo é chamado a partir de agora de modo 3 ($-0.21856 \pm j6.3081$ com 3.46%).

Tabela 5.23: Variação do Modo 3.

Variação do Modo 3					
Sem Controlador	$\zeta(\%)$	Com Controlador	$\zeta(\%)$	Perda de Sinal	$\zeta(\%)$
$-0.21856 \pm j6.3081$	3.46%	$-0.19166 \pm j6.3567$	3.01%	$-0.22715 \pm j6.3113$	3.60%

Estes resultados enfatizaram ainda mais a importância do sinal remoto para o estudo do controle para pequenas perturbações. Existem situações em que as áreas de maior observabilidade e de controlabilidade não são as mesmas, tornando necessário o uso de sinais remotos. No primeiro sistema estudado (Equivalente Sul-Sudeste), a importância do sinal

remoto era evidente, pois sem ele o sistema era instável, o que fazia do sinal remoto algo vital para a operação do sistema em condições aceitáveis. Já no caso do sistema teste de New England, mostrou-se que mesmo sem o sinal remoto, o sistema permanece estável. Porém a importância aqui é dada para a robustez alcançada do esquema de controle usando sistemas de medição fasorial sincronizada. Mesmo perante a possíveis atrasos de tempo gasto no tempo de processamento dos sinais e na disponibilização dos mesmos para os controladores. No caso do sistema New England, pôde-se observar que o sinal com um fator de peso atribuído foi o sinal local, onde o valor de α foi igual a 0.5, e para o sinal remoto, α foi unitário. Isto foi feito, pois assim se conseguia uma melhor performance do controlador projetado.

5.3.2.3 Controlador multi-entradas

O controlador multi-entrada é formado por duas funções de transferência coordenadamente projetadas para serem instalados em uma máquina, cujas entradas são compostas por um sinal local e um remoto. Este esquema de controle pode ser visualizado com clareza no lado direito da Figura 5.4, ou seja, à direita do sistema elétrico de potência multi-máquinas representado na figura.

As funções de transferência dos PSSs instalados na máquina da barra 30 projetadas para esta seção estão apresentados abaixo:

$$PSS_2(s) = \frac{10.243671s^2 + 16032.569s + 4096.8836}{1.0s^2 + 40.0s + 400.0} \quad (5.7)$$

$$PSS_3(s) = \frac{20.493456s^2 + 8679.7406s + 8199.3759}{1.0s^2 + 40.0s + 400.0} \quad (5.8)$$

Os sinais de entrada para o controlador formado pelo PSS_2 e o PSS_3 são respectivamente ω_{30} e $\alpha\omega_{38}$. O coeficiente α para o sinal remoto é considerado igual a 0.5 neste caso. As Tabelas 5.25 e 5.26 mostram os autovalores do sistema para testes na seguinte ordem:

- Sem controladores;
- Com controladores sem considerar atraso de tempo ($T=0$);

Tabela 5.24: Variação do Modo 3.

Variação do Modo 3 Considerando Atrasos de Tempo					
T=20ms	$\zeta(\%)$	T=60ms	$\zeta(\%)$	T=98.3ms	$\zeta(\%)$
$-0.22715 \pm j6.3113$	3.60%	$-0.18739 \pm j6.3675$	2.94%	$-0.00013 \pm j6.4361$	0.00%

- Com controladores sem considerar atraso de tempo, mas considerando perda de sinal remoto ($T=0ms$, $\alpha = 0$);
- Com controladores considerando atraso de tempo ($T=20ms$);
- Com controladores considerando atraso de tempo ($T=60ms$);
- Com controladores considerando atraso de tempo ($T=156ms$).

Os resultados sem considerar os atrasos de tempo envolvidos mostraram que houve uma melhoria no comportamento dinâmico do sistema com a inclusão do controlador multi-entradas na máquina da barra 30.

A Tabela 5.25 mostra que mesmo face a perda do sinal remoto, o sistema permanece estável e os modos estudados mantém coeficientes de amortecimento melhores quando comparados ao caso sem controlador.

Tabela 5.25: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema sem Considerar Atrasos de Tempo					
Sem Controlador	$\zeta(\%)$	Com Controlador	$\zeta(\%)$	Perda de Sinal	$\zeta(\%)$
$-0.0961 \pm j7.0979$	1.35%	-0.73235 ± 10.948	6.67%	-0.7893 ± 10.714	7.35%
$-0.08687 \pm j3.1572$	2.75%	-0.89084 ± 4.538	19.26%	-1.0884 ± 4.2181	24.98%

A Tabela 5.26 mostra que mesmo aumentado bastante o atraso de tempo na entrega do sinal remoto, o sistema não se tornou instável tal como tinha ocorrido quando se utilizou a estrutura de controle multi-sinal. Percebeu-se que para $T > 156ms$, os autovalores do sistema tenderam a voltar para os valores obtidos quando simulou-se a perda do sinal remoto. Em $T = 156ms$ foi quando se alcançou o pior estado em termos de amortecimento do sistema. O modo que alcançou o menor coeficiente de amortecimento foi -0.16085 ± 6.0506 com $\zeta = 2.66\%$. O atraso de tempo fixo foi modelado através da aproximação de Pade de primeira ordem de parâmetros (1,1).

Tabela 5.26: Variação dos Modos 1 e 2.

Autovalores do Sistema Considerando Atrasos de Tempo					
T=20ms	$\zeta(\%)$	T=60ms	$\zeta(\%)$	T=156ms	$\zeta(\%)$
-0.6826 ± 10.931	6.23%	-0.60417 ± 10.872	5.55%	-0.54603 ± 10.706	5.09%
-0.86668 ± 4.5257	18.81%	-0.82166 ± 4.4974	17.97%	-0.73381 ± 4.4156	16.39%

Os resultados mostram a importância do sinal remoto para o estudo do controle para pequenas perturbações. Podem haver casos em que o sinal remoto é fundamental para uma operação estável do sistema, pois às vezes controladores são necessários para deslocar zeros mal posicionados no plano complexo, tal como ocorre no sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Em outros casos, o sinal remoto tem a sua importância devido a possibilidade de se ter uma melhor observabilidade dos fenômenos dinâmicos de um determinado modo através de uma região, e se ter uma melhor influência de controle sobre este modo através de uma outra região, ou seja, diferentes áreas de maior observabilidade e controlabilidade para um determinado modo ou conjunto de modos de oscilação eletromecânica.

Ao se comparar as duas estruturas de controle, verifica-se que ambas têm suas vantagens. Através das simulações, percebeu-se que há casos em que a estrutura de um controlador multi-entrada mostra uma maior robustez face aos atrasos de tempo, tal como ocorreu nas simulações para o sistema equivalente Sul-Sudeste. No caso do sistema New England, também o sistema se comportou melhor perante a existência dos atrasos de tempo ao se usar o controlador multi-entrada. Porém neste mesmo sistema, resultados um pouco melhores foram obtidos com o controlador multi-sinal quando simulou-se a perda do sinal remoto (ao se analisar o sinal dominante, ou seja, o de menor coeficiente de amortecimento). A estrutura de controle multi-sinal (dois sinais sendo somados antes de formarem a única entrada do controlador) tem como vantagem a simplicidade e, como visto nos resultados, é uma estrutura eficaz tal como a estrutura multi-entrada.

Ainda convém ressaltar que a primeira estrutura apresentou melhores resultados quando não se considerou atrasos de tempo. Porém quando se utilizaram os PSSs 2 e 3 para formar o controlador multi-entrada, os resultados obtidos sem considerar atrasos de tempo envolvidos foram piores, porém ainda assim estáveis. Mas à medida em que se aumentavam os atrasos, o sistema permaneceu menos sensível ao aumento de T do que quando se utilizou apenas uma entrada. Quando se utilizou o PSS multi-sinal, o sistema esteve no limiar da instabilidade com $T = 99ms$. Com o controlador multi-entradas, o sistema alcançou este ponto crítico de operação com $T = 131.4ms$.

