


Curso Sobre Medição Fasorial Teoria e Prática

Promoção: **CIGRÉ – Brasil** 
Comitê de Estudos B5 – Proteção e Automação

Apoio:

REASON


Eletrosul

ONS Operador Nacional
do Sistema Elétrico


UFSC


LabPlan

Florianópolis, 8-9/11/2007

Curso Sobre Medição Fasorial

Teoria e Prática

◆ Objetivos

- Apresentar o estado da arte na área explorando todos os temas relacionados desde o princípio da tecnologia, sistemas de comunicação envolvidos, armazenamento de dados e aplicações atuais e futuras, bem como ilustrar aplicações práticas com a apresentação do projeto-piloto já em operação.

Equipe de Instrutores

- ◆ Ildemar C. Decker, D.Sc
Professor (LabPlan/UFSC)
- ◆ Sérgio L Zimath
Eng. Especialista (Reason)
- ◆ Marcelo N. Agostini, D. Eng.
Pesquisador (LabPlan/UFSC)
- ◆ Breno Meyer
Eng. Especialista (Eletrosul)
- ◆ Daniel Dotta, M. Eng.
Pesquisador (LabPlan/UFSC)
- ◆ Rui Moraes
Eng. Especialista (ONS)
- ◆ Aguinaldo S. e Silva, Ph.D
Professor (Labspot/UFSC)
- ◆ Héctor Voskis
Eng. Especialista (ONS)

Escopo Geral do Curso

- ❑ Tecnologia e Aplicações de Medição Fasorial Sincronizada
- ❑ Teoria de Sincrofasores
- ❑ Padronização
- ❑ Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS)
- ❑ Aplicações de SPMS
- ❑ A Tecnologia de SPMS no Brasil
- ❑ Experiência Prática no Brasil
- ❑ Painel de Discussões

Curso sobre Medição Fasorial

Teoria e Prática

Tecnologia e Aplicações de Medição Fasorial
Sincronizada

Prof. I. C. Decker – LabPlan / UFSC

08-09/11/2007

Tópicos

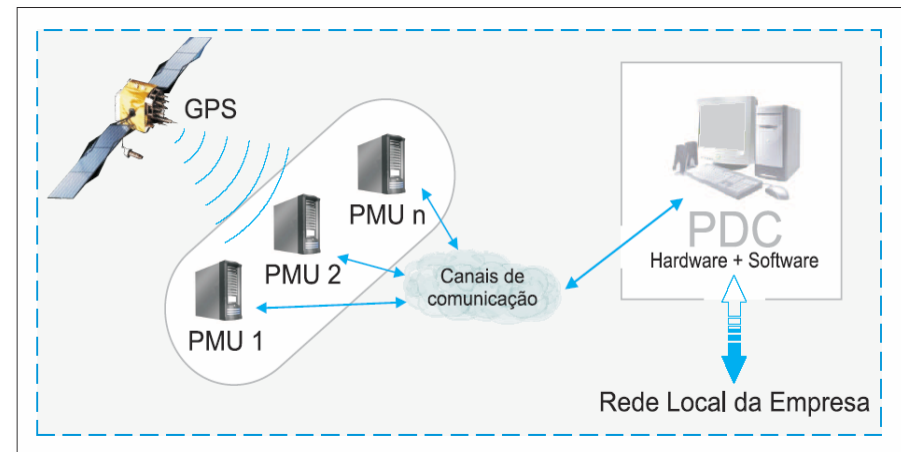
- ❑ A Medição Sincronizada de Fasores
- ❑ Histórico e Estado da Arte
- ❑ Desenvolvimentos e Aplicações no Brasil
- ❑ Comentários Finais

Medição Fasorial Sincronizada em SEE (Motivações)

- ◆ Demanda crescente pelo aprimoramento dos instrumentos de monitoração e controle em tempo real dos SEE
 - Introdução da competição nos mercados de EE
 - Restrições à expansão dos SEE
 - Requisitos crescentes de QEE
 - Redução do risco de blecautes
- ◆ Evolução tecnológica em diversas áreas
 - Sistemas de telecomunicações
 - Informática
 - Processamento de sinais
 - Automação
- ◆ Ação de organismos reguladores
 - Estabelecimento de responsabilidades e parâmetros de qualidade e desempenho

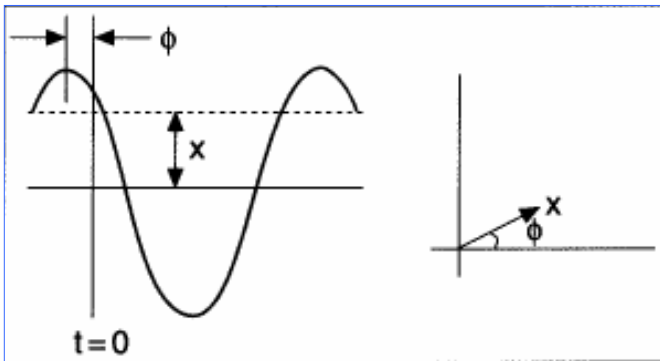
Medição Fasorial Sincronizada em SEE (O que é?)

