



REASON



Curso sobre Medição Fasorial Teoria e Prática

Melhoria da Estabilidade Usando Sinais de SPMS

Prof. Aguinaldo S. Silva – Labspot / UFSC
Daniel Dotta – LabPlan / UFSC

08-09/11/2007

Objetivo da Apresentação

Apresentar as potenciais aplicações para
melhorar a estabilidade de sistemas
elétricos usando SPMS

Escopo

- ❑ Desafios Atuais na Operação dos Sistemas Elétricos
- ❑ Estabilidade de Sistemas Elétricos
- ❑ Controle Atual de Sistemas Elétricos
- ❑ Melhoria da Estabilidade usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada
 - ❑ Estabilidade Angular
 - ❑ Estabilidade de Tensão
 - ❑ Estabilidade de Frequência

Operação de Sistemas Elétricos

(Desafios Atuais)

- ◆ Sistema elétricos operando perto do limite
 - Falta de investimento em infra-estrutura
 - Restrições econômicas e ambientais para o investimento em transmissão
 - Requisitos severos de qualidade
 - Energia é um bem essencial para a vida contemporânea
- ◆ Sistemas desregulamentados
 - Competição entre os agentes
 - Agentes trabalham com metas próprias e nem sempre favoráveis a operação segura do sistema
- ◆ Estabilidade do sistema tende a ser crítica
 - Blackouts ocorridos no últimos anos

Operação do Sistema Elétrico

(Melhoria do Desempenho Dinâmico)

◆ Novas Tecnologias

- FACTS
- Esquemas de controle

◆ SPMS

- Monitoração
- Esquemas de Controle

Estabilidade de Sistemas Elétricos

(Noção Geral)

◆ Principais Questões

- Existência do ponto de equilíbrio
- Estabilidade do ponto de equilíbrio
- Domínio de atração do ponto de equilíbrio

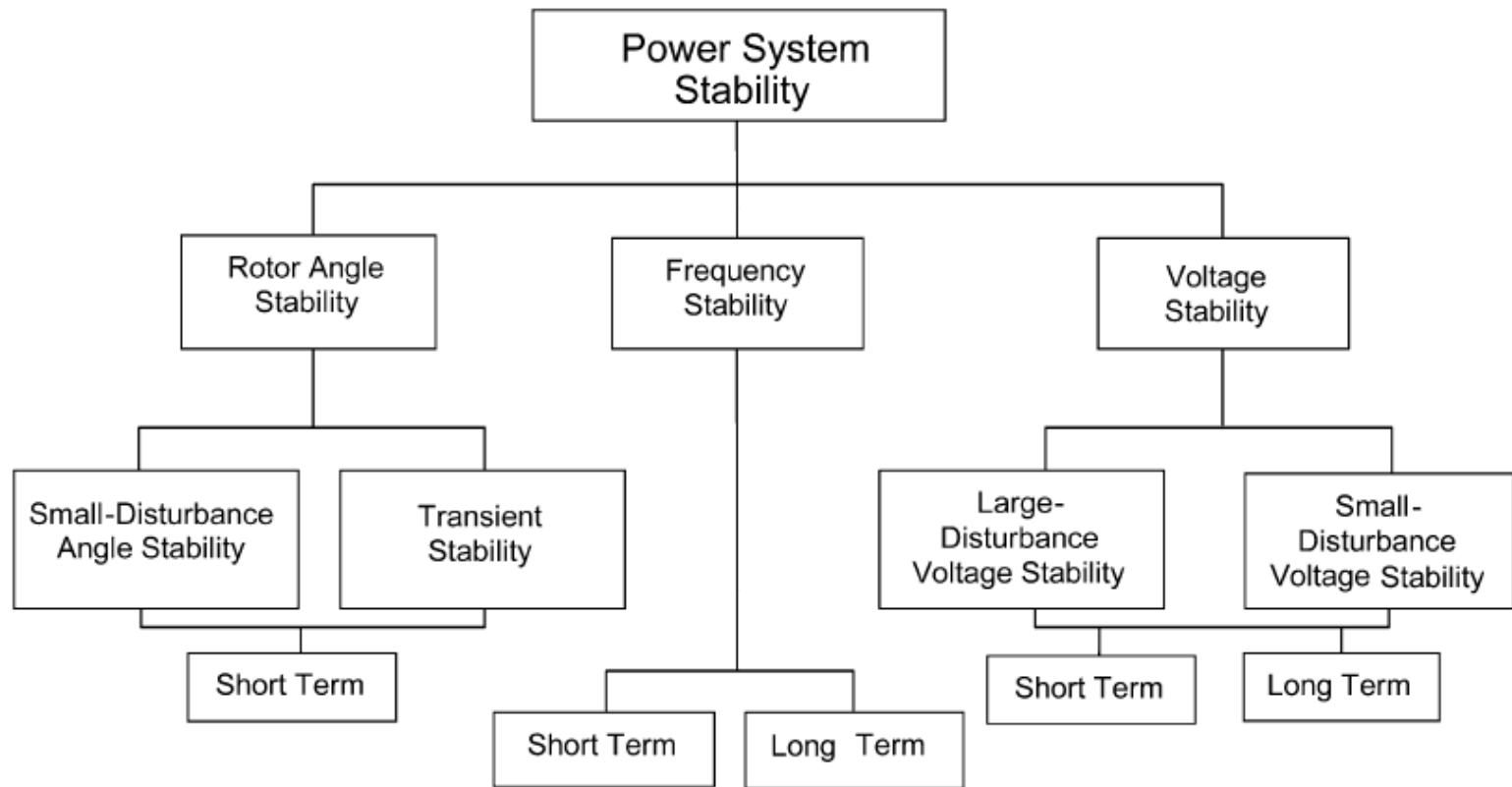
◆ Estabilidade do ponto de equilíbrio determinada pelo jacobiano obtido pela linearização do sistema

◆ Domínio de atração determinado por simulação ou funções de Liapunov

Estabilidade de Sistemas Elétricos

- ◆ A estabilidade de um SEE é essencialmente um só problema
 - No entanto devido à alta dimensão e complexidade do sistema elétrico há a dificuldade no tratamento da estabilidade como sendo um único problema
- ◆ A classificação da estabilidade em categorias é essencial
 - Identificação de fatores que afetam a estabilidade
 - Análise e planejamento de melhorias
- ◆ Há a necessidade de simplificações que representem o sistema com um grau satisfatório de detalhe
- ◆ Técnicas apropriadas de análise e prevenção para cada tipo de instabilidade podem ser desenvolvidas com maior facilidade

Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência



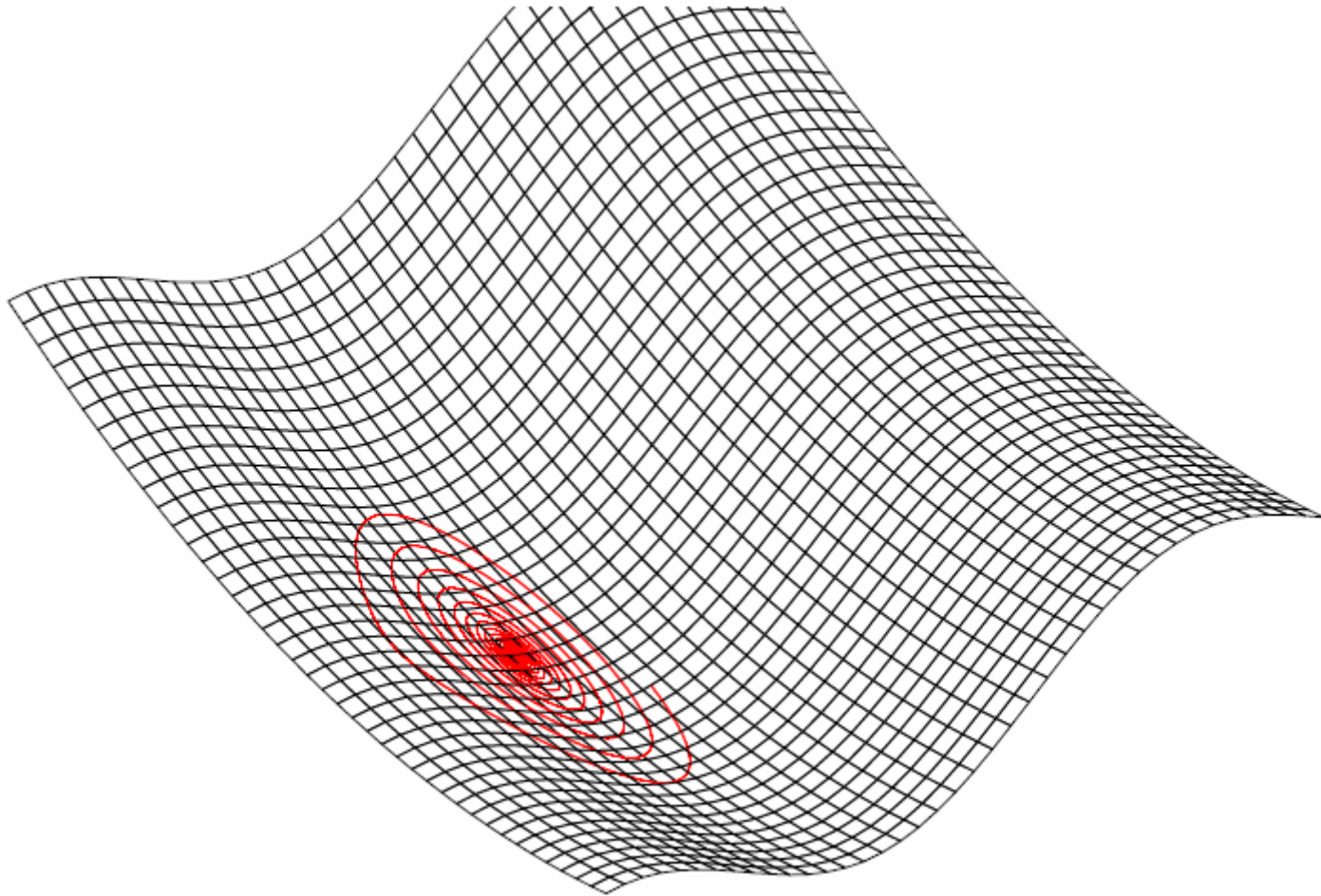
Estabilidade Angular

(Aspectos Gerais)

- ◆ Associada à dinâmica eletromecânica dos geradores
- ◆ Pode ser tratada dentro da teoria dos sistemas dinâmicos
- ◆ Estabilidade para pequenas perturbações está associada à
 - Existência do ponto de equilíbrio
 - Estabilidade do ponto de equilíbrio
- ◆ Estabilidade transitória associada ao domínio de atração
 - Ponto de equilíbrio é estável
 - O sistema retorna ao ponto de equilíbrio após uma grande perturbação?