Por fim, certamente resultados melhores seriam obtidos para este sistema teste, caso fossem escolhidos mais modos para se adicionar amortecimento, pois este sistema como visto, possui dez máquinas, sendo que nove delas possuem regulador automático de tensão. Além do mais, o ponto de operação considerado nas simulações era de baixo amortecimento, como pôde se analisar na Tabela 5.14.

5.4 Conclusão

Neste capítulo, tanto o posicionamento de PMUs quanto o uso de diferentes estruturas de controladores para dois sistemas teste foram considerados. Resultados foram apresentados enfatizando a importância do uso de sistemas de medição fasorial sincronizada na melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência.

Com respeito ao posicionamento de PMUs, verificou-se que existem diferentes maneiras de se alocar unidades de medição fasorial em um SEE. Tanto a estabilidade transitória quanto

a estabilidade para pequenas perturbações foram consideradas.

Nas seções de projeto de controladores, mostrou-se que com o método de controle ótimo com restrições estruturais, obtiveram-se bons resultados ao se usar sinais locais e remotos para adicionar amortecimento para o sistema. Estudos considerando perda de link de comunicação e atrasos de tempo associados a disponibilização do sinal remoto foram realizados.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

O objetivo desta dissertação de mestrado foi apresentar algumas das aplicações que podem estar associadas aos modernos sistemas de medição fasorial sincronizada. Esta nova tecnologia permite agregar dados sincronizados em larga escala e de grandes áreas. Os SMFs possuem um grande potencial e possibilitam que diversas aplicações sejam unificadas através de um concentrador de dados que tem com função receber constantemente as informações provenientes de várias unidades de medição fasorial, dispostas de maneira ótima de acordo com algum critério de otimização do posicionamento das PMUs ao longo do sistema elétrico.

Neste trabalho, aborda-se o uso de sistemas de medição fasorial sincronizada para melhorar a performance dinâmica de sistemas elétricos de potência. O primeiro problema associado é o desenvolvimento de um método de busca pela melhor configuração de distribuição de PMUs pelo sistema, de tal forma que esta configuração forneça a maior quantidade de informações. Isto é feito através da determinação de um critério de posicionamento pré-especificado, tal como a coerência angular ou o conteúdo modal dos sinais adquiridos. Todos os critério de alocação de PMUs apresentados neste trabalho têm como ponto em comum a necessidade da formação de uma matriz de informação. A forma de se realizar esta formação é a que define que tipo de posicionamento se deseja obter.

No âmbito do problema de posicionamento de PMUs, estuda-se dois métodos associados a estabilidade transitória e dois relacionados a estabilidade para pequenas perturbações. Com respeito a estabilidade transitória, o objetivo é obter localizações que não pertençam a regiões coerentes, evitando assim que barras que possuam um comportamento transitório semelhante sejam escolhidas. Este método foi formulado de duas maneiras diferentes. Uma que usa diretamente as respostas no tempo das variáveis envolvidas (podendo ser θ , δ , V , ω , entre outras), e a outra consistindo na criação de índices que medem coerência entre sinais. O

que se concluiu é que pode-se alcançar uma melhor distribuição de PMUs pelo sistema ao se executar a abordagem que utiliza a matriz de informação formada diretamente pelas respostas no tempo. Se por alguma razão se desejar pôr mais de uma PMU dentro de uma região coerente, pode-se então usar o método que utiliza os índices de coerência para realizar um “ajuste fino” para encontrar as melhores localizações.

Com respeito à estabilidade para pequenos sinais, foram definidas duas abordagens para formação da matriz de informação, ambas com o objetivo de encontrar localizações que forneçam informações sobre os modos de oscilação eletromecânica especificados. Uma das maneiras de se posicionar PMUs visando buscar informações sobre o conteúdo modal do sistema, é utilizando as ferramentas da teoria de sistemas lineares para formar critérios de alocação. A primeira abordagem se baseia na aplicação de uma transformação de similaridade nas matrizes de estados de um modelo de sistema elétrico de potência linearizado em torno de um ponto de operação, obtendo-se assim informações sobre a associação dos modos de interesse do sistema com relação as saídas medidas, através dos índices de observabilidade. Como PMUs estarão medindo diversas variáveis do sistema, algumas destas variáveis podem ser utilizadas para realimentar sistemas de controle projetados para adicionar amortecimento a um conjunto de modos de oscilação do sistema. O objetivo é encontrar as melhores localizações que contenham informações para serem usadas para fins de controle. A outra maneira de se obter esta configuração de PMUs, pode ser obtida através da definição de índices formados através dos subprodutos da análise de Prony. A vantagem desta metodologia é que pode-se obter informações importantes sobre os modos de oscilação através da decomposição modal implícita na formulação da análise de Prony. A metodologia de Prony foi desenvolvida no século XVIII e praticamente ficou “estacionada” esperando avanços computacionais e numéricos que pudessem viabilizá-la. Porém ainda hoje, com todos os avanços e artifícios computacionais, esta abordagem sofre com os problemas numéricos envolvidos na metodologia, pois são necessárias manipulações matemáticas de matrizes consideravelmente mal condicionadas. Além disto, um outro aspecto negativo que deve ser levado em consideração, é o fato desta técnica de predição linear ser bastante sensível a possíveis ruídos presentes nos sinais. Para contornar este problema, especificou-se uma ordem elevada para o modelo de predição a ser criado, de tal forma a se “acomodar” o ruído, bem como modos “artificiais” necessários para um ajuste preciso dos sinais estimados.

Com respeito a proposta deste trabalho em se utilizar o conteúdo modal estimado através desta metodologia, verifica-se que existe uma certa dificuldade em se encontrar os modos desejados, pois mesmo especificando uma faixa de frequência de interesse, existem modos que aparecem devido as características não-lineares do sistema cujo os sinais pertencem, e que não apareceriam em uma análise de modelo linearizado. Então um cuidado maior deve ser dado na hora de se analisar os modos estimados que se encontram dentro da faixa de frequência especificada.

Nesta dissertação, utiliza-se uma abordagem de controle ótimo com restrições estruturais para implementar controladores que fazem uso tanto de sinais locais quanto de sinais local-

izados remotamente, visando a melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência. Nos dois sistemas teste utilizados, a localização dos controladores e dos sinais suplementares utilizados foram determinadas pelos programas de alocação de PMUs baseado no conteúdo modal do sistema estudado. Os sistemas teste estudados foram o sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste Modificado, com 7 barras e 5 máquinas e o sistema teste New England com 39 barras e 10 máquinas. Uma das estruturas de controle denominada de controlador multi-sinal, faz uso de uma combinação de sinais locais e remotos. Tanto o sinal local quanto o remoto, podem ter coeficientes de peso associados. Quanto ao sinal remoto, levou-se em consideração a possibilidade de perda de sinal remoto e a inclusão de possíveis atrasos de tempo envolvidos na disponibilização dos sinais. Estes atrasos estão relacionados principalmente com o tempo gasto com os processamentos dos sinais e também com a transmissão dos dados das PMUs para o PDC, e do PDC para os centros de controle. Os atrasos de tempo foram modelados através da aproximação de Padé de primeira ordem.

Além da estrutura de controle multi-sinal, considera-se outra estrutura denominada de controle multi-entrada. Esta estrutura utiliza duas funções de transferência, cada uma recebendo um sinal de entrada. Uma destas funções tem como entrada o sinal local e a outra o remoto. Novamente, os sinais podem ter um peso atribuído, atrasos de tempo e possível perda de sinal foram considerados nas simulações, tal como foi testado com a estrutura de controle multi-sinal. Apesar desta estrutura de controle utilizar duas funções de transferência, ainda assim, trata-se de apenas um controlador, pois os sinais de saída de ambas as funções são combinadas para formar uma única entrada de modulação para o regulador automático de tensão da máquina considerada.