- ◆ Medição simultânea de grandezas elétricas em instalações distantes geograficamente usando PMU (*Phasor Measurement Units*).
- ◆ Medições sincronizadas no tempo via sinal de satélite (GPS).
- ◆ Aquisição e tratamento de dados em sítio remoto (PDC).
- ◆ Taxa de atualização (varredura) >> SCADA.
- ◆ Permite a monitoração e o controle da dinâmica dos SEE.
- ◆ Novo paradigma para a operação.



Definição de Fasor

- ◆ O fasor é um número complexo associado a um sinal senoidal em regime permanente.
- ◆ O módulo do fasor é igual ao valor eficaz do sinal e o ângulo de fase é a fase do sinal para $t=0$.

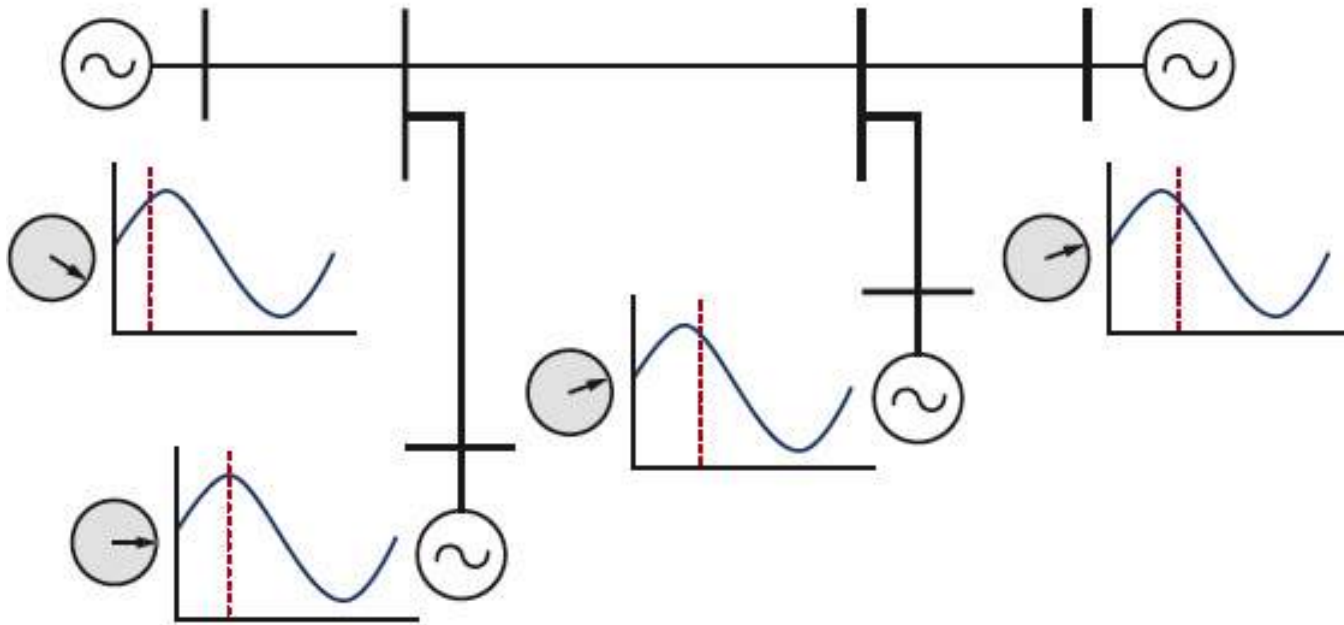


$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = X_{\max} \cos(\omega_0 t + \phi) \\ \text{onde } X = \frac{X_{\max}}{\sqrt{2}} \end{array} \right\} \Leftrightarrow X \angle \phi$$

- ◆ Realizado, em geral, a partir do cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT - **Discrete Fourier Transform**), após a conversão A/D (analógico/digital), das grandezas tensão e corrente.

Sincrofasores

- ◆ Fasores calculados em instalações geograficamente distantes usando-se a mesma referência de tempo