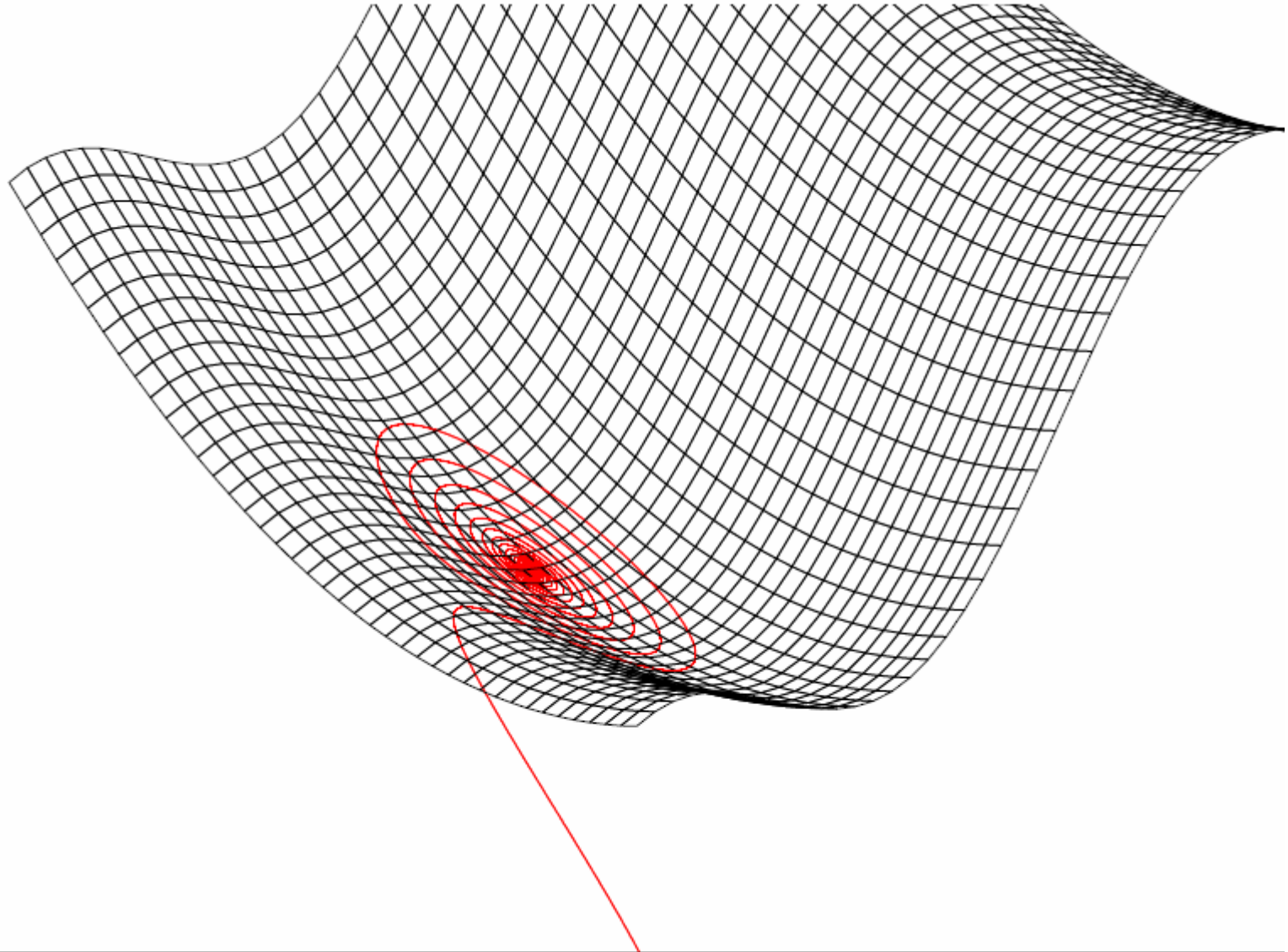
Estabilidade Angular

(Ponto de Equilíbrio Estável)



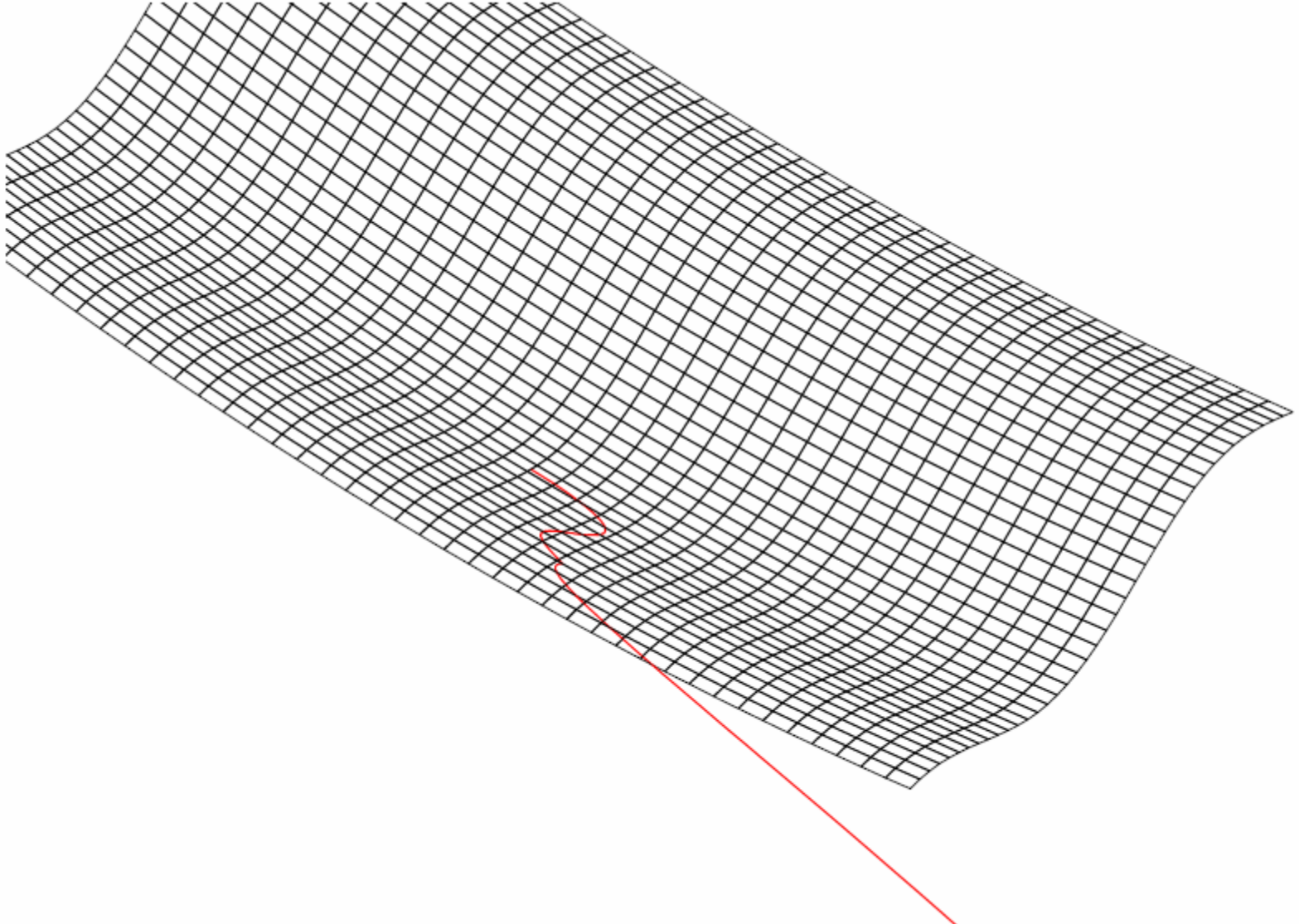
Estabilidade Angular

(Ponto de Equilíbrio Instável)



Estabilidade Angular

(Perturbação Severa)



Estabilidade de Tensão

(Aspectos Gerais)

- ◆ Associada à perda do controle das tensões
 - Queda ou aumento progressivo de tensões em barras específicas do sistema
- ◆ Causada pelo esgotamento das fontes de potência reativa e pelo comportamento da carga
- ◆ Colapso de tensão em grandes áreas conduz a blackouts

Estabilidade de Frequência

(Aspectos Gerais)

- ◆ Capacidade do sistema em manter a frequência nominal após uma grande perturbação
 - Desequilíbrio entre geração e carga
- ◆ Como resultado oscilações na frequência aparecem no sistema
 - Proteção de sub/sobre frequência atuam podendo levar o sistema a instabilidade
- ◆ Este tipo de situação está comumente associada as condições seguintes à separação do sistema em ilhas
 - Neste caso a questão é se cada ilha em separado ira atingir o estado de equilíbrio

Controle de SEE

(Sistemas de Controle Disponíveis)

◆ Controles no Gerador

- Regulador de Velocidade
- Regulador de Tensão
- Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP ou PSS)

◆ Controles na Rede

- Elementos chaveados (reatores e capacitores)
- Dispositivos FACTS
- Controle de linhas de CC (HVDC)

Gerador Síncrono

(Malhas de Controle)

◆ Controle Primário de Carga-Freqüência

- Controle do torque mecânico da turbina
- Equilíbrio geração e demanda
- Constantes envolvidas estão na ordem de segundos
- Variações na freqüência do sistema alteram a potência gerada

◆ Controle Secundário de Carga-Freqüência

- Controle Automático de Geração (CAG)
- Restabelece a freqüência aos valores nominais
- Mantêm os fluxos nas linhas de transmissão
- Constantes de tempo na ordem de minutos

Gerador Síncrono (Malhas de Controle)

◆ Controle de Excitação

- Mantém as tensões terminais do gerador igual aos valores programados
- Além disso, tem várias outras funções de controle e proteção
 - » Distribuição de potência reativa entre as unidades de uma mesma usina
 - » Amortecimento de oscilações
 - » Limites de subexcitação e sobreexcitação
 - » Limite Volts/Hz

Controle de SEE

(Malhas de Controle)

◆ Outros Controles

- Controle secundário de tensão
- Controle de equipamentos FACTS
- Controle de Emergência
- Controle de elos CC

Aplicações SPMS para Controle

(Introdução)