A importância do uso de sinais remotos no controle foi evidenciada através dos resultados obtidos. No caso do sistema Equivalente Sul Sudeste, o sinal teve um papel fundamental na estabilização do sistema, pois sem a sua presença mostra-se que não foi possível se criar uma condição aceitável de operação do sistema. Isto ocorreu devido ao fato deste sistema possuir um par de zeros complexos conjugados localizados no lado direito do plano complexo e devido ao fato de o modo instável ser muito pouco controlável através de todas as máquinas do sistema. Portanto apenas com o uso de vários controladores com estrutura convencional ou como mostrado nesta dissertação, com o uso de apenas um controlador que faz uso de sinais locais e remotos, pode-se estabilizar o sistema. A vantagem apresentada neste trabalho é que isto pode ser realizado com apenas um controlador, obtendo ainda assim bons resultados.

Os resultados no caso do sistema teste de New England, mostraram que o esquema de controle tornou-se mais robusto com o uso do sinal remoto, mesmo diante dos vários modos de oscilação eletromecânica com baixo amortecimento do sistema. Testes com perda de sinal e com os atrasos de tempo fixo foram simulados e pôde-se notar que a performance dinâmica do sistema foi melhorada usando apenas um controlador em um sistema com várias máquinas. Resultados melhores poderiam ser obtidos caso mais controladores utilizando sinais locais e remotos fosse projetados. Porém o objetivo deste estudo foi mostrar que com um controlador pode-se afetar diversos modos e mesmo assim, obter melhorias para o

amortecimento do sistema.

Como possíveis idéias de continuação do trabalho, pode-se citar ainda dentro do posicionamento de PMUs, a possibilidade de se criar um critério que leve em consideração outros fatores da análise modal de sistemas lineares, tais como índices de controlabilidade, fatores de participação e “mode-shapes”. Ainda dentro do posicionamento de PMUs visando a estabilidade para pequenas perturbações, pode-se citar métodos para melhorar o desempenho da análise de Prony. Como sugestões, uma versão estendida visando o processamento de vários sinais de uma só vez e uma versão que se comporta melhor perante a presença de ruídos, podem ser implementadas. Pode-se obter avanços também com respeito à praticidade na busca dos modos de interesse dentro dos modos estimados que estão dentro da mesma faixa de frequência especificada.

Com respeito às aplicações de controle, cita-se a implementação de uma técnica de controle coordenado que faz uso de sinais locais e remotos, através da metodologia de posicionamento de pólos. Ao invés de especificar as localizações desejadas dos pólos, pode se especificar regiões desejadas para os pólos que se deseja mover no plano complexo. Acredita-se que podem-se obter vantagens numéricas através desta abordagem. Pode-se associar ao problema de controle restrições estruturais e também características de sistemas de medição fasorial, tais como atrasos de tempo (fixo ou variável) e perda de elos de comunicação, implicando na indisponibilidade de sinais remotos.

Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.labplan.ufsc.br/medfasee/> Website do Projeto MEDFASEE.
- [2] <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/#section2%7cregion> Website de Federico Milano, Autor do *PSAT*.
- [3] V. Balamourougan, T. S. Sidhu, and M. S. Sachdev. Technique for online prediction of voltage collapse. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 151(4):453 – 460, July 2004.
- [4] T. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, and R. Adapa. Power system observability with minimal phasor measurement placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2): 707 – 715, May 1993.
- [5] J. A. L. Barreiros, A. S. Silva, and A. J. A. Simões Costa. A self-tuning predictive power system stabilizer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 20(3): 213 – 219, 1998.
- [6] A. S. Bazanella and A. S. Silva. Self-tuning power system stabilizers based on pole assignment. *2nd IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems*, pages 47 – 52, 1995.
- [7] M. M. Begovic and A. G. Phadke. Voltage stability assessment through measurement of a reduced state vector. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1), February 1990.
- [8] A. L. Bettiol, R. Lira, I. C. Decker, and et al. Fault location in ehv transmission lines using synchronized phasor measurements. *Submetido ao 15th Power Systems Computation Conference, a se realizar em Agosto 2005*, August 2005.
- [9] A. L. Bettiol, R. Lira, I. C. Decker, and et al. Localização de faltas em linhas de transmissão usando medição fasorial sincronizada. *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - XVIII SNPTEE*, Outubro 2005.
- [10] B. Chaudhuri, R. Majumder, and B. C. Pal. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4):1971 – 1979, November 2004.

- [11] J. H. Chow, J. J. Sanchez-Gasca, H. Ren, and S. Wang. Power system damping controller design using multiple input signals. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(4):82 – 90, August 2000.
- [12] A. Conejo, T. Gomez, and J. I. Fuente. Pilot-bus selection for secondary voltage control. *European Transaction on Electrical Power Engineering, ETEP*, 3(5), September 1993.
- [13] I. C. Decker, J. G. Ehrensperger, M. N. Agostini, A. L. Silva, A. S. Bettiol, and S. L. Zimath. Synchronized phasor measurement system: Development and applications. In *Anais do IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE*, pages 93 – 96, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2004.
- [14] P. Denys, C. Counan, L. Hossenlopp, and C. Holweck. Measurement of voltage phase for the french future defence plan against losses of synchronism. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(1):62 – 69, January 1992.
- [15] X. Dong-jie, H. Ren-mu, and X. Tao. A new approach to power system electromechanical oscillation research. *International Conference on Power Systems and Communications Systems Infrastructures for the Future*, September 2002.
- [16] Juliana G. Ehrensperger. *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Centro Tecnológico, Labplan, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [17] Elforsk. Wide area measurements of power system dynamics: The north american wams project and its applicability to the nordic contries. 2000.
- [18] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emani-Naeini. *Feedback Control of Dynamic Systems*. Reading, MA; Addison Wesley, 3 edition, 1994.
- [19] Francisco D. Freitas. *Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência Via Controle Ótimo com Restrições Estruturais*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- [20] J. C. Geromel. *Methods and Techniques for Decentralized Control Systems: Analysis and Design*. Ed Clup, Milano, Utaly, 1 edition, 1994.
- [21] F. Gubina and B. Strmcnik. Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach. *IEEE Transactions on Power System*, 10(2):778 – 794, May 1993.
- [22] J. F. Hauer. Application of prony analysis to the determination of modal content and equivalent models for measured power system response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3):1062 – 1068, 1991.

- [23] J. F. Hauer, C. J. Demeure, and L. L. Scharf. Initial results in prony analysis of power system response signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1), February 1990.
- [24] D. Ivanescu, A. Snyder, J. Dion, L. Dugard, D. Georges, and N. Hadjsaid. Robust stabilizing controller for an interconnected power system: A time delay approach. *Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems*, July 2000.
- [25] I. Kamwa, L. Gérin-Lajoie, and G. Trudel. Multi-loop power system stabilizers using wide-area synchronous phasor measurements. *Proceedings of the American Control Conference*, June 1998.
- [26] I. Kamwa and R. Grondin. Pmu configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(2):385 – 394, May 2002.
- [27] I. Kamwa, R. Grondin, D. Asber, J. P. Gingras, and G. Trudel. Large-scale active-load modulation for angle stability improvement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2):582 – 590, May 1999.
- [28] I. Kamwa, R. Grondin, and Y. Hébert. Wide-area measurements based stabilizing control of large power systems - a decentralized/hierarchical approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(1), February 2001.
- [29] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc, New York, 1 edition, 1994.
- [30] P. Lagonotte, J.C. Sabonnadiere, J. Y. Leost, and J. P. Paul. Structural analysis of the electrical system: Application to secondary voltage control in france. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2):479 – 486, May 1989.
- [31] M. Larsson and C. Rehtanz. Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurements. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1:233 – 238, 2002.
- [32] S. T. Y. Lee and F. C. Schweppe. Distance measures and coherency recognition for transient stability equivalents. *IEEE Transactions on Power Application Systems*, pages 1550 – 1557, September 1973.
- [33] R. Marini, A. S. Silva, and I. C. Decker. Melhoria da estabilidade angular de sistemas elétricos usando medição fasorial sincronizada. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.
- [34] N. Martins and L. T. G. Lima. Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problem. *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance*, pages 17 – 33, 1989.