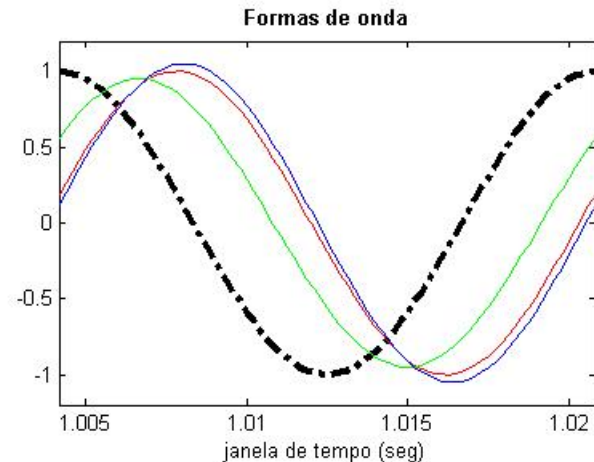
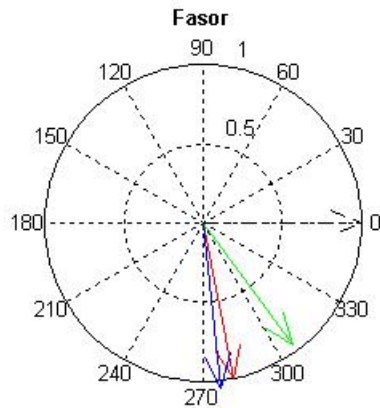
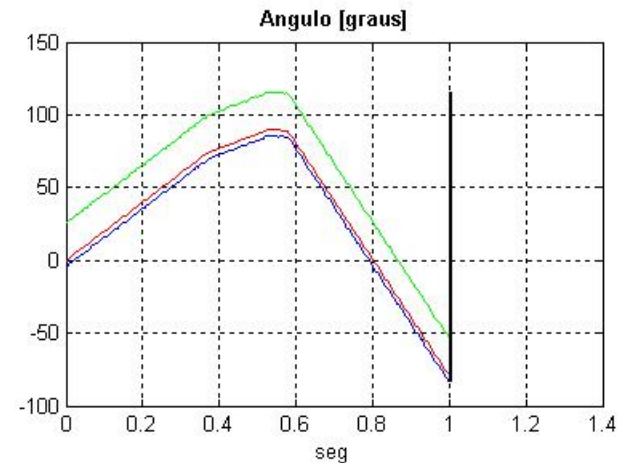
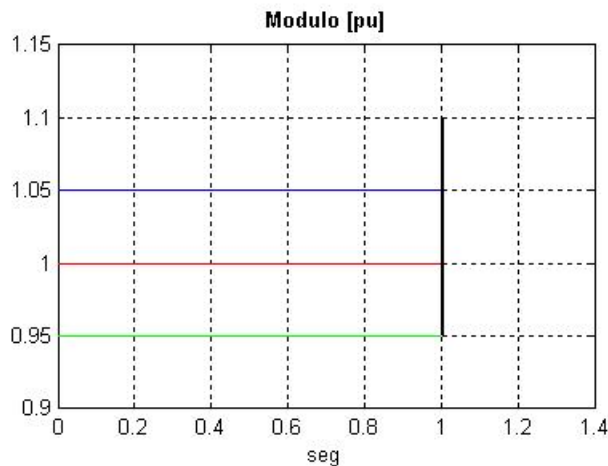


Há necessidade de uma referência temporal única - Sincronização!

Tarefa não-trivial: Envolve grandes distâncias e alta precisão temporal

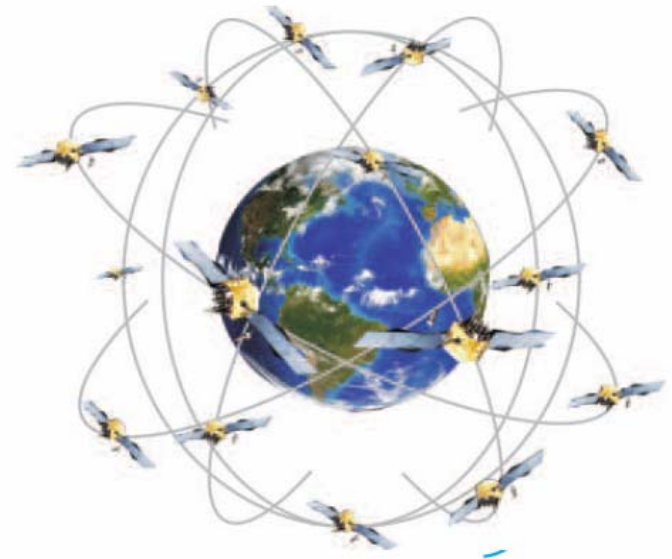
Sincrofasores - Ilustração

◆ Sincrofasores de um sistema hipotético:



Sistema de Sincronização (GPS)

- ◆ 24 Satélites
- ◆ Tempo de órbita:
 - 12 horas
- ◆ Visibilidade:
 - 5 a 8 unidades de qualquer lugar e a qualquer tempo
- ◆ Sinais:
 - Posição
 - Velocidade
 - **Tempo (1 PPS)**
- ◆ Precisão:
 - Horizontal: 22 m.
 - Vertical: 27.7 m.
 - **Temporal: ≈ 100 nanosegundos**