◆ SPMS um novo paradigma

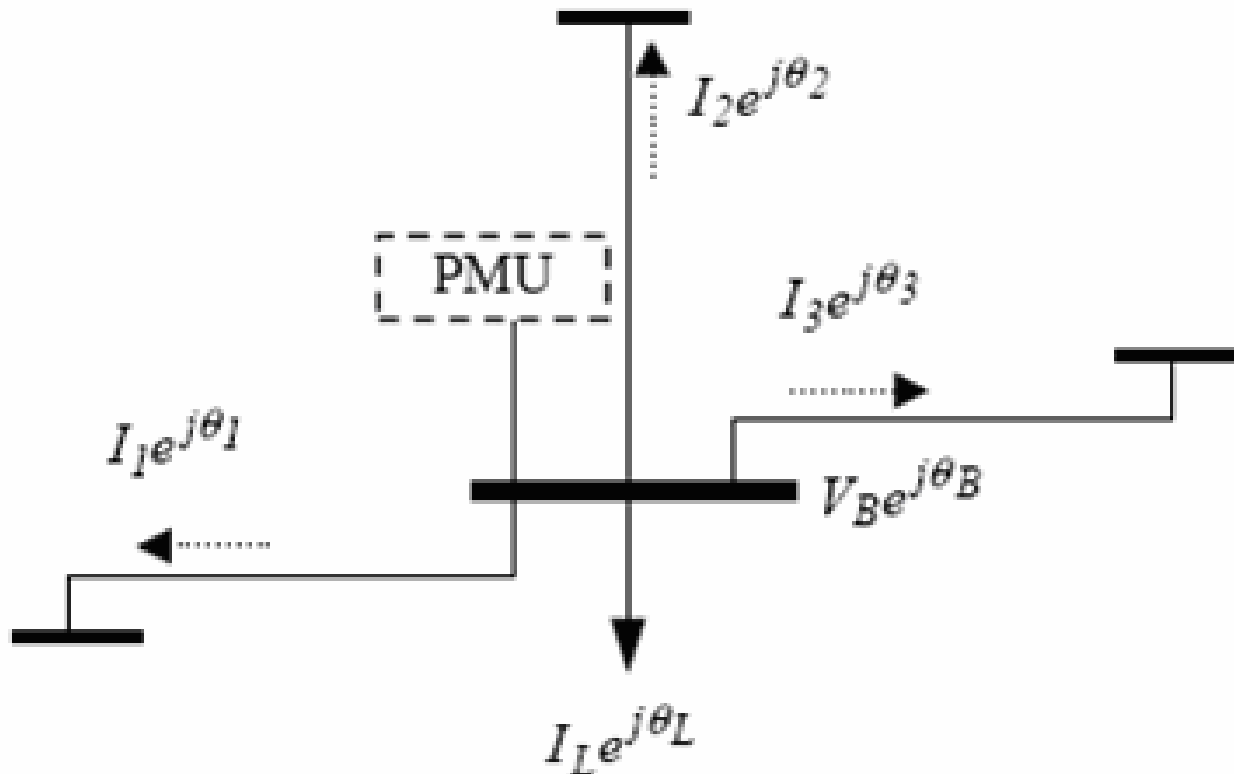
- Possibilidade de acesso a sinais sincronizados e distantes geograficamente
- Sinais com altas taxas de amostragem comparado com o SCADA
 - » Monitoração do desempenho dinâmico do sistema
- Sinais podem ser enviados para processamento em locais remotos
- A PMU disponibiliza sinais de magnitude e ângulo de tensões e correntes
- Outros sinais importantes podem ser calculados e estimados
 - » Potência elétrica ativa/reactiva e frequência

◆ As características dos SPMS favorecem a implantação de uma plataforma de controle

Aplicações de Controle

(Introdução)

◆ Capacidade de medição da PMU



Aplicações de Controle

(SPMS para Melhoria da Estabilidade)

◆ Monitoração

- Monitoração de oscilações
- Afundamento de tensão

◆ Novos esquemas de controle podem ser concebidos

- Esquemas de Controle de Emergência baseados na resposta dinâmica do sistema
- Wide-Area PSS

Aplicações de Controle

(Introdução)

◆ SPMS para a melhoria da estabilidade

- Estabilidade Angular
 - » Transitória
 - » Pequenos-Sinais
- Estabilidade de Tensão
- Estabilidade de Frequência

Aplicações de Controle



Melhoria da Estabilidade Angular Transitória

Aplicações de Controle

(Estabilidade Angular – Transitória)

- ◆ O problema do controle da estabilidade transitória pode ser dividido em duas partes
 - Avaliação da severidade da contingência
 - Escolha de ações de controle para estabilizar o sistema
- ◆ O controle pode ser de dois tipos
 - Preventivo
 - Emergência

Aplicações de Controle

(Estabilidade Angular – Transitória)

◆ Preventivo

- Objetivo deste controle é o de aumentar a robustez do sistema no sentido de suportar a ocorrência de contingências severas
- No centro de operação um conjunto de possíveis contingências é permanentemente avaliado por simulação
- Quando alguma das contingências torna-se crítica, ações de controle devem ser tomadas para aumentar a robustez do sistema
- O momento de atuação deste controle depende de decisão do operador em tempo real (tomar a ação agora ou postergá-la?)
- Ações de controle possíveis
 - » Redespacho de Geração
 - » Corte preventivo de carga

Aplicações de Controle

(Estabilidade Angular – Transitória)

◆ Controle de Emergência

- A ação de controle é realizada em tempo real

◆ Tipos de controle de Emergência

- malha aberta
- malha fechada

◆ Controle de Emergência em Malha Aberta

- A quantificação das ações de controle são projetadas a priori via simulações off-line
- Os tradicionais *Special Protection Schemes* (SPS) são incluídos nesta categoria

◆ Controle de Emergência em Malha Fechada

- A quantificação das ações de controle é realizada em tempo real

Aplicações de Controle

(Benefícios do Controle de Emergência)

◆ Aumento da segurança do sistema

- Esquemas atuais de controle são acionados após a detecção de eventos pré-definidos
- O sistema elétrico é de grande porte e complexo e eventos não previstos pela programação da operação podem ocorrer
- Como exemplo cita-se o blackout de 2003 na Itália onde a contingência ocorrida não estava prevista nos estudos de configuração do SPS

◆ Benefícios Econômicos

- Evita a utilização do controle preventivo (redespacho de potência com usinas mais caras)
- Evita limitações de transferência de potência entre subsistemas

Aplicações de Controle

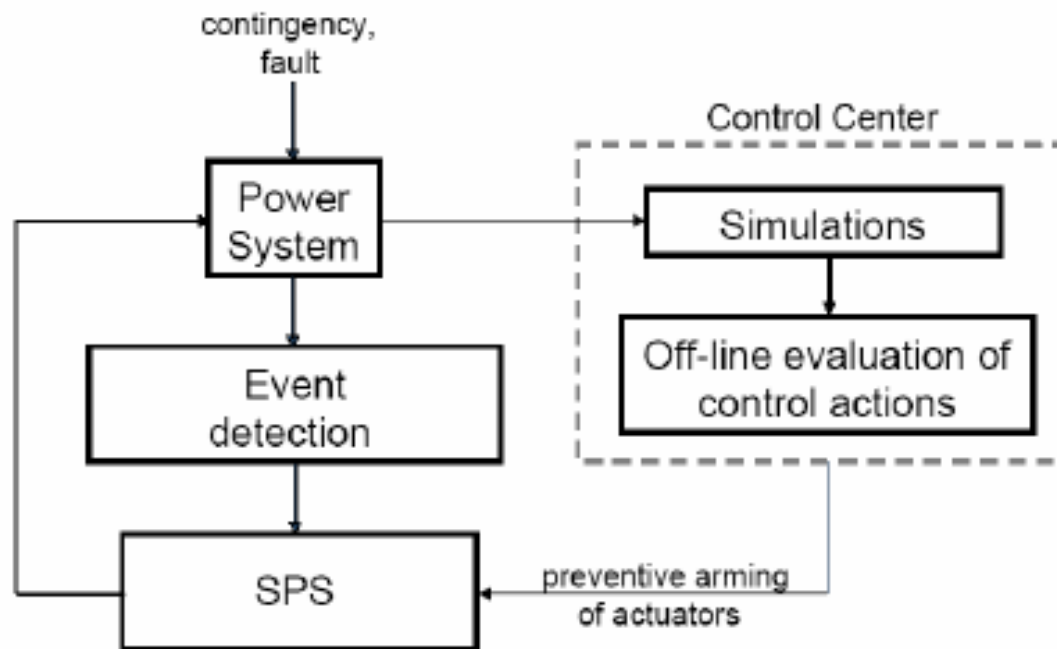
(Contribuições para o Controle de Emergência)

- ◆ Redes SPMS podem contribuir para o desenvolvimento do controle de emergência
- ◆ Evolução da arquitetura de controle de emergência
 - Orientada a eventos
 - Orientada a resposta do sistema
 - Wide-Area Control Architecture

Aplicações de Controle

(Evolução das Arquiteturas de Controle)

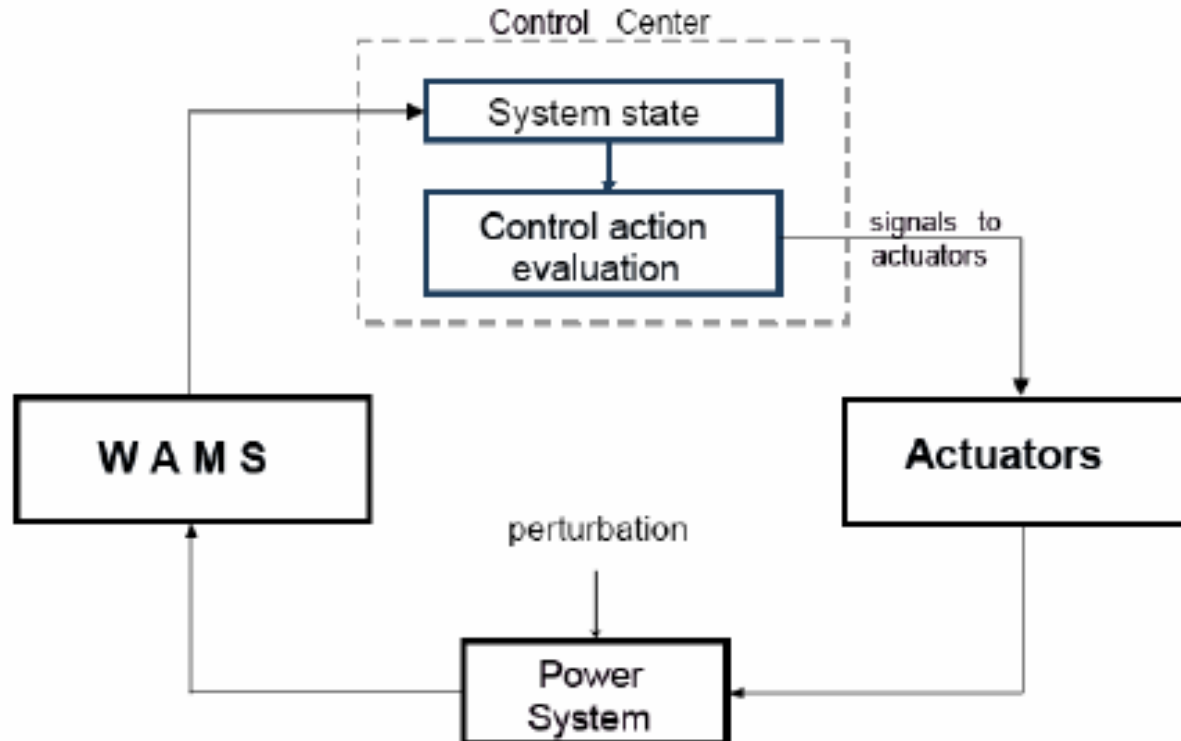
◆ Controle baseado em eventos



Aplicações de Controle

(Evolução das Arquiteturas de Controle)