- [35] N. Martins and L. T. G. Lima. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4):1455 – 1469, 1990.
- [36] F. Milano. *Power System Analysis Toolbox: Documentation for PSAT version 1.3.0*. Free Software Foundation, May 2004.
- [37] L. Mili, T. Baldwin, and R. Adapa. Phasor measurement placement for voltage stability analysis of power systems. *29th IEEE Conference on Decision and Control*, 29, December 1990.
- [38] H. Okamoto, A. Kurita, J. J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N. W. Miller, and J. H. Chow. Identification of equivalent linear power system models from electromagnetic transient time domain simulations using prony’s method. *Proceedings of the 35th IEEE Decision and Control*, 4:3857 – 3863, December 1996.
- [39] E. W. Palmer and G. Ledwich. Optimal placement of angle transducers in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(2), May 1996.
- [40] Hector E. Peña. *Controle Ótimo Descentralizado Aplicado ao Projeto e Coordenação de Estabilizadores de Sistemas de Potência*. Tese (doutorado em engenharia elétrica), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
- [41] A. G. Phadke. Synchronized phasor measurement in power systems. *IEEE Computer Applications on Power Systems*, 6(2):10 – 15, April 1993.
- [42] M. B. Priestley. *Spectral Analysis and Time Series*. Academic Press, New York, 1992.
- [43] G. R. B. Prony. *Essai Experimental Et Analytic, etc*, volume 1. J. L’Ecole Polytechnique, Paris, pp 24 - 76, 1975.
- [44] S. P. Rao and I. Sen. Robust pole placement stabilizer design using linear matrix inequalities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, February 2000.
- [45] J. Rasmussen and P. Jorgensen. Synchronized phasor measurements of a power system event in eastern denmark. *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, 3, June 1992.
- [46] C. Rehtanz and J Bertsch. Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2:842 – 847, 2002.
- [47] O. Samuelsson, H. Jóhannsdóttir, N. Gustavsson, T. Hrafnsson, D. Karlsson, D. Novosel, J. Sälj, and A. Sollie. Power system damping in iceland based on phasor measurements. *International Conference on Power Systems and Communications Systems Infrastructures for the Future*, September 2002.

- [48] S. Sastry and P. Varaiya. Coherency for interconnected power systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26:218 – 226, 1981.
- [49] Scharf91. The svd and reduced rank signal processing. *Signal Processing*, 25(2), November 1991.
- [50] A. S. Silva and A. J. A. Simões Costa. *Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência, Apostila*. LABSPOT/PGEEL/UFSC, Florianópolis - SC, 2002.
- [51] A. J. A. Simões Costa and R. Salgado. *Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência, Apostila*. LABSPOT/PGEEL/UFSC, Florianópolis - SC, 2002.
- [52] C. W. Taylor and R. E. Wilson. Bpa's wide area stability and voltage control system (wacs): overview and large-scale simulations. *IX Xymposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE*, May 2004.
- [53] D. J. Trudnowski, J. M. Johnson, and J. F. Hauer. Making prony analysis more accurate using multiple signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1):226 – 231, February 1999.
- [54] D. J. Trudnowski, J. R. Smith, T. A. Short, and D. A. Pierre. An application of prony methods in pss design for multimachine systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1):118 – 126, February 1991.
- [55] Y. Wang, C. Liu, L. Sue, and W. Liu. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurements units (pmus) - a case study. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2:1191 – 1195, July 2000.
- [56] J. Wu, W. C. Kong, and Y. Han. Dynamic monitoring and control system based on synchronized phasor measurement in heilongjian eastern power system. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 3:1689 – 1693, January 2000.
- [57] C. S. Yu and C. W. Liu. A practical design of tcsc controllers for the inter-area transient stability control using real-time measurements. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1:661 – 666, February 1999.

Apêndice A

Dados dos Sistemas Teste

A.1 Sistema Teste New England

Frequência = 60 Hz; Base MVA = 100.