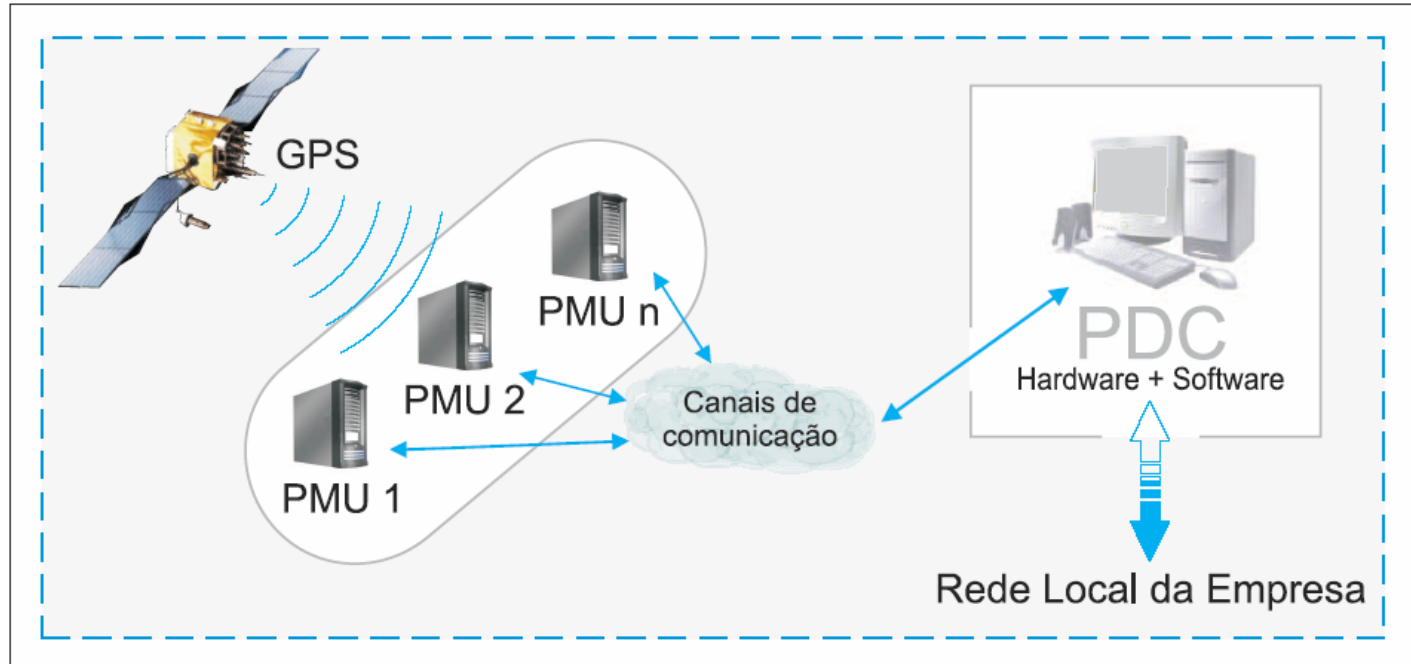


GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200km Altitudes, 55 Degree Inclination

Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS)

◆ Estrutura Básica

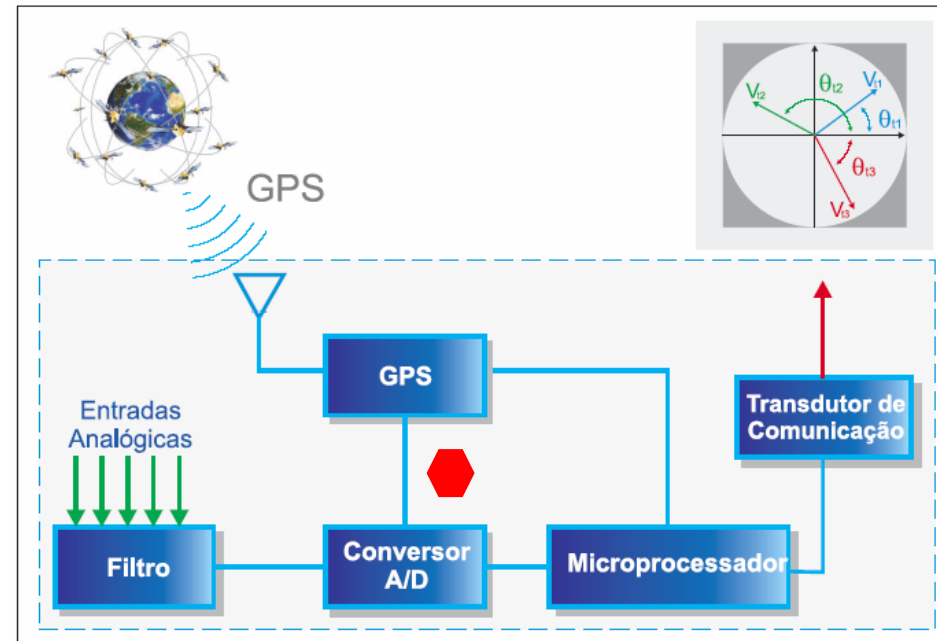
- Unidades de medição fasorial (PMUs) conectadas a um Concentrador de Dados (PDC) através de um *link* de comunicação.



Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS)

◆ PMU - *Phasor Measurement Unit*

- Composta por um receptor de sinal de GPS, sistema de aquisição (filtro + módulo de conversão A/D), e um microprocessador.
- Realiza a aquisição das tensões e correntes das barras e linhas.
- Processa os dados amostrados, obtendo assim os valores complexos de tensão e corrente.
- Formata os dados obtidos segundo um padrão (IEEE 1344/95 ou IEEE C37.118/2005).
- Envia as medidas fasoriais formatadas ao concentrador de dados.

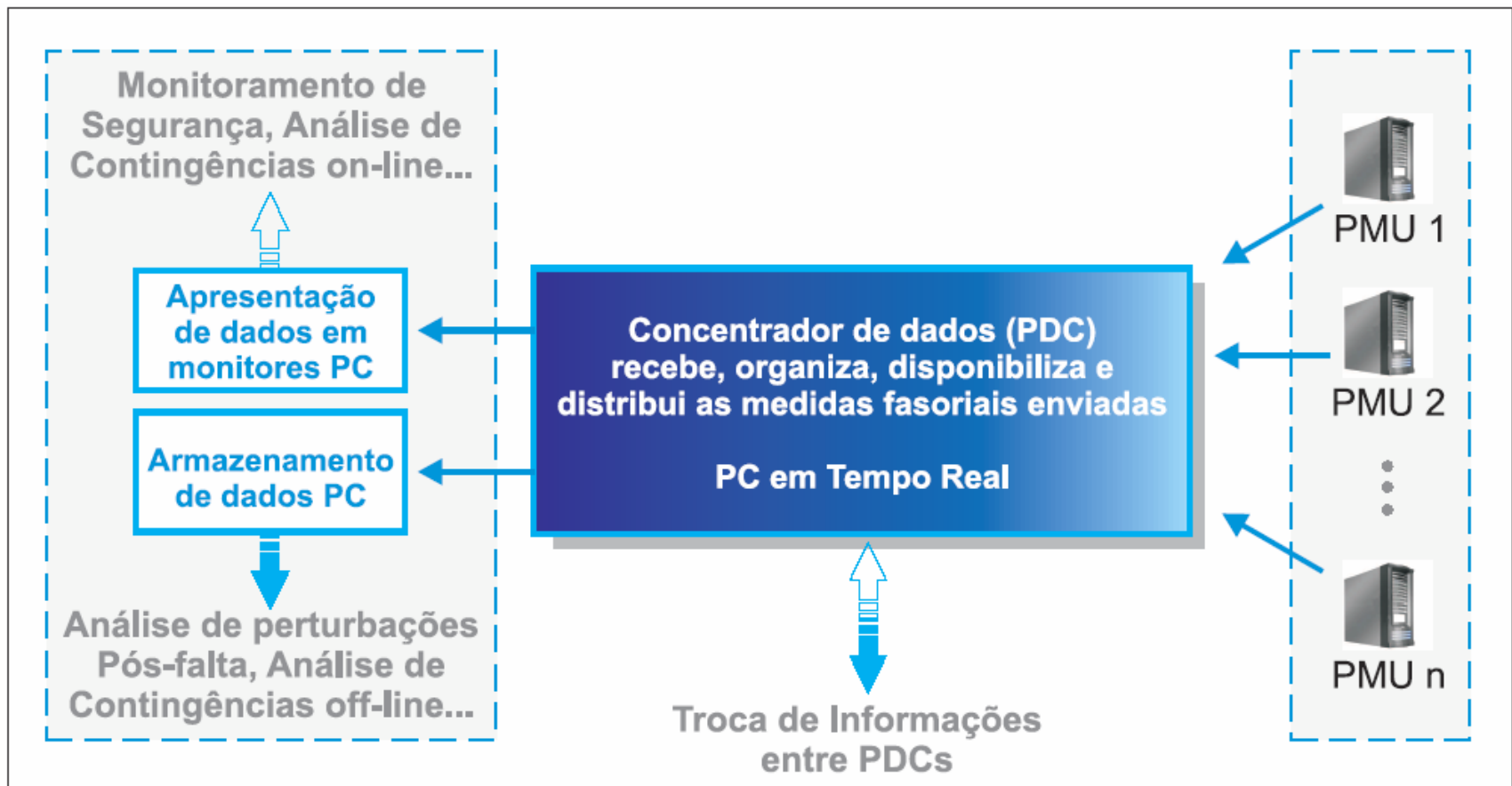


◆ **Conversor A/D**
Sincronizado pelo GPS

Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS)

◆ PDC - *Phasor Data Concentrator*

– Funções Básicas



Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (Requisitos)

◆ Exatidão

- Aplicações em monitoração, controle e proteção requerem uma exatidão em torno de 0,1 graus elétricos.
- Fontes de erro:
 - ✓ **Sinal de sincronismo** – a precisão do sinal de sincronismo utilizado em SPMS é em geral menor que 1 μ s (0,021 graus elétricos)
 - ✓ **PMUs** – introduzem erro relativamente baixo em regime permanente.
 - ✓ **Transformadores de instrumentos** – podem representar a maior parte dos erros dependendo do equipamento em específico.