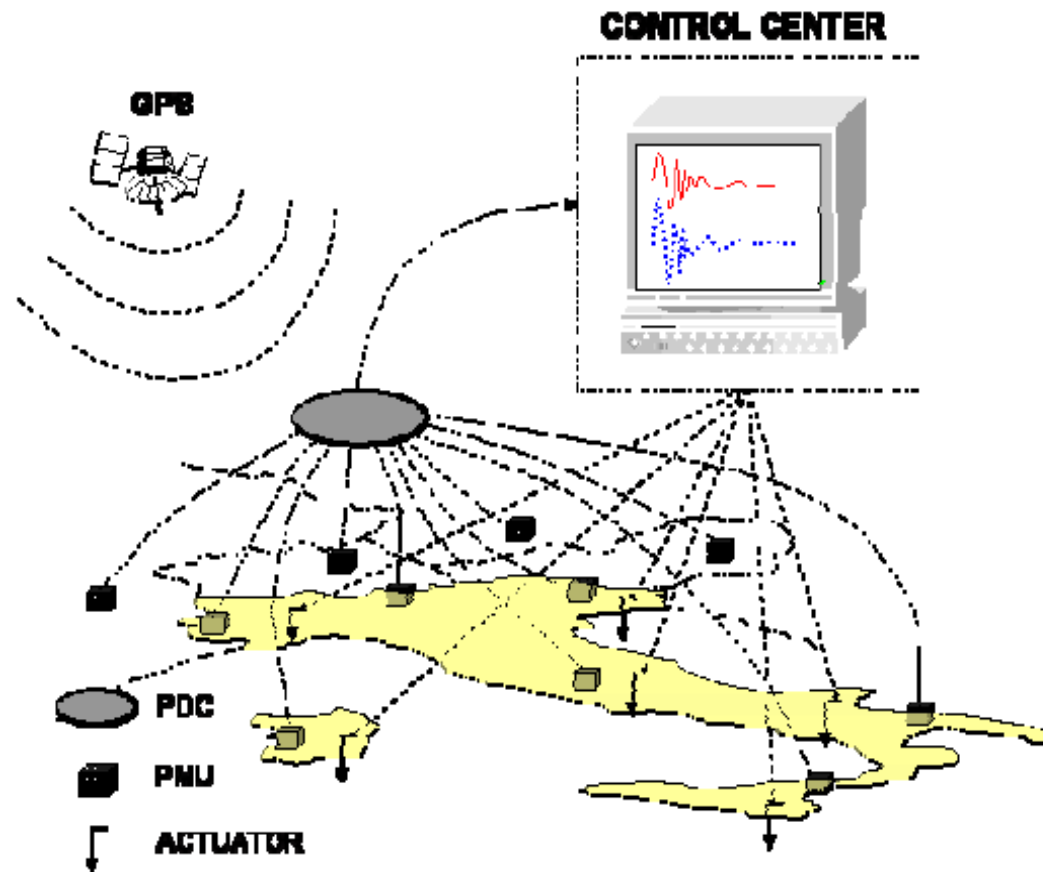
◆ Controle baseado na resposta do sistema



Aplicações de Controle

(Evolução das Arquiteturas de Controle)

♦ Wide-Area Control Architecture



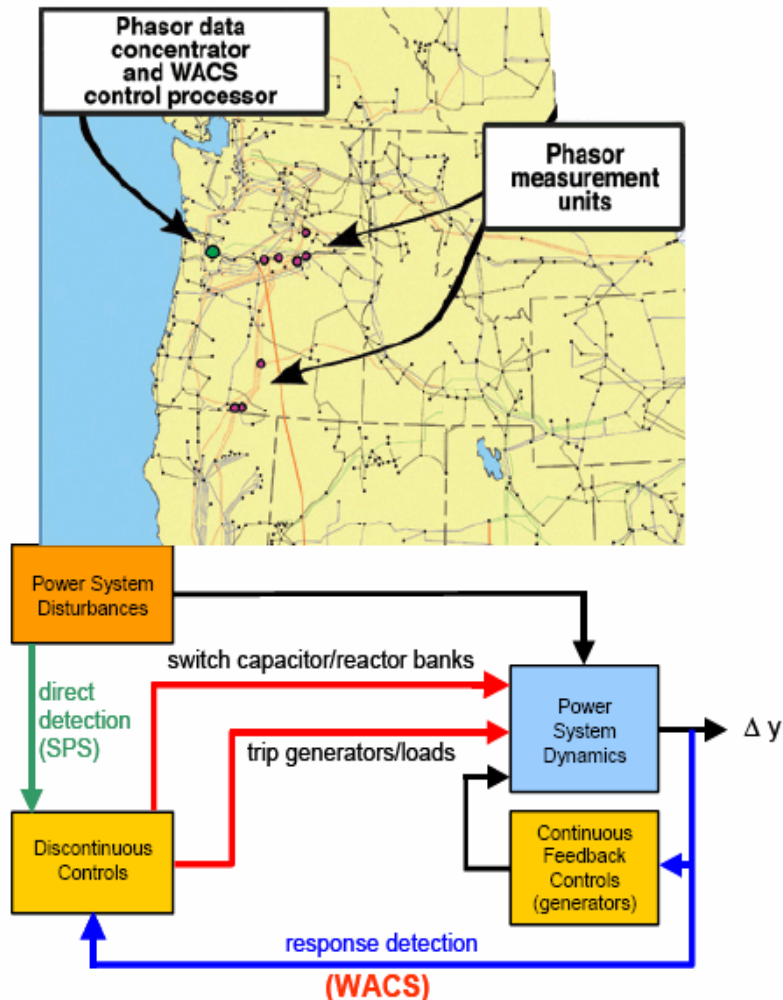
Aplicações de Controle

(Projeto WACS)

- ◆ Projeto WACS (Wide Area stability and voltage Control System) (C. W. Taylor et al 2005)
- ◆ Protótipo on-line operando no centro de operação da BPA
- ◆ Objetivo
 - Desenvolver uma plataforma de prevenção a blackouts
 - Aumentar a capacidade de transmissão entre diferentes mercados

Estabilidade Transitória

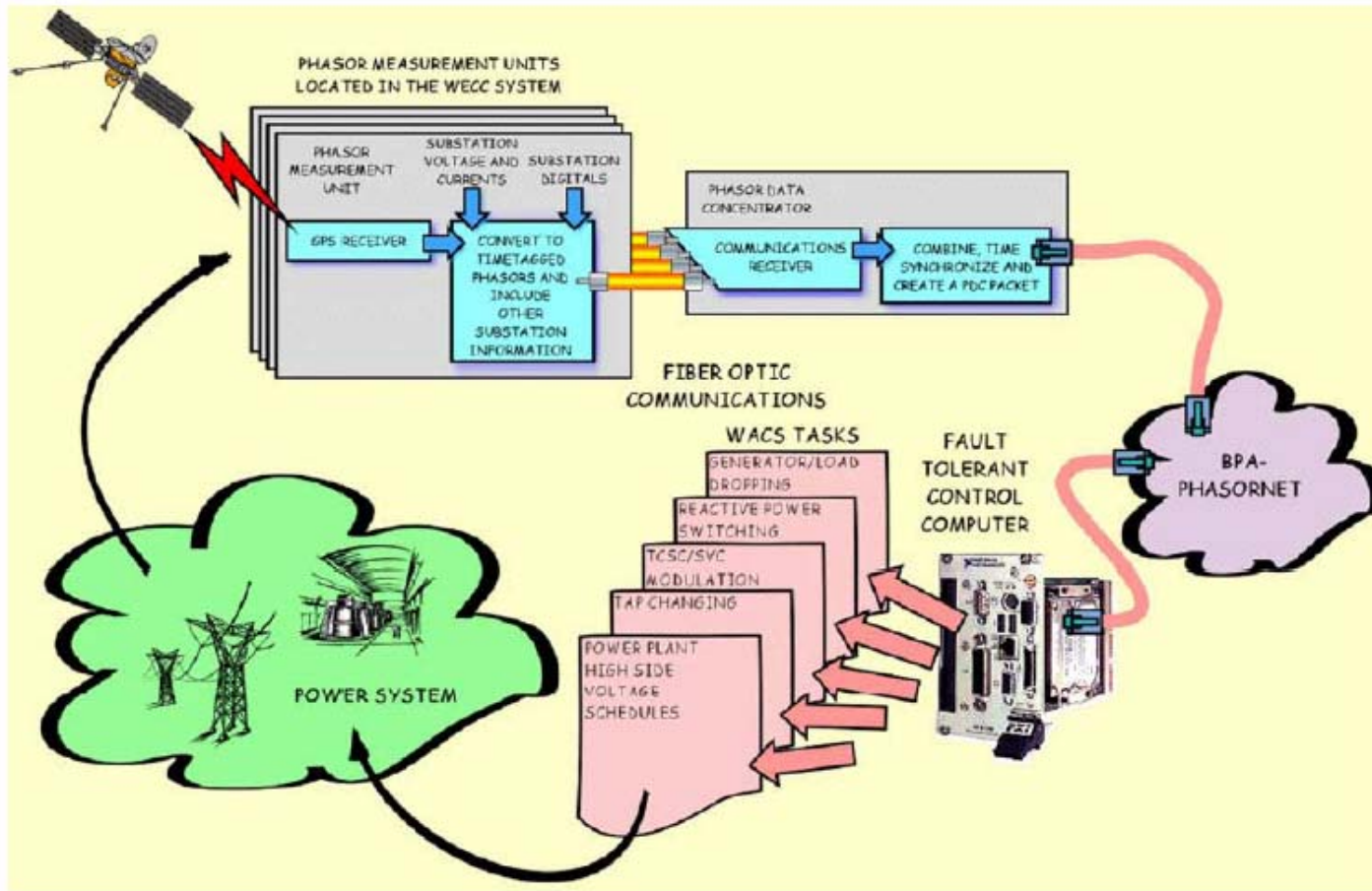
(Controle de Emergência – Malha Fechada)



◆ Protótipo demonstrativo

- Abordagem diferente dos atuais SPSs orientado a eventos
- O sistema WACS utiliza informações de sensores estrategicamente posicionados e atua de acordo com a resposta do sistema
- As ações de controle são baseadas nos SPS atuais (ações de controle discreto)
 - » Rejeição de carga/geração
 - » Compensação reativa (chaveamento de capacitores/reactores)

Aplicação de Controle (WACS)



Tempos de Atuação (WACS)

- ◆ O autor considera ainda 67ms para processamento do controle e atrasos não intencionais
- ◆ Com isso o atraso total desde a detecção a atuação é de 300ms (C. W. Taylor et al 2005)

Tempos Medidos - WACS	
Processo	Ciclos (60Hz)
Proc. PMU	3
Transmissão	2
Proc. PDC	2
Transmissão	1
Ação de Controle	5
Total	13 (217ms)

Aplicações de Controle

**Melhoria da
Estabilidade Angular
A Pequenas Perturbações**

Estab. Angular a Pequenos Sinais (Principais Desafios)

- ◆ Modos inter-área pouco amortecidos devido à
 - Maximização de intercâmbio entre áreas
 - Geração em áreas remotas
 - Eficiência energética entre submercados
 - Fluxo de potência em variadas configurações como resultado da desregulamentação

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Panorama Atual)

◆ Soluções Atuais

- Controle local
- Dispositivo mais utilizado é o PSS (baixo custo comparado com os demais)
- Outros dispositivos também utilizados: FACTS e HVDC

◆ Principais Limitações

- Elevado número de modos de oscilação comparado com os dispositivos de controle
- Amortecimento de modos associados a um gerador em particular