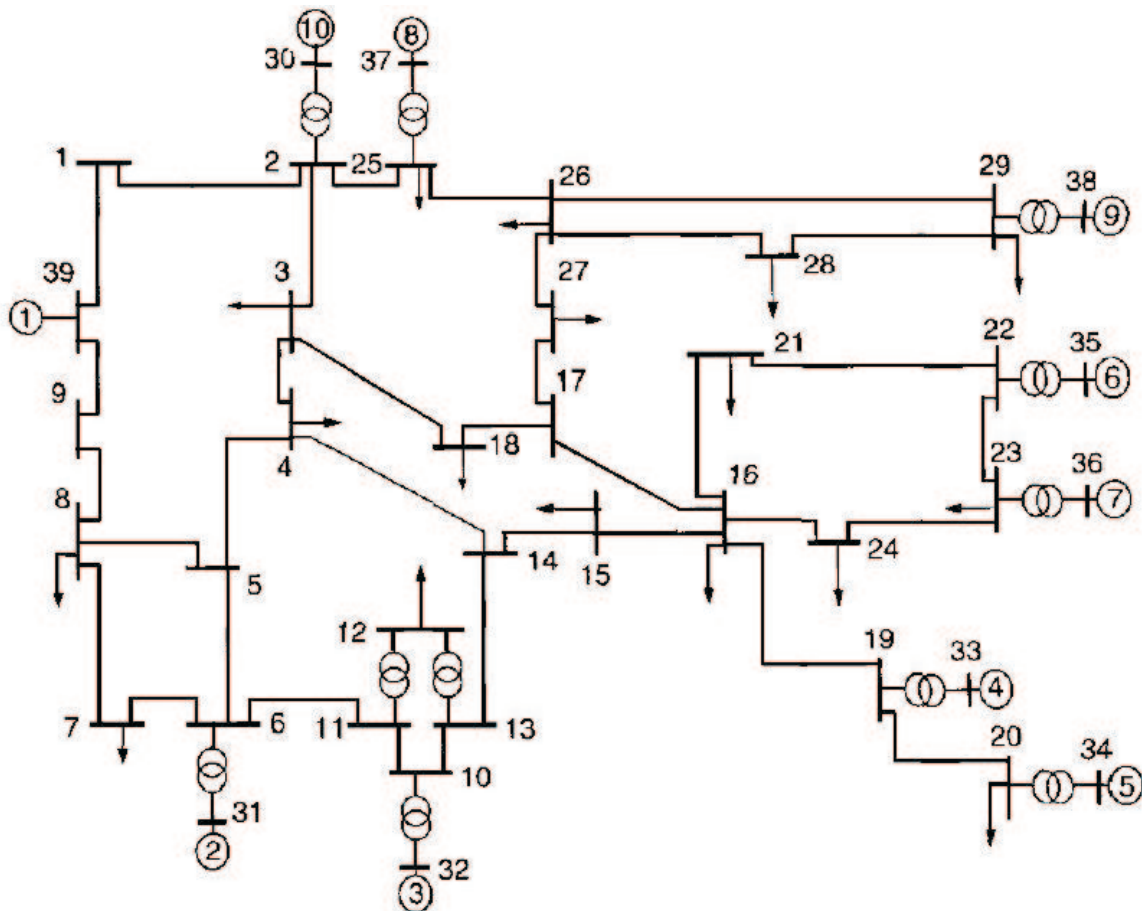


Figura A.1: Configuração do Sistema Teste New England

A.1.1 Dados de Barra

BARRA		TENSÃO		GERAÇÃO	
Nº	Nome	Magnitude	Ângulo	MW	MVar
1		1,048	-9,5°		
2		1,049	-6,9°		
3		1,031	-9,8°		
4		1,004	-10,5°		
5		1,005	-9,4°		
6		1,007	-8,7°		
7		0,997	-10,9°		
8		0,996	-11,4°		
9		1,028	-11,2°		
10		1,017	-6,3°		
11		1,013	-7,1°		
12		1,000	-7,1°		
13		1,014	-7,0°		
14		1,012	-8,7°		
15		1,016	-9,1°		
16		1,032	-7,7°		
17		1,034	-8,7°		
18		1,031	-9,5°		
19		1,050	-3,0°		
20		0,991	-4,5°		
21		1,032	-5,3°		
22		1,050	-0,8°		
23		1,045	-1,0°		
24		1,038	-7,6°		
25		1,058	-5,5°		
26		1,052	-6,8°		
27		1,038	-8,8°		
28		1,051	-3,3°		
29		1,050	-0,5°		
30	Gerador 10	1,048	-4,5°	250,0	146,3
31	Gerador 2	0,982	0,1°	573,2	207,1
32	Gerador 3	0,983	1,7°	650,0	205,3
33	Gerador 4	0,997	2,2°	632,0	108,6
34	Gerador 5	1,012	0,7°	508,0	166,5
35	Gerador 6	1,049	4,1°	650,0	209,3

BARRA		TENSÃO		GERAÇÃO	
N ^o	Nome	Magnitude	Ângulo	MW	MVar
36	Gerador 7	1,064	6,8°	560,0	102,1
37	Gerador 8	1,028	1,2°	540,0	0,4
38	Gerador 9	1,027	6,5°	830,0	23,0
39	Gerador 1	1,030	-11,0°	1000,0	87,4

Tabela A.1: Dados de Barra do Sistema Teste New England.

BARRA		CARREGAMENTO		SHUNT
N ^o	Nome	MW	MVar	(p.u.)
1				
2				
3		322,0	2,4	
4		500,0	184,0	
5				
6				
7		233,8	84,0	
8		522,0	176,0	
9				
10				
11				
12		8,5	88,0	
13				
14				
15		320,0	153,0	
16		329,4	32,3	
17				
18		158,0	30,0	
19				
20		680,0	103,0	
21		274,0	115,0	
22				
23		247,5	84,6	
24		308,6	-92,2	
25		224,0	47,2	
26		139,0	17,0	
27		281,0	75,5	
28		206,0	27,6	
29		283,5	26,9	
30				
31		9,2	4,6	
32				
33				

BARRA		CARREGAMENTO		SHUNT
N ^o	Nome	MW	MVar	(p.u.)
34				
35				
36				
37				
38				
39		1104,0	250,0	

Tabela A.2: Dados de Carregamento do Sistema Teste New England.

A.1.2 Dados de Linha

De	Para	R (p.u.)	X (p.u.)	Suscep. (MVar)
1	2	0,0035	0,0411	69,87
1	39	0,001	0,025	75,0
2	3	0,0013	0,0151	25,72
2	25	0,007	0,0086	14,6
2	30	0,0	0,0181	0,0
3	4	0,0013	0,0213	22,14
3	18	0,0011	0,0133	21,38
4	5	0,0008	0,0128	13,42
4	14	0,0008	0,0129	13,82
5	6	0,0002	0,0026	4,34
5	8	0,0008	0,0112	14,76
6	7	0,0006	0,0092	11,3
6	11	0,0007	0,0082	13,89
6	31	0,0	0,025	0,0
7	8	0,0004	0,0046	7,8
8	9	0,0023	0,0363	38,04
9	39	0,001	0,025	120,0
10	11	0,0004	0,0043	7,29
10	13	0,0004	0,0043	7,29
10	32	0,0	0,02	0,0
11	12	0,0016	0,0435	0,0
12	13	0,0016	0,0435	0,0
13	14	0,0009	0,0101	17,23
14	15	0,0018	0,0217	36,6

De	Para	R (p.u.)	X (p.u.)	Suscep. (MVar)
15	16	0,0009	0,0094	17,1
16	17	0,0007	0,0089	13,42
16	19	0,0016	0,0195	30,4
16	21	0,0008	0,0135	25,48
16	24	0,0003	0,0059	6,8
17	18	0,0007	0,0082	13,19
17	27	0,0013	0,0173	32,16
19	20	0,0007	0,0138	0,0
19	33	0,0007	0,0142	0,0
20	34	0,0009	0,018	0,0
21	22	0,0008	0,014	25,65
22	23	0,0006	0,0096	18,46
22	35	0,0	0,0143	0,0
23	24	0,0022	0,035	36,1
23	36	0,0005	0,0272	0,0
25	26	0,0032	0,0323	51,3
25	37	0,0006	0,0232	0,0
26	27	0,0014	0,0147	23,96
26	28	0,0043	0,0474	78,02
26	29	0,0057	0,0625	102,9
28	29	0,0014	0,0151	24,9
29	38	0,0008	0,0156	0,0

Tabela A.3: Dados de Linha do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.

A.1.3 Dados dos Geradores Síncronos

	NÚMERO DO GERADOR [BARRA DO GERADOR]									
	1 [39]	2 [31]	3 [32]	4 [33]	5 [34]	6 [35]	7 [36]	8 [37]	9 [38]	10 [30]
<i>MVA</i>	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
T'_{do}	0,0	6,56	5,7	5,69	5,4	7,3	5,66	6,7	4,79	10,2
T'_{qo}	0,0	1,5	1,5	1,5	0,44	0,4	1,5	0,41	1,96	0,0
X_d	0,0	2,95	2,495	2,62	6,7	2,54	2,95	2,9	2,106	1,0
X_q	0,0	2,82	2,37	2,58	6,2	2,41	2,92	2,8	2,05	0,69
X'_d	0,01	0,697	0,531	0,436	1,32	0,5	0,49	0,57	0,57	0,31
X'_q	0,0	1,7	0,531	0,436	1,32	0,5	0,49	0,57	0,57	0,0

	NÚMERO DO GERADOR [BARRA DO GERADOR]									
	1 [39]	2 [31]	3 [32]	4 [33]	5 [34]	6 [35]	7 [36]	8 [37]	9 [38]	10 [30]
H	1000	3,03	3,58	2,86	2,6	3,48	2,64	2,43	3,45	4,2
R_a	0,0	0,027	0,00386	0,00222	0,0014	0,0615	0,00268	0,00686	0,003	0,0014
D	377	9,75	10,0	10,0	3,0	10,0	8,0	9,0	14,0	4,0

Tabela A.4: Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Teste New England.

A.1.4 Dados dos Reguladores de Tensão

	NÚMERO DO GERADOR [BARRA DO GERADOR]								
	2 [31]	3 [32]	4 [33]	5 [34]	6 [35]	7 [36]	8 [37]	9 [38]	10 [30]
K_a	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	40,0
T_a	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
K_f	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
T_f	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K_e	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
T_e	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A.5: Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Teste New England.

O modelo para o regulador de tensão utilizado neste sistema está apresentado na Figura A.2. Este modelo é derivado do modelo de regulador de tensão do IEEE do tipo 1, porém sem a presença do bloco de saturação.

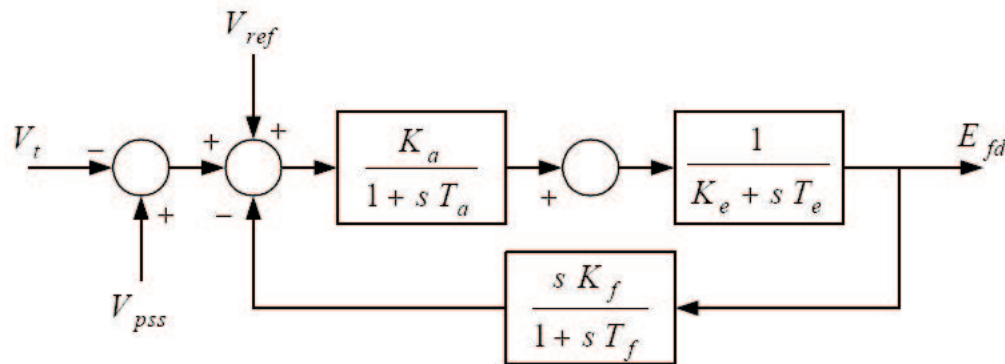


Figura A.2: Diagrama de blocos do modelo de regulador de tensão

A.2 Sistema Equivalente Brasileiro Sul-Sudeste

Frequência = 60 Hz; Base MVA = 1000.