◆ Confiabilidade:

- disponibilidade do sinal de sincronismo e dos canais de comunicação.

◆ Latência:

- Tempo de atraso da informação nos equipamentos e na comunicação.
- Crítico para aplicações em tempo real.

Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SCADA x SPMS)

SCADA

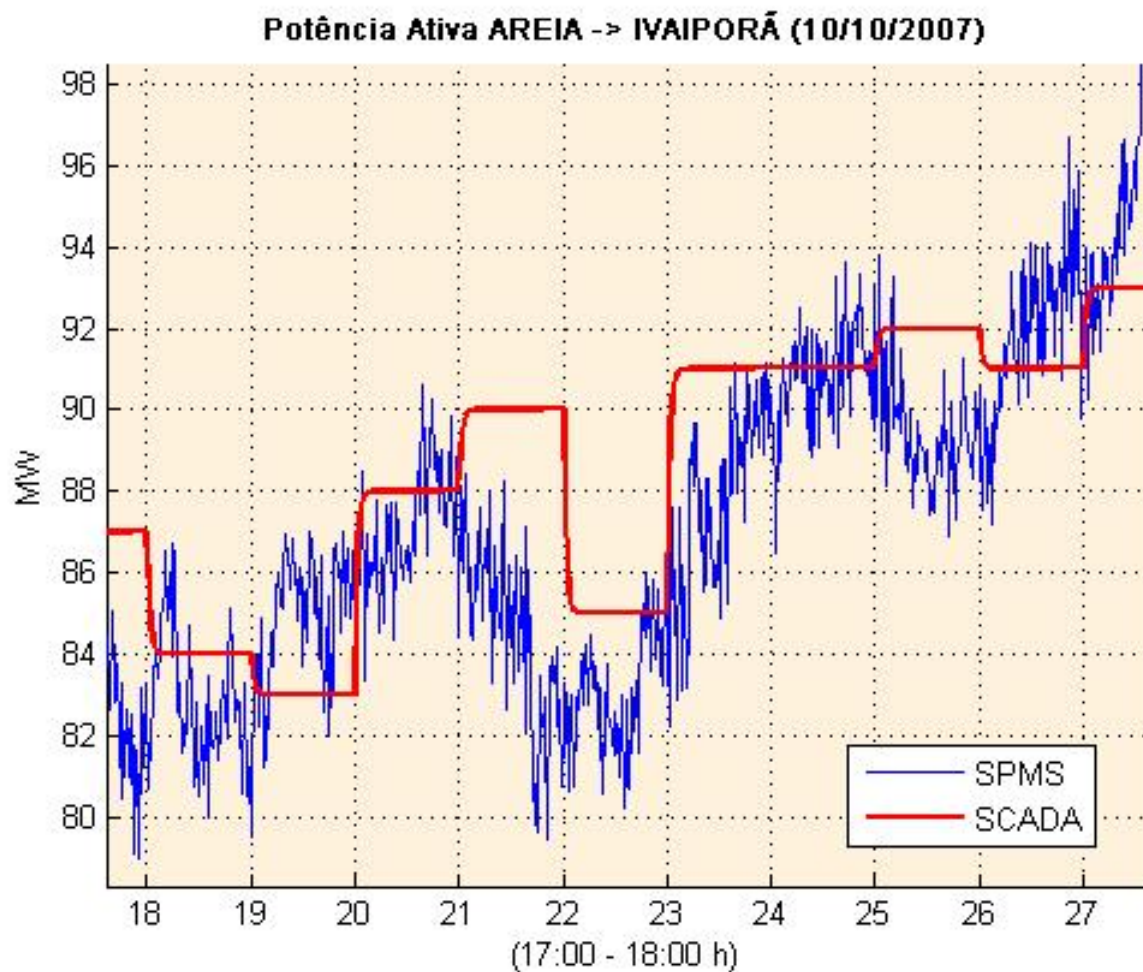
- ✓ Taxas de atualização entre 2 e 5 segundos
- ✓ Dados não sincronizados no tempo
- ✓ Links de comunicação tradicionais (normalmente lentos)
- ✓ Permite visualizar o comportamento estático do SEE
- ✓ Variações de frequência: representam o desbalanço entre geração e carga

SPMS

- ✓ Taxas entre 10 e 60 atualizações por segundo
- ✓ Dados sincronizados no tempo
- ✓ Compatível com tecnologias modernas de comunicação
- ✓ Permite visualizar o comportamento dinâmico do SEE
- ✓ Variações angulares: representam os fluxos de MW no sistema