◆ Necessidade de maior desempenho e robustez dos controladores

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

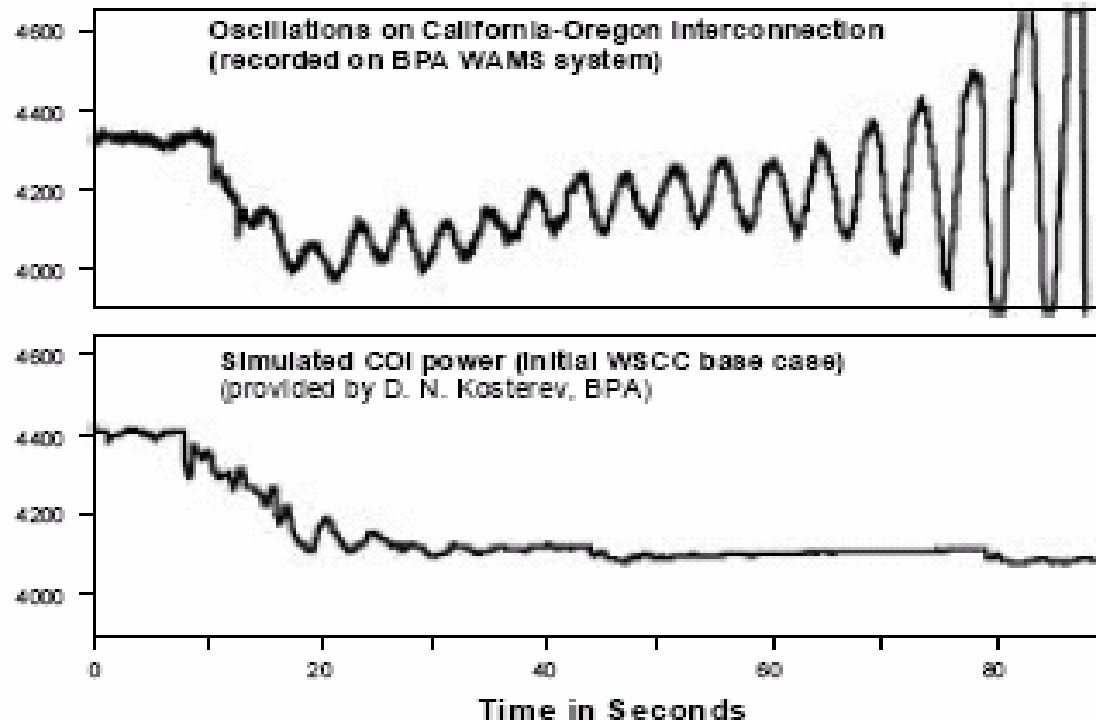
(Principais Aplicações de SPMS)

- ◆ Validação de Modelos
- ◆ Estimação do amortecimento e frequência de modos críticos em tempo real
- ◆ Ações de controle
 - Via operador em tempo real
 - Por meio de controladores

Aplicações de Controle

(Validação de Modelos)

- ◆ Modelos são essenciais para a determinação de amortecimento de modos
- ◆ Problemas com a calibração de modelos foram detectados (China, EUA)



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Estimação de Modos)

- ◆ Atualmente o cálculo da frequência e amortecimento de modos críticos são realizados off-line
- ◆ Principais limitações deste procedimento
 - Dependente de modelos corretamente calibrados
 - Topologia do sistema
 - Carregamento do sistema
- ◆ Com dados provenientes de SPMS modos críticos de oscilação podem ser determinados em tempo real

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Estimação de Modos)

◆ Estimação de modos em tempo real

- Fornece informações independentemente dos modelos e do conhecimento prévio do estado do sistema
- Permite uma operação menos conservadora do sistema
- Alarmes podem ser disparados alertando os operadores

◆ Métodos mais utilizados

- DFT
- Prony
- Identificação de Modelos tipo: ARMA, ARMAX

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Estimação de Modos)

◆ Sistema de monitoração de modos operando na indústria

- Em operação desde 1997 no Reino Unido
- Permitiu o aumento da capacidade de transferência de potência entre submercados (Inglaterra-Escócia) em 300 MW
- As ações de controle são efetuadas pelo operador do sistema
- Sistema foi também instalado na rede Australiana

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais (Estimação de Modos)

♦ Australia

- Detecção de modo e melhoria de amortecimento em tempo real
- Ações de controle realizadas pelo operador



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Controle em Malha Fechada)

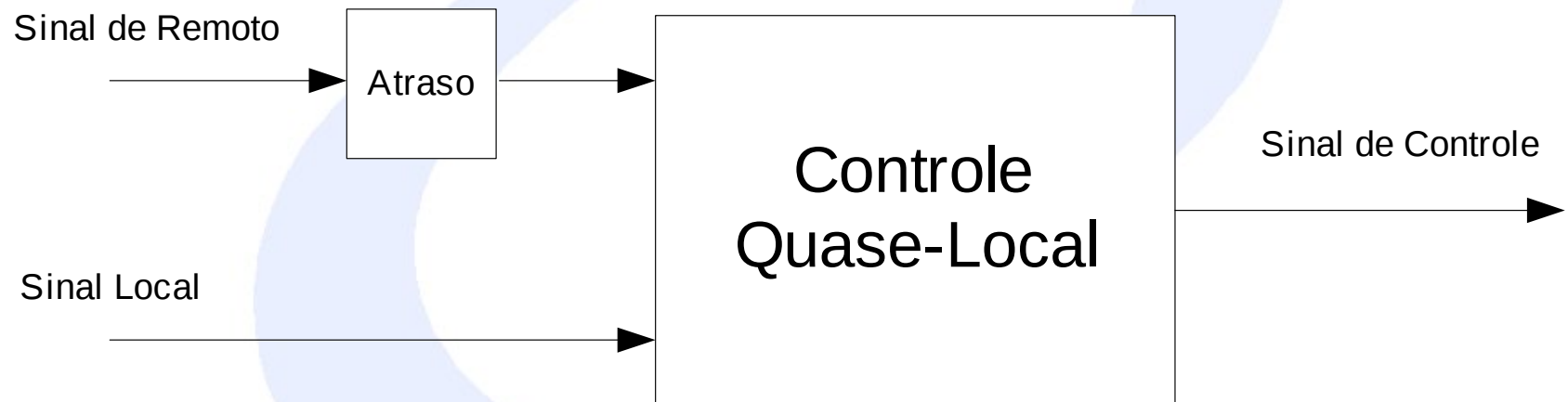
◆ Melhoria da Estabilidade Angular a Pequenas Perturbações

- Três diferentes configurações de Wide-Area PSS podem ser utilizadas
 - » Quase-Descentralizado
 - » Controle Central
 - » Controle Hierárquico

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Novos Esquemas de Controle)

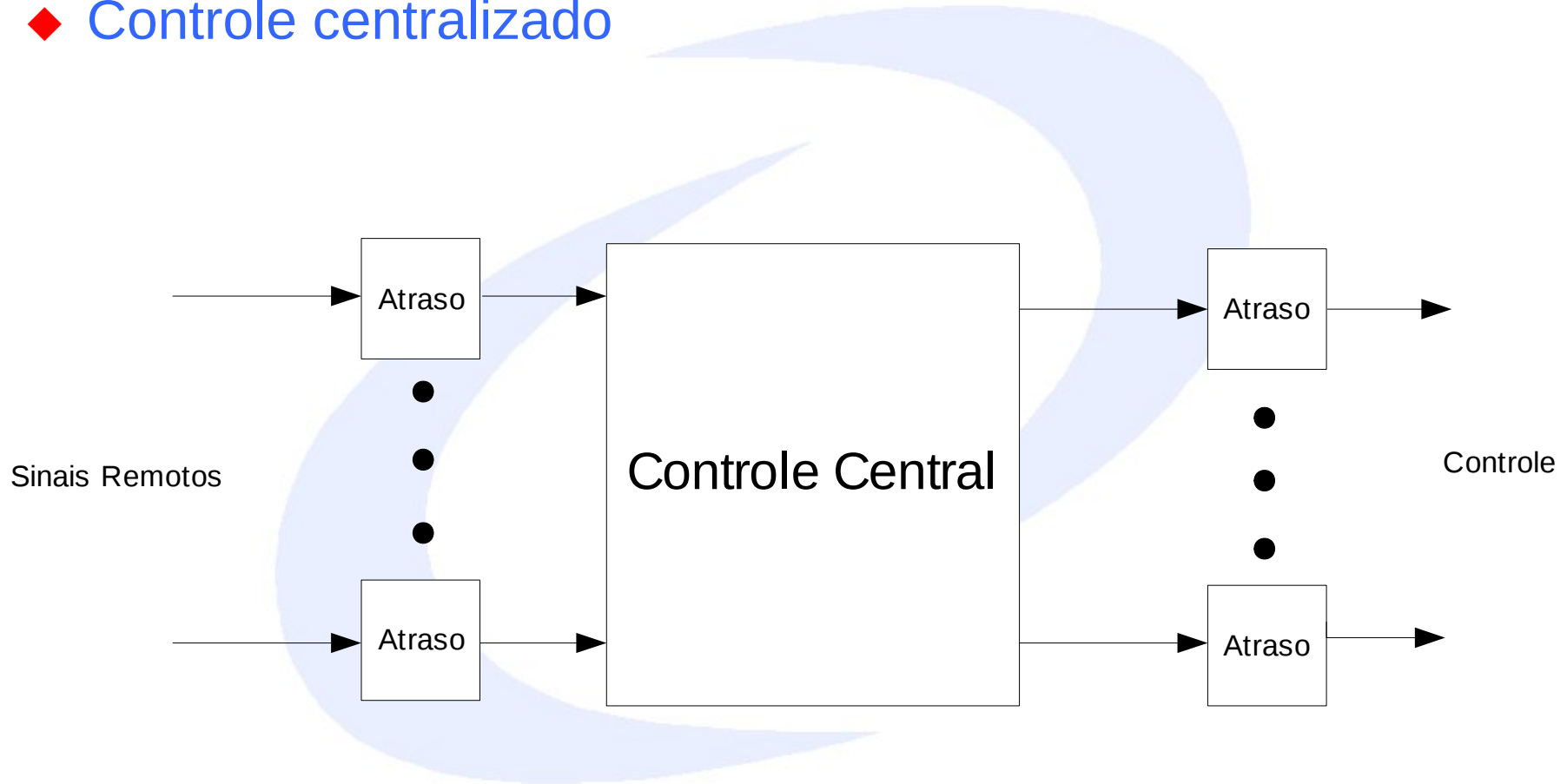
◆ Controle quase-descentralizado (realimentação remota)



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Novos Esquemas de Controle)