A.2.1 Dados de Barra

BARRA		TENSÃO		GERAÇÃO	
Nº	Nome	Magnitude	Ângulo	MW	MVar
1	Foz do Areia	1,030	24,5°	1658,0	-412,0
2	Salto Santiago	1,030	27,2°	1332,0	-200,1
3	Salto Segredo	1,029	26,6°	1540,0	-446,5
4	Itaipu	1,039	48,5°	6500,0	1958,6
5	Barra Interm. A	0,998	21,2°		
6	Barra Interm. B	0,989	21,4°		
7	Equivalente S-SE	0,966	0,00	-3164,0	952,7

Tabela A.6: Dados de Barra do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.

BARRA		CARREGAMENTO		SHUNT
Nº	Nome	MW	MVar	(p.u.)
1	Foz do Areia	2405,0	-467,0	0,1792
2	Salto Santiago	692,30	-184,0	0,1491
3	Salto Segredo	688,20	-235,0	0,1142
4	Itaipu	62,600	24,3	0,0368
5	Barra Interm. A	845,80	-9,2	0,0330
6	Barra Interm. B	-4,9000	79,8	2,1420
7	Equivalente S-SE	2884,0	-196,0	0,0420

Tabela A.7: Dados de Carregamento do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.

A.2.2 Dados de Linha

De	Para	R (p.u.)	X (p.u.)
1	3	0,0030	0,0380
2	3	0,0050	0,0760
4	6	0,0029	0,0734
5	1	0,0190	0,2450
5	2	0,0150	0,2250
6	5	0,0000	0,0390
6	7	0,0040	0,0570

Tabela A.8: Dados de Linha do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.

Obs: As susceptâncias de linha deste equivalente de 7 barras e 5 máquinas, foram combinadas com os reatores shunt de barra, de tal forma que os valores totais já estão especificados nos dados de barra.

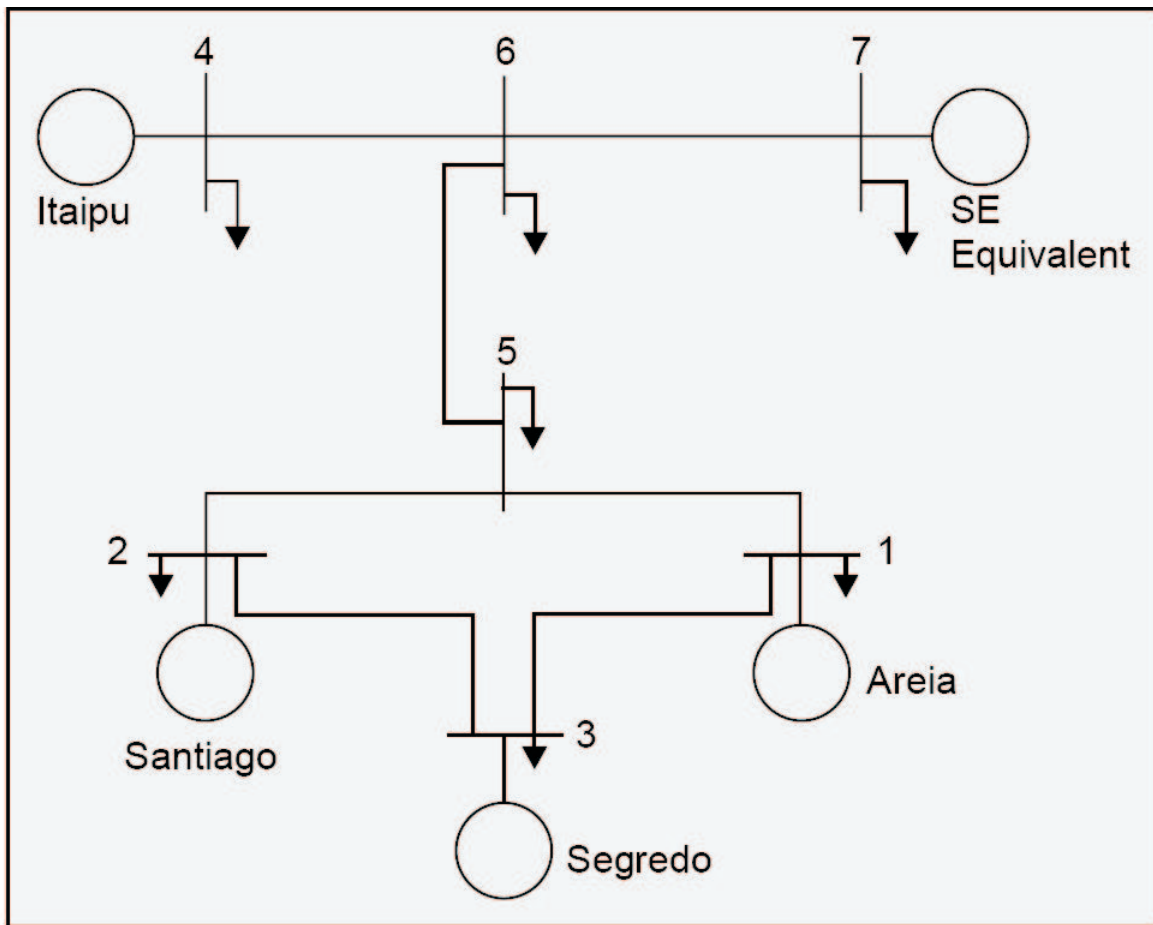


Figura A.3: Configuração do Sistema Equivalente Sul Sudeste Brasileiro

A.2.3 Dados dos Geradores Síncronos

Obs: As resistências de estator e os coeficientes de amortecimento D são iguais a zero para todas as máquinas. Todas as cinco máquinas têm o mesmo modelo de regulador de tensão de primeira ordem. Os parâmetros para o sistema de controle da excitação são:

$$AVR(s) = \frac{30}{a + s0,05}$$

Não estão representados os efeitos da turbina e dos reguladores de velocidade.

	NÚMERO DO GERADOR [BARRA DO GERADOR]				
	1 [1]	2 [2]	3 [3]	4 [4]	7 [7]
<i>MVA</i>	1900	1400	1944	6633	6000
T'_{do}	5,0	5,0	5,0	7,6	8,0
T''_{do}	0,053	0,053	0,060	0,090	0,090
<i>H</i>	4,50	4,50	4,50	5,07	5,00
X_d	0,85	0,85	0,88	0,90	1,00
X_q	0,70	0,70	0,69	0,68	0,70
X'_d	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
X''_d	0,20	0,20	0,20	0,24	0,25
X''_q	0,20	0,20	0,20	0,27	0,25

Tabela A.9: Dados dos Geradores Síncronos do Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro.

Apêndice B

Programa Computacional

Nesta seção, apresentam-se os programas computacionais desenvolvidos em MATLAB e utilizados neste trabalho e também alguns fluxogramas com o intuito de facilitar o entendimento dos programas criados e de suas respectivas funções.