(SCADA x SPMS)

(Ilustração)



Histórico e Estado da Arte

Experiências Seleccionadas

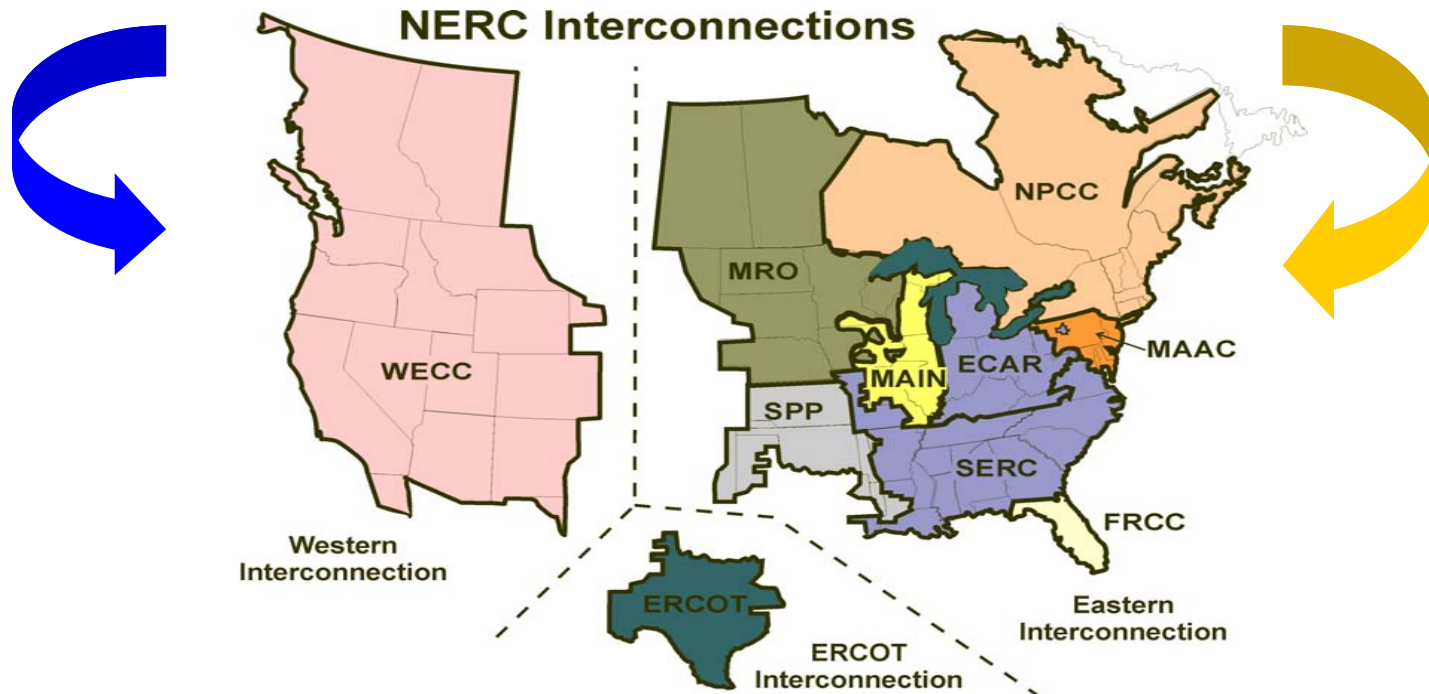
Estados Unidos da América

◆ Projeto WAMS - *Wide Area Measurements Systems*

- Sistema oeste (WECC)
- Início: 1989

◆ Projeto EIPP - *Eastern Interconnection Phasor Project*

- Sistema leste
- Início: 2003



WECC - *Western Electric Coodinating Council*

Projeto WAMS (WECC)

◆ Objetivo original

- Determinar necessidades e melhorar os instrumentos utilizados no controle e operação dos SEE em ambientes desregulamentados.

◆ Constatação

- O aprimoramento das funções de controle e operação dos SEE requer medições amplas para um maior conhecimento do comportamento do sistema.

◆ Implementação de SPMS iniciada em 1995

◆ Aplicações de monitoramento

- Visualização on-line dos fasores; registro de perturbações; análise off-line; aprimoramento e validação de modelos de simulação.