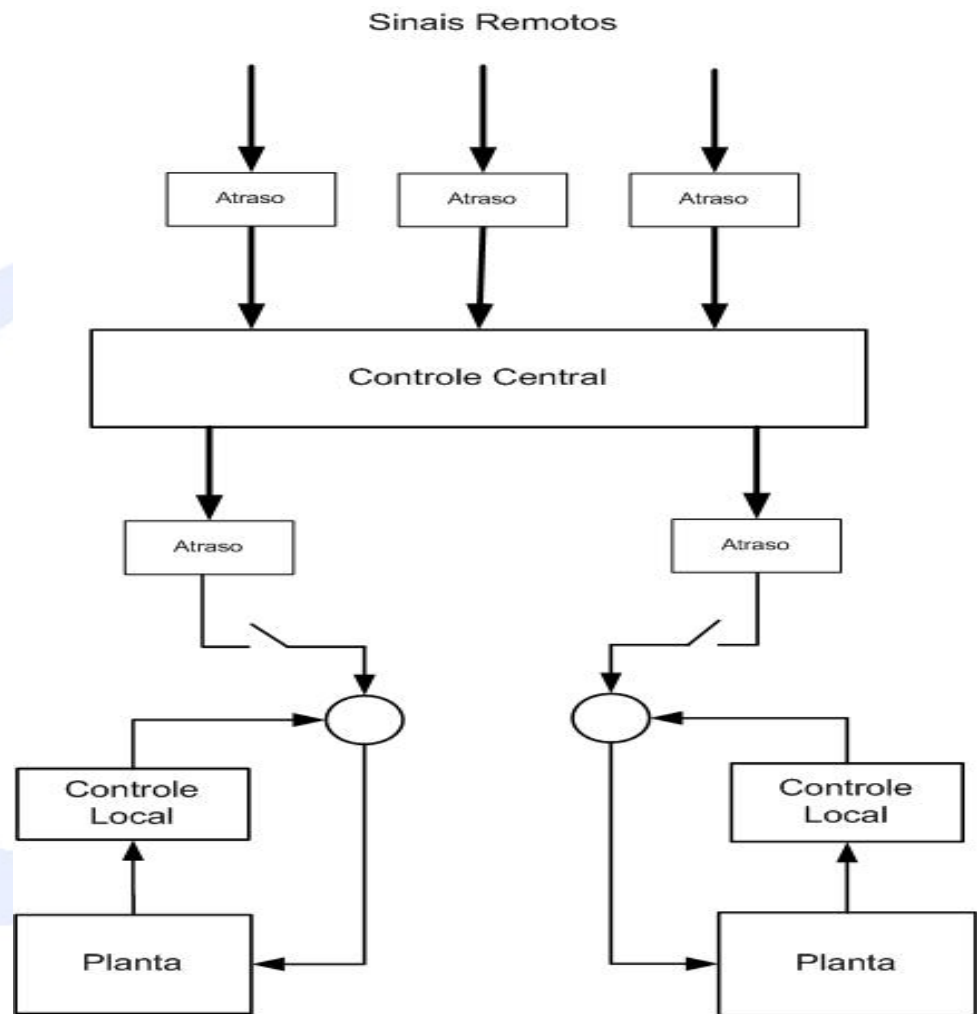
◆ Controle centralizado



Estabilidade Angular a PS

(Novos Esquemas de Controle)

◆ Controle Hierárquico



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Melhoria da Estabilidade)

◆ Melhoria da Estabilidade usando controle Hierárquico

- Trabalho publicado no IEEE General Meeting 2007 - D. Dotta, A. S. Silva and I. C. Decker “***Power System Small-Signal Angular Stability Enhancement using Synchronized Phasor Measurement***”
- Controle Hierárquico é composto
 - » Controle Local
 - » Controle Central

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Melhoria da Estabilidade)

◆ Controle Local

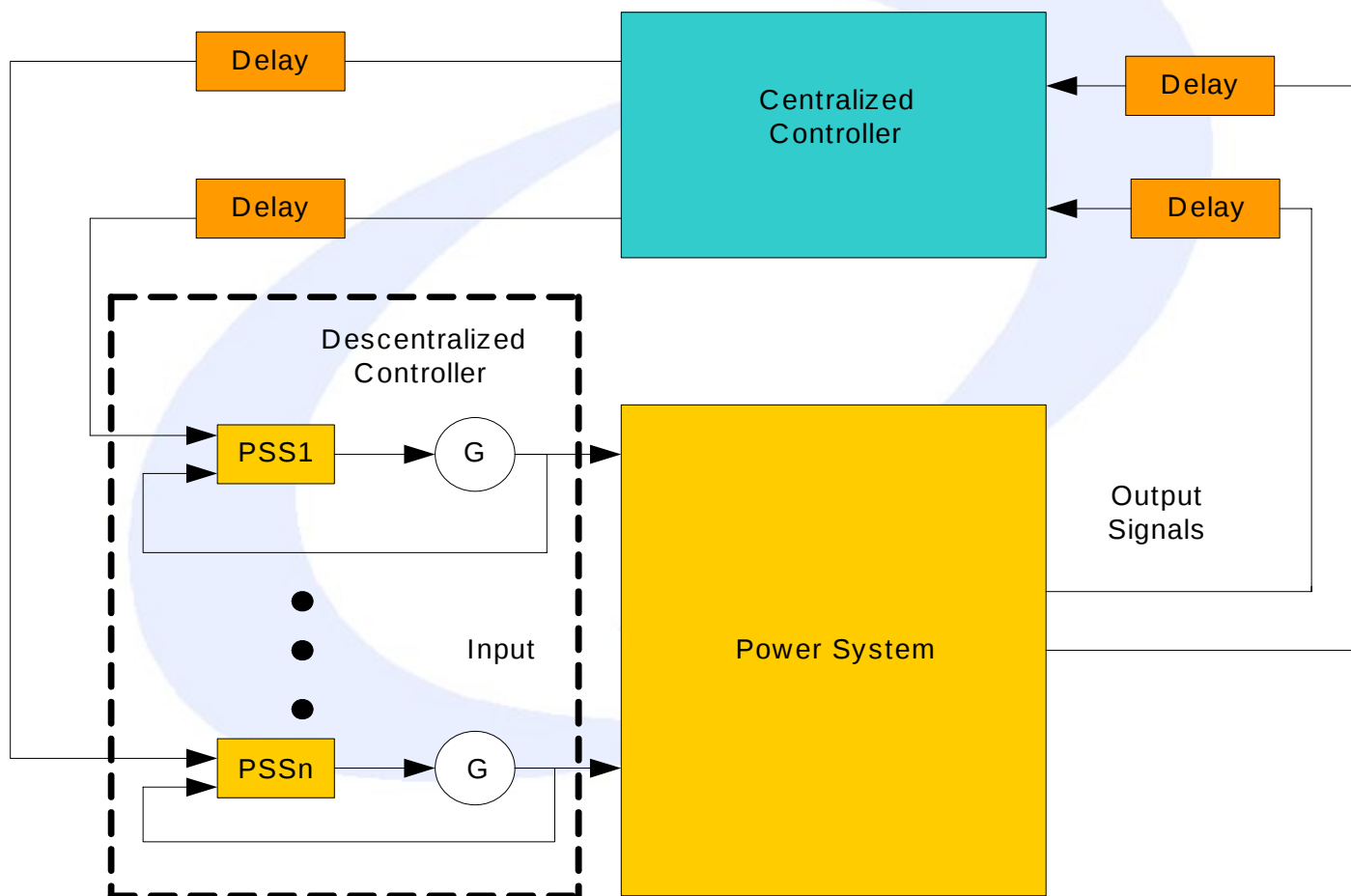
- PSS locais nos geradores
- Garantem um desempenho mínimo para o sistema em caso de problemas com o controle central
- Segurança com relação a estabilidade do sistema

◆ Controle Central

- Maximiza o amortecimento dos modos
- Projetado usando controle ótimo com restrições estruturais

Estabilidade Angular a Pequenos Sinais (Melhoria da Estabilidade)

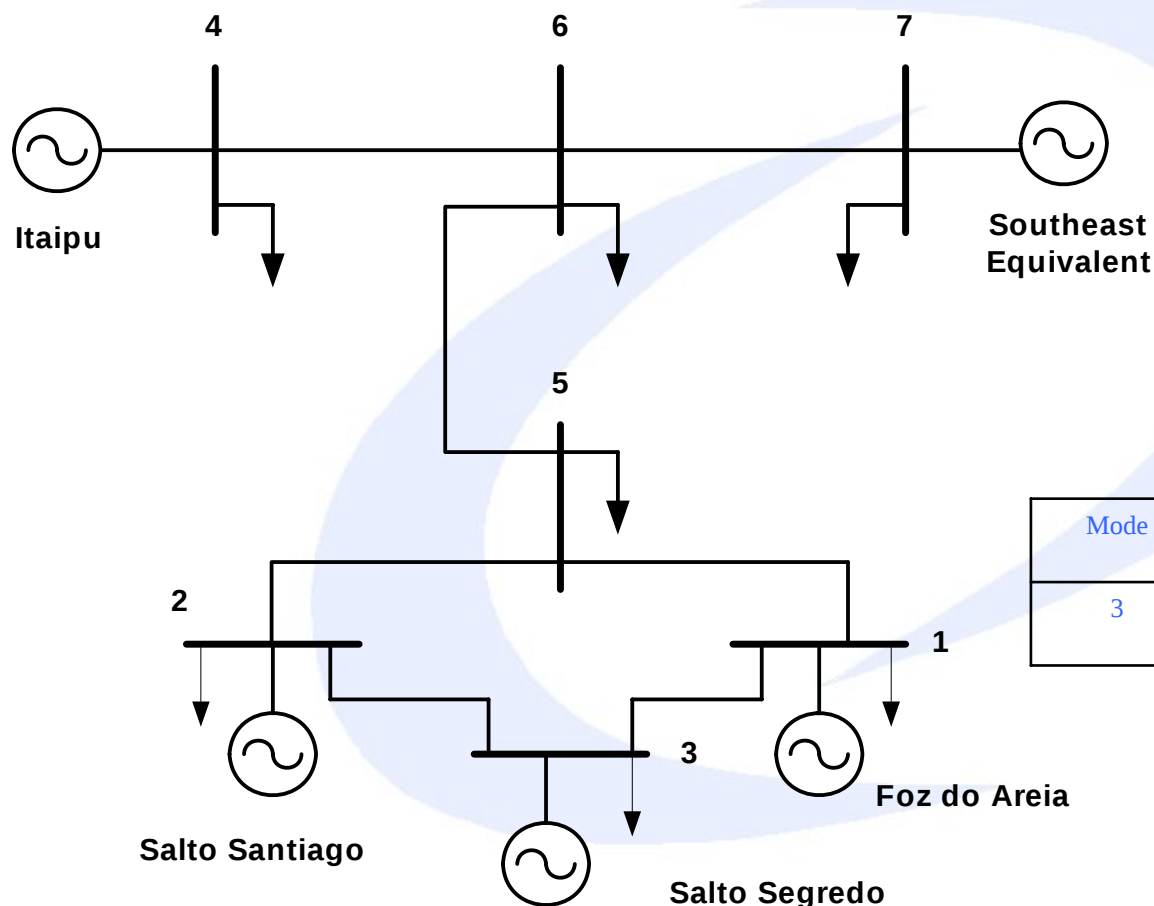
◆ Esquema considerado



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Melhoria da Estabilidade)