Os programas basicamente englobam dois assuntos diferentes (porém há uma ocasião em que são utilizados de maneira complementar), sendo um tópico composto pelo posicionamento de PMUs e o outro tópico consistindo na análise de Prony. Cada um destes programas tem diferentes versões e também possuem alguns sub-programas auxiliares associados, destinados a realizar tarefas tais como adquirir os dados de entrada, as respostas no tempo das variáveis envolvidas, preparar os dados para execução das rotinas, entre outras diversas funções. O programa de posicionamento de PMUs é constituído por duas versões principais, sendo uma delas a versão que faz uso dos sinais temporais e a outra versão consistindo no programa que realiza o posicionamento baseado nos índices de observabilidade. No caso da aplicação que necessita das respostas no tempo das variáveis desejadas, os sinais utilizados podem ser os sinais “originais” adquiridos junto a um programa de simulações não lineares, ou dependendo da forma com que a matriz de informação será formada, também podem ser os sinais estimados através do programa que executa a análise de Prony. Com respeito ao caso em que se utiliza os índices de observabilidade para formar a matriz de informação, os sinais temporais não são necessários. Neste caso, deve-se obter as matrizes de estado, de entradas e saídas A , B , C e D , do sistema linearizado em torno de um ponto de operação.

Para simplificar, os programas de alocação abrangem quatro tipos diferentes de posicionamento de PMUs, lembrando que a diferença entre os métodos está na forma como que a matriz de informação é formada. A matriz de informação pode ser formada das seguintes maneiras:

- Formada pelas respostas temporais (ver Equação 3.3.1);
- Formada pela pela matriz de coerência (ver Equação 3.7);

- Formada pelos índices de observabilidade (ver seção 3.2.4);
- Formada pelos coeficientes adquiridos através da análise de Prony (ver seção 3.2.5).

As figuras abaixo apresentam de maneira simplificada algumas das rotinas computacionais criadas para auxiliar esta dissertação e como estes programas se comunicam entre si.

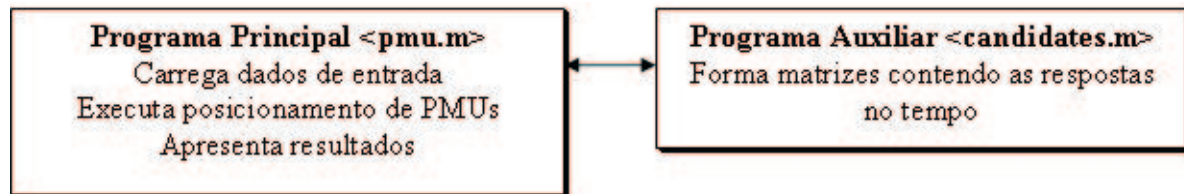


Figura B.1: Posicionamento de PMUs usando respostas temporais

A figura acima exemplifica o funcionamento do programa de alocação de PMUs utilizando os sinais temporais de uma determinada variável. Para medição do conteúdo de informação da matriz de informação, aplica-se uma norma específica na matriz de informação. Esta matriz de informação neste caso pode ser simplesmente a própria matriz de sinais (a matriz cujas colunas são as respostas transitórias do sistema) ou a matriz de coerência formada a partir dos índices denominados como índices de coerência.

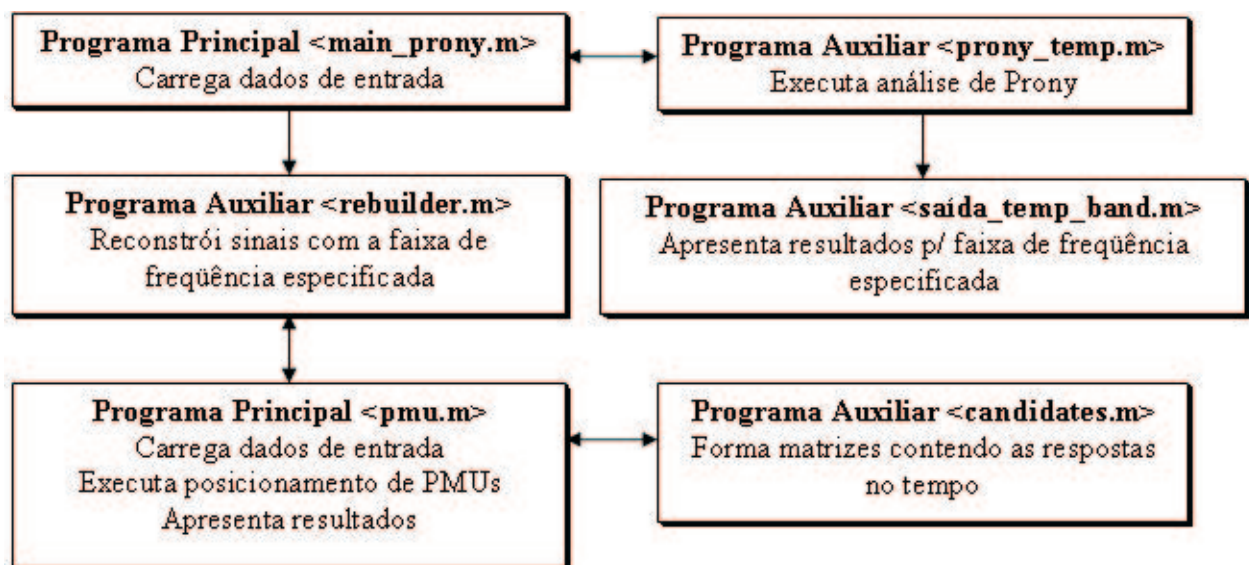


Figura B.2: Posicionamento de PMUs usando sinais estimados via análise de Prony

A escolha das melhores localizações através da análise de Prony pode se dar de duas formas diferentes. Além da proposta na seção 3.2.5, pode-se fazer o que está descrito resumidamente na figura acima. A Figura B.2 exemplifica o funcionamento do programa de

alocação de PMUs utilizando os sinais estimados através da análise de Prony. Da mesma forma que anteriormente, para realizar a medição do conteúdo de informação da matriz de informação, aplica-se uma norma específica na matriz de informação. Porém neste caso a matriz de informação é formada por sinais estimados contendo apenas os modos de oscilação cujas frequências estão dentro da faixa de frequências escolhidas no início do programa. De maneira resumida, o procedimento do programa começa com a aquisição dos sinais junto a um programa de simulação não linear. Após esta etapa, calcula-se o conteúdo modal dos sinais através da análise de Prony para logo em seguida reconstruir estes sinais, apenas com informações sobre a faixa de frequência especificada. Após estes passos, o procedimento segue exatamente como ocorre no caso da alocação de PMUs utilizando as respostas transitórias do sistema. Porém o que foi explicado na seção 3.2.5 foi que a alocação seria definida pelos índices contidos na matriz B , e que dentro desta matriz, apenas os índices referentes aos modos que estão dentro da faixa de frequência desejada, seriam escolhidos. Este método pode ser igualmente explicado através da mesma Figura B.3 que é destinada a demonstrar o funcionamento do método de alocação de PMUs que usa os índices de observabilidade para formar a matriz de informação. A diferença é que neste último a matriz que é utilizada para formar a matriz de informação é a matriz C já obtida após uma transformação de similaridade aplicada nas matrizes de estado do sistema.