◆ Aplicações em Controle

- **Desenvolvimento do conceito de WACS – Wide Area Control System**

Projeto WAMS (WECC)

(Situação em 2007)

◆ Sistema WECC

- 82 PMUs
- 9 PDCs

◆ Caiso (Operador Independente da Califórnia)

- 53 PMUs pertencentes ao WECC enviam dados em tempo real ao PDC do CAISO.
- Desenvolvimento de ferramentas de monitoramento da dinâmica do Sistema (RTDMS - *Real Time Dynamics Monitoring System*)
 - » Monitoramento da abertura angular (*stress* do sistema)
- Protótipo de monitoramento de estabilidade para pequenos sinais.
 - » Análise de oscilações eletromecânicas inter-área (frequência e amortecimento)

Rede de SPMS do WECC

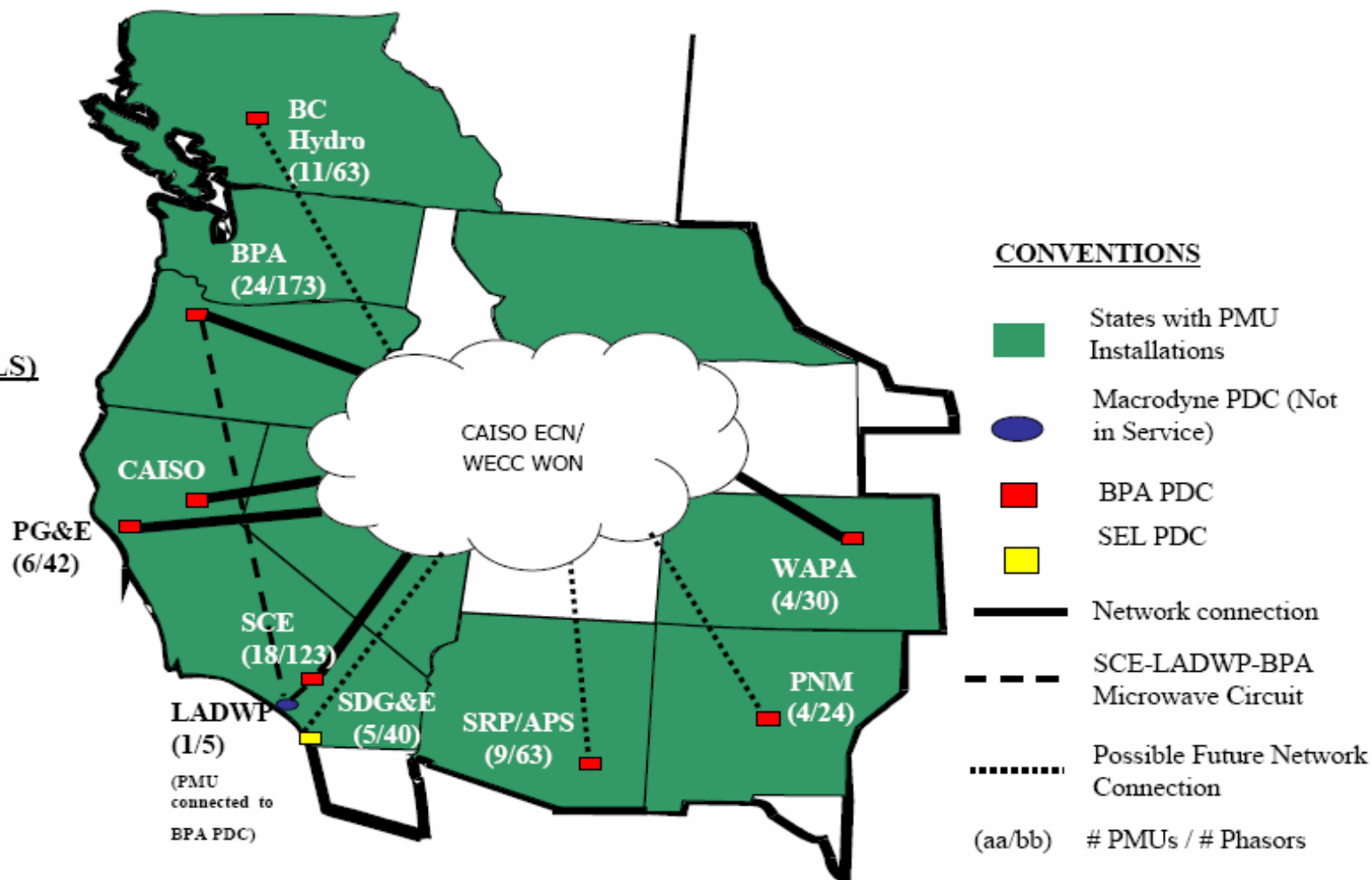
(Situação em 2007)

WECC TOTALS

82 PMUs
540 Phasors

NETWORKED (CAISO TOTALS)

53 PMUs
350 Phasors



Fonte: WECC

Projeto EIPP

(*Eastern Interconnection Phasor Project*)

◆ Objetivo

- Criar uma rede de SPMS robusta, abrangente e segura **para compartilhar dados de medição fasorial sincronizada sobre o sistema leste**, bem como ferramentas de monitoração e análise para melhorar a confiabilidade operacional e os processos de planejamento (Início em 2003)

◆ Participantes

- **CERTS** - *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*, reúne profissionais de operadores, fabricantes, transmissores e universidades

◆ Financiamento