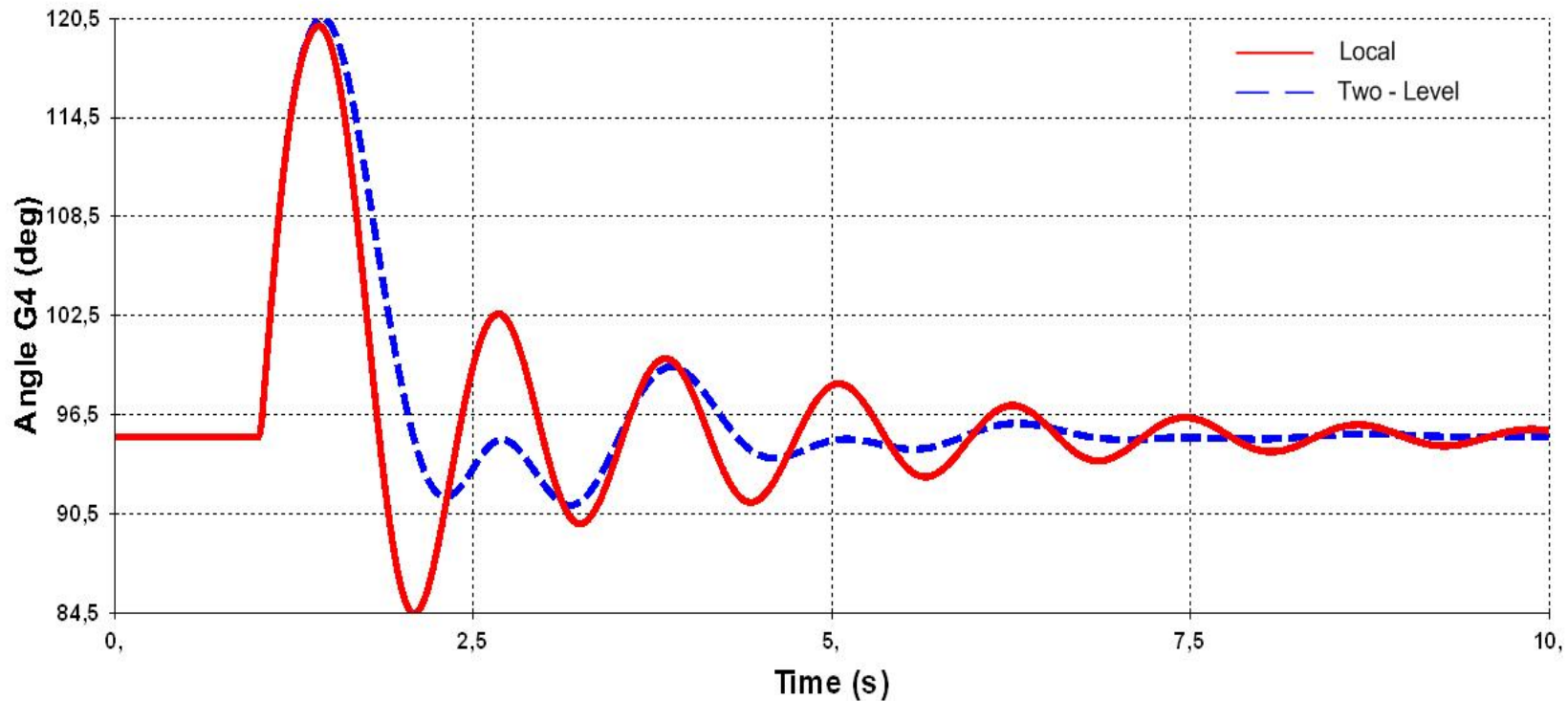
◆ Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro



Mode	Eigenvalue	Frequency (Hz)	Damping (%)
3	-0.33 ± 5.20	0.82	6.39

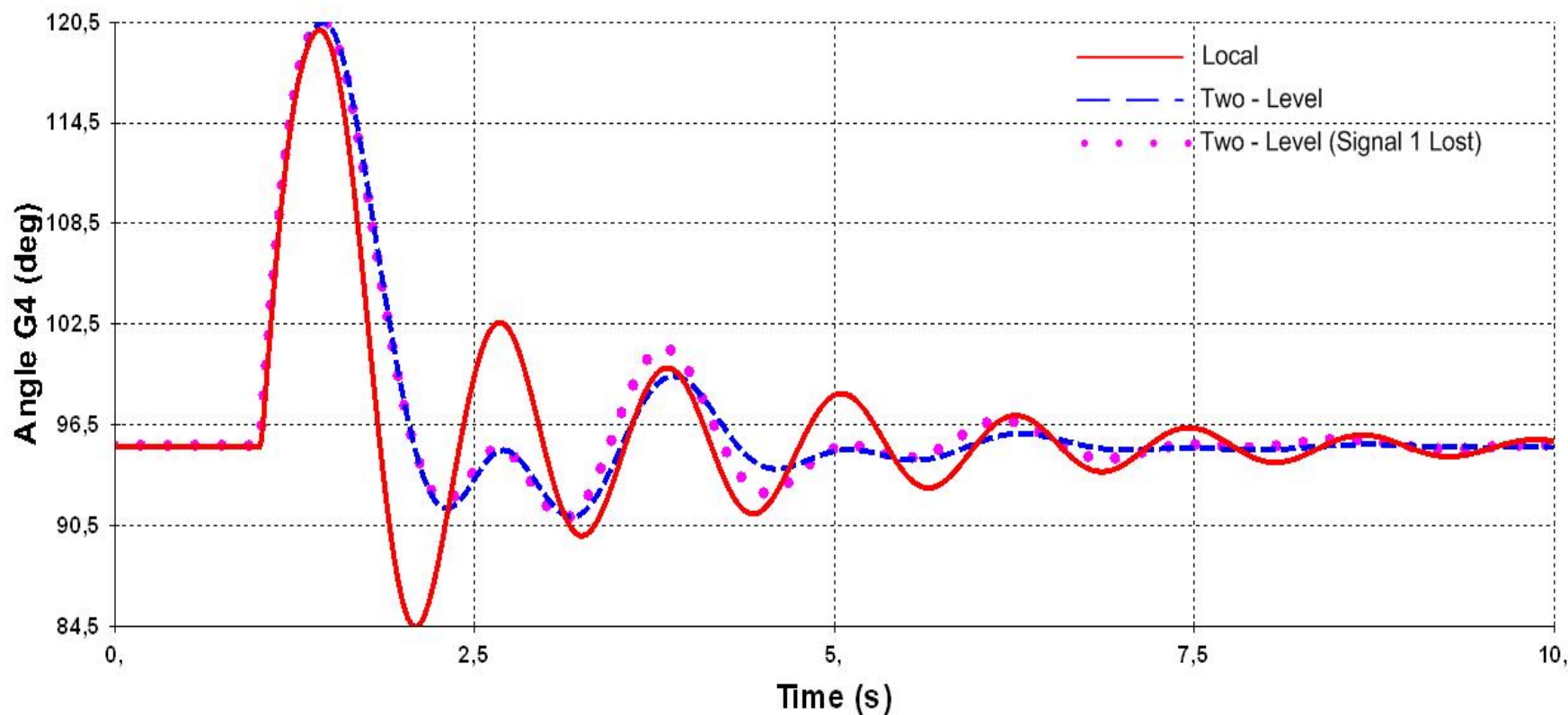
Estabilidade Angular a Pequenos Sinais (Melhoria da Estabilidade)

◆ Configuração Completa



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais (Melhoria da Estabilidade)

◆ Perda do sinal Barra 1



Estabilidade Angular a Pequenos Sinais

(Principais Desafios de Implementação)

- ◆ A consideração de atrasos no momento do projeto
- ◆ Projeto robusto para suportar mudanças na configuração do sistema (ponto de operação) e perda de canais de comunicação
- ◆ Aumento na complexidade do sistema de controle
 - Wide-Area PSSs introduzem novas interdependências entre os controles e precisam ser melhor estudadas

Aplicações de Controle

Melhoria da Estabilidade de Tensão

Melhoria da Estabilidade de Tensão

(Aplicações usando SPMS)

- ◆ Aplicações SPSM para estabilidade de tensão
 - Avaliação da estabilidade de tensão em corredores de transmissão
 - Avaliação da estabilidade de tensão para redes malhadas
- ◆ Métodos para detecção de instabilidades são aplicados
- ◆ A partir da detecção e avaliação da instabilidade ações de controle precisam ser tomadas
 - Corte de Carga
 - Chaveamento de capacitores

Melhoria da Estabilidade de Tensão

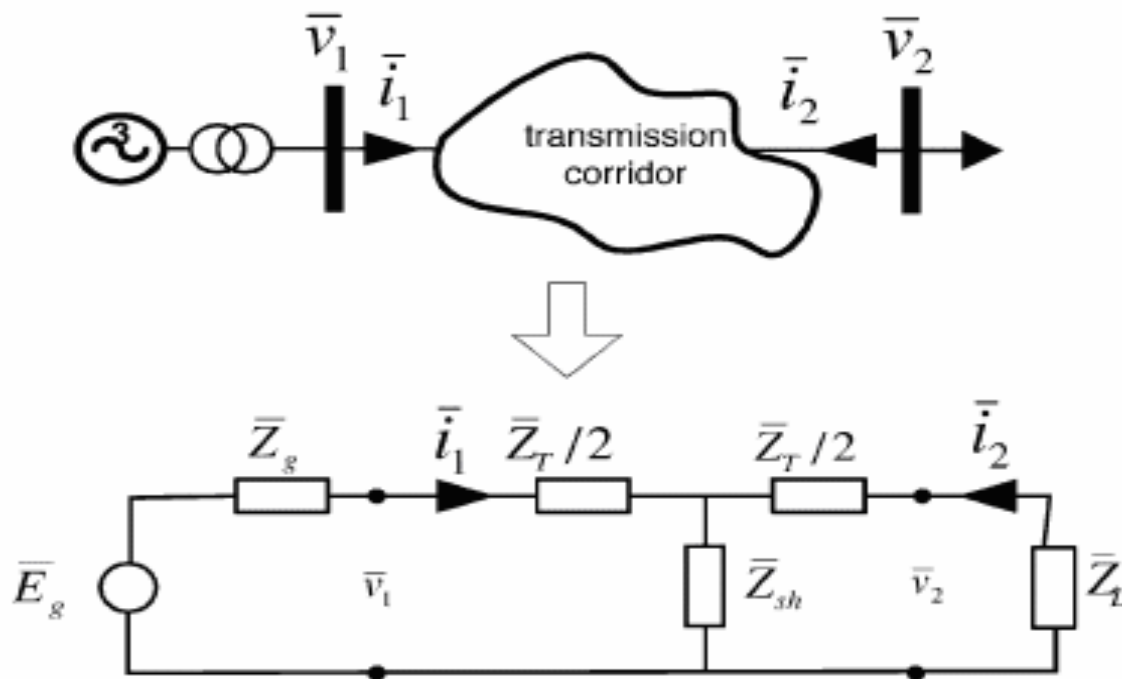
(Aplicações usando SPMS)

- ◆ O objetivo desta aplicação é o de monitorar e garantir a transferência de potência entre subsistemas
 - Corredores de transmissão
- ◆ Sistemas atuais são baseados em réles de subtensão usando somente medidas locais
- ◆ Sistema de controle pode ser melhorado utilizando medição fasorial das duas extremidades da linha de transmissão

Melhoria da Estabilidade de Tensão

(Controle de Carregamento em Grandes Linhas)