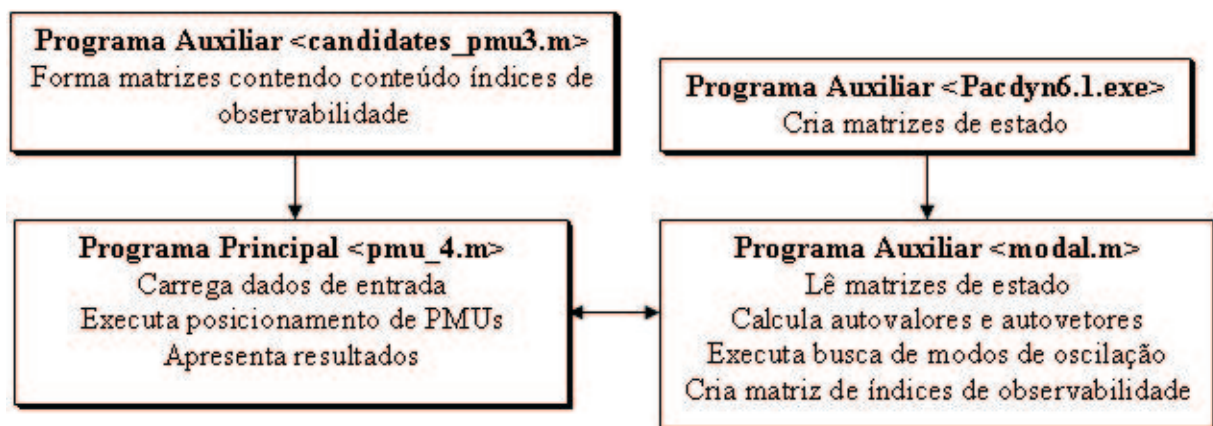


Figura B.3: Posicionamento de PMUs usando os índices de observabilidade

A figura acima exemplifica o funcionamento do programa de alocação de PMUs utilizando os índices de observabilidade. Da mesma forma que anteriormente, para realizar a medição do conteúdo de informação da matriz de informação, aplica-se uma norma específica na matriz de informação. Neste caso a matriz de informação é formada pelos índices de observabilidade adquiridos através das matrizes do sistema linearizado. O procedimento do programa começa com a aquisição das matrizes do sistema linearizado. Após esta etapa, aplica-se uma transformação de similaridade nas matrizes de tal forma a desacoplar os estados na matriz de estados. Após algumas manipulações matemáticas, utiliza-se uma nova matriz C (que relaciona os modos de oscilação as variáveis de saída) para montar a matriz de

informação.

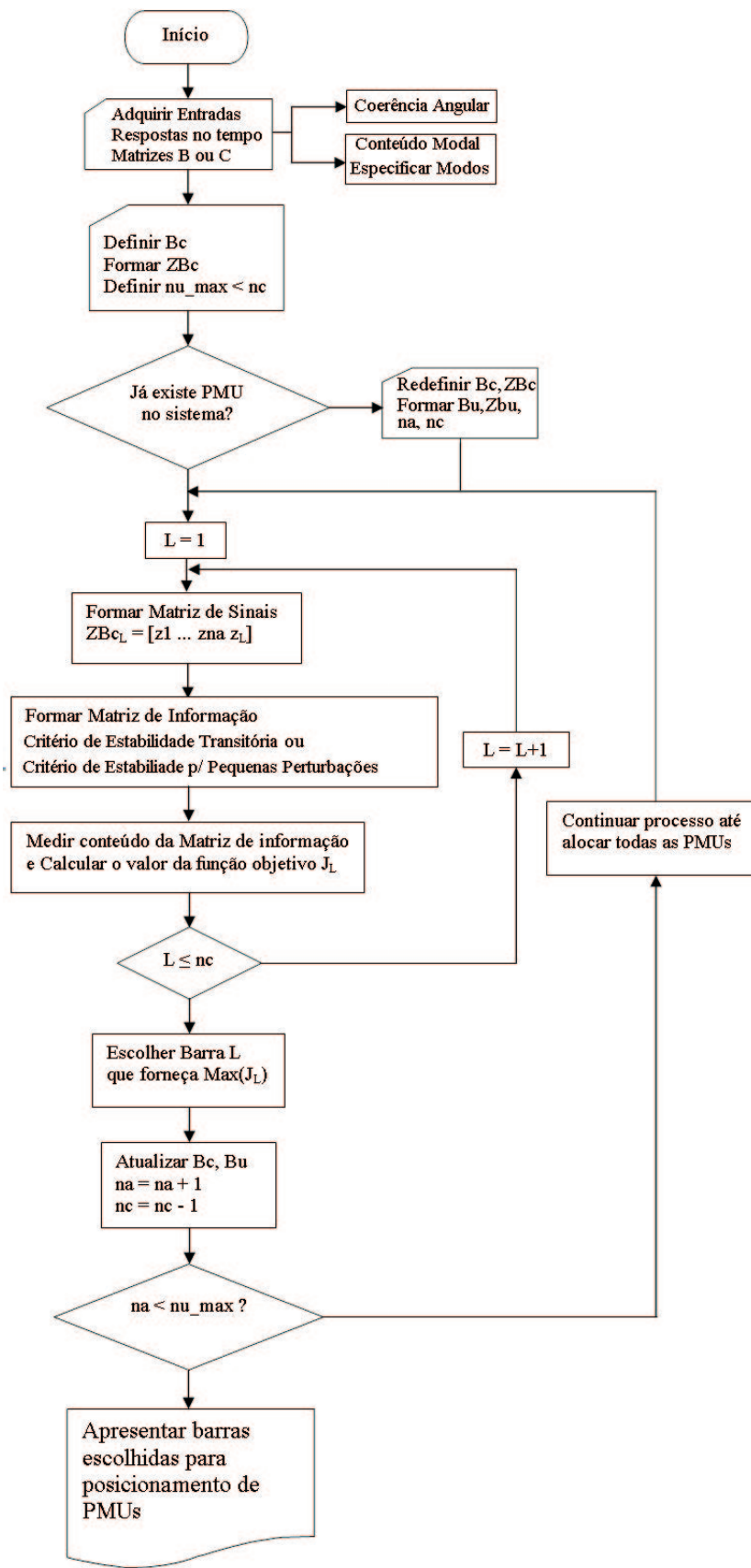


Figura B.4: Posicionamento de PMUs usando respostas temporais

O posicionamento de PMUs neste caso visa obter as melhores localizações do ponto de vista modal, ou seja, a melhor configuração de PMUs que maximizará a quantidade de informações sobre um determinado modo ou conjunto de modos de oscilação. Acima demonstrou-se como os programas trocam informações entre si para executar as tarefas designadas.

A Figura B.4 apresenta o algoritmo de posicionamento de PMUs utilizando sinais contendo as respostas no tempo das variáveis envolvidas. O funcionamento do programa que realiza a estimação do conteúdo modal dos sinais pode ser exemplificado utilizando a mesma figura. A principal diferença entre este programa e o citado anteriormente, é o fato de que o primeiro utiliza os sinais originalmente retirados do programa de simulações não lineares, e o outro utiliza os sinais reconstruídos que contém apenas os modos de oscilação cujas frequências respeitam uma faixa especificada na entrada de dados do programa. Os passos para execução da estimação dos modos de um dado sinal através da análise de Prony já foram apresentados anteriormente na seção 3.2.5. Nesta mesma figura, estão incorporados os critérios de formação da matriz de informação tanto para a estabilidade transitória, quanto para a estabilidade para pequenas perturbações.

Apêndice C

Siglas

ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
A/D	Analógico/Digital
AEP	American Electric Power
ATP	Alternative Transient Program
BPA	Bonneville Power Administration
CAG	Controle Automático de Geração
CER	Compensador Estático de Reativo
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
EDF	Electricité de France
EHV	Extra High Voltage
ESP	Estabilizador de Sistemas de Potência
FACTS	Flexible AC Transmission System
FCO	Forma Canônica Observável
FTV	Fast Turbine Valving
GPS	Global Positioning System
LMI	Linear Matrix Inequality
LT	Linha de Transmissão
MPLD	Modelo de Predição Linear Discreta
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OIS	Operador Independente do Sistema
OMIB	One-Machine-Infinite-Bus
PACDYN	Programa de Estabilidade a Pequenas Perturbações
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit

PRLQ	Problema do Regulador Linear Quadrático
PSAT	Power System Analysis Toolbox
PSS	Power System Stabilizer
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCE	Southern California Edison
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SMF	Sistema de Medição Fasorial
SVC	Static VAR Compensator
SVD	Singular Value Decomposition
TCSC	Thyristor Controlled Serial Compensator
TVA	Tennessee Valley Authority
UPFC	Unified Power Flow Controller
USP	Unified Smith Predictor
VCPI	Voltage Collapse Prediction Index
WACS	Wide Area Stability and Voltage Control System