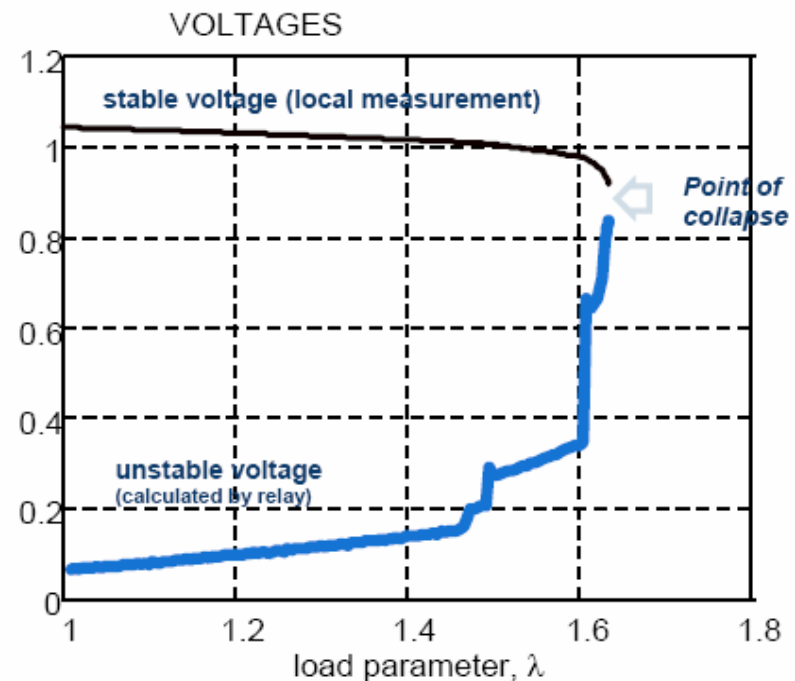
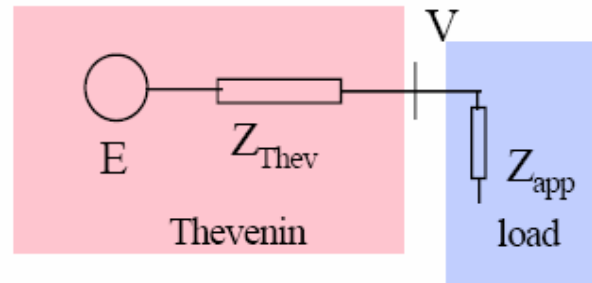
◆ Sistema de predição da estabilidade de tensão



Melhoria da Estabilidade de Tensão

(Preditor de Instabilidade de Tensão)

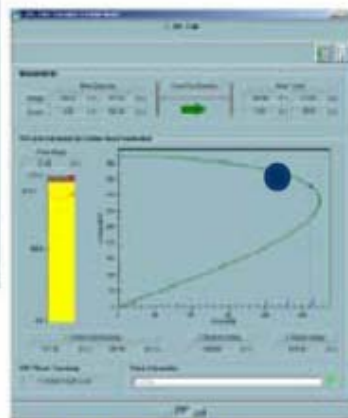
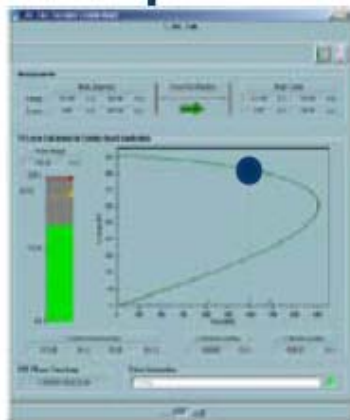
- ◆ Com medidas das duas extremidades da linha o equivalente Thevenin da rede pode ser estimado em tempo real
- ◆ Quando $Z_{\text{thév}} = Z_{\text{app}}$ têm-se o ponto de colapso do sistema (M. Zima et al 2005)



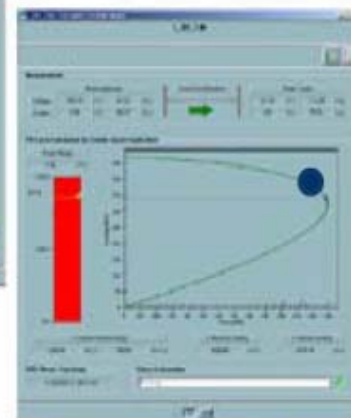
Melhoria da Estabilidade de Tensão

(Preditor de Instabilidade de Tensão)

- ◆ Com a aproximação do ponto de colapso alarmes podem ser disparados
- ◆ Ações preventivas podem ser realizadas



Early warning



Emergency alarm

Melhoria da Estabilidade de Tensão

(Melhoria da Estabilidade em redes malhadas)

- ◆ No caso onde o sistema não pode ser modelado como um corredor de transmissão outros métodos se fazem necessários para evitar problemas relacionados a estabilidade de tensão
- ◆ Realiza-se previamente a seleção das barras críticas
 - barras que apresentam problemas de estabilidade de tensão
- ◆ Executa-se uma aplicação de fluxo de potencia ótimo (FPO) em intervalos regulares
 - O objetivo é o de obter o máximo carregamento
- ◆ Comparando-se o carregamento atual do sistema com o obtido com o FPO estimam-se margens de estabilidade para o sistema
 - Com a aproximação do limite de estabilidade ações de controle podem ser acionadas (Ex. Corte de Carga, Chaveamento de Capacitores)

Aplicações de Controle

Melhoria da Estabilidade de Frequência

Melhoria da Estabilidade de Freqüência

(Estabilidade de Freqüência após Distúrbios Severos)

- ◆ A perda de um grande gerador ou de uma linha de transmissão importante afeta diretamente a freqüência do sistema
- ◆ A queda de freqüência deve ser controlada antes de atingir patamares de 57-58 Hz em sistemas de 60 Hz (ou 47-48 Hz em 50 Hz)
- ◆ Caso contrário, relés de sub-freqüência começam a atuar podendo levar o sistema ao colapso

Melhoria da Estabilidade de Frequência

(Estabilidade de Frequência após Distúrbios Severos)

- ◆ Os métodos de controle atuais para este tipo de instabilidade são baseados em estudos off-line
 - Baseados em estudo off-line patamares de corte de carga são definidos
 - Corte de carga é realizado em degraus de 5-20%
 - Sistema baseado em réles que trabalham com medidas locais (não há uma visão sistêmica da rede)
- ◆ Com os SPMS consegue-se uma visão sistêmica e em tempo real da rede
 - melhores esquemas de controle podem ser implementados

Melhoria da Estabilidade de Freqüência

(Estabilidade de Freqüência após Distúrbios Severos)

- ◆ Após uma grande perturbação a variação de potência pode ser calculada a partir do desvio inicial de freqüência do sistema e da inércia total do sistema

$$\Delta P = 2H_{system} \frac{d\omega}{dt}$$

- ◆ O valor calculado pode ser usado para estimar a quantidade de potência a ser cortada no sistema

Melhoria da Estabilidade de Freqüência

(Estabilidade de Freqüência após Distúrbios Severos)

◆ Ações de controle em tempo real podem ser realizadas a partir deste método

- Corte de Carga
- “Trip” de Geração

Melhoria da Estabilidade

(Comentários Finais)

- ◆ Os SPMS podem contribuir para melhorar o desempenho dinâmico do sistema
- ◆ O potencial da aplicação desta tecnologia para a melhoria da estabilidade é elevado
- ◆ Novos desenvolvimento e testes de campo precisam ser realizados até que a aplicação destas técnicas possam chegar à escala industrial

Obrigado!

◆ Aguinaldo S. e Silva

- Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LabPlan
- Departamento de Engenharia Elétrica – EEL
- Centro Tecnológico – CTC
- Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
- E-mail: aguinald@labspot.ufsc.br

Referências

1. C. W. Taylor, D. C. Erickson, K. E. Martin, R. E. Wilson, V. Venkatasubramanian, “WACS – Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration”, In: Proceedings of the IEEE, Vol. 93, n. 5, May 2005
2. D. Dotta, A. S. e Silva, I. C. Decker, “Power System Small-Signal Angular Stability Enhancement using Synchronized Phasor Measurements” (*IEEE PES General Meeting 2007*).
3. M. Zima, et. al, “Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems”, In.: Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N. 5, Maio, 2005

Tempos de Transmissão

table 1. Communication delays between the six PMUs and the central station in Jiangsu Provincial WAMS.

PMU Plants/ Substations	Status of Network	Max. Delay (ms)	Min. Delay (ms)	Avg. Delay (ms)	Std. Deviation (ms)
Xu Tang	Congested	49	23	39	29
Huai Yin	Congested	21	8	13	10
Nan Tong	Congested	22	9	13	9
Peng Cheng	Congested	27	11	14	6
Xin Hai	Congested	39	17	20	8
Yang Zhou 2nd	Congested	81	7	14	62
Yang Zhou 2nd	Idle	20	8	13	12

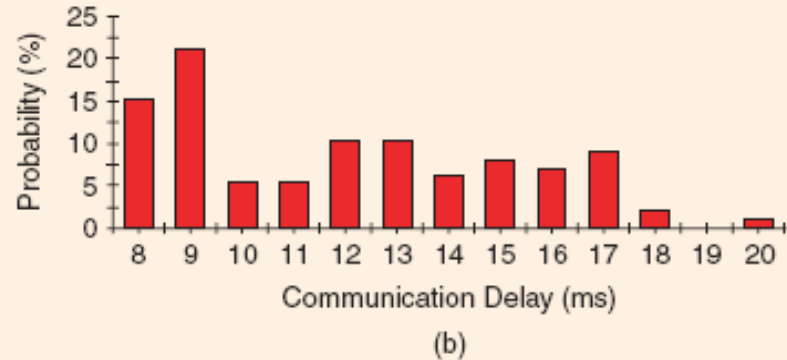
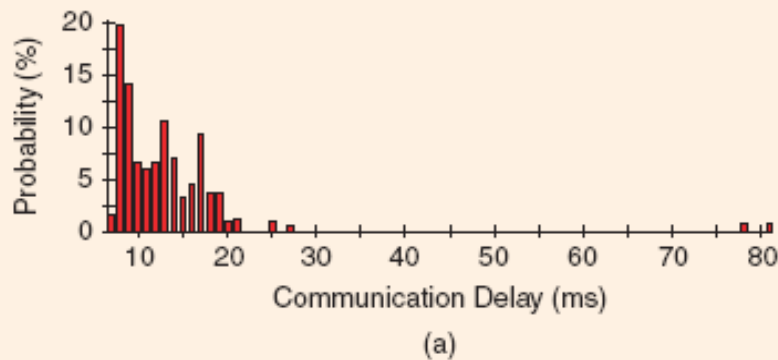


figure 4. Communication delays between the PMU at Yang Zhou second power plant and the central station: (a) the network is congested and (b) the network is idle.

Tempos de Transmissão

DELAY CALCULATIONS ASSOCIATED WITH VARIOUS COMMUNICATION
LINKS

Communication link	Associated delay- one way (milliseconds)
Fiber-optic cables	$\approx 100-150$
Digital microwave links	$\approx 100-150$
Power line (PLC)	$\approx 150-350$
Telephone lines	$\approx 200-300$
Satellite link	$\approx 500-700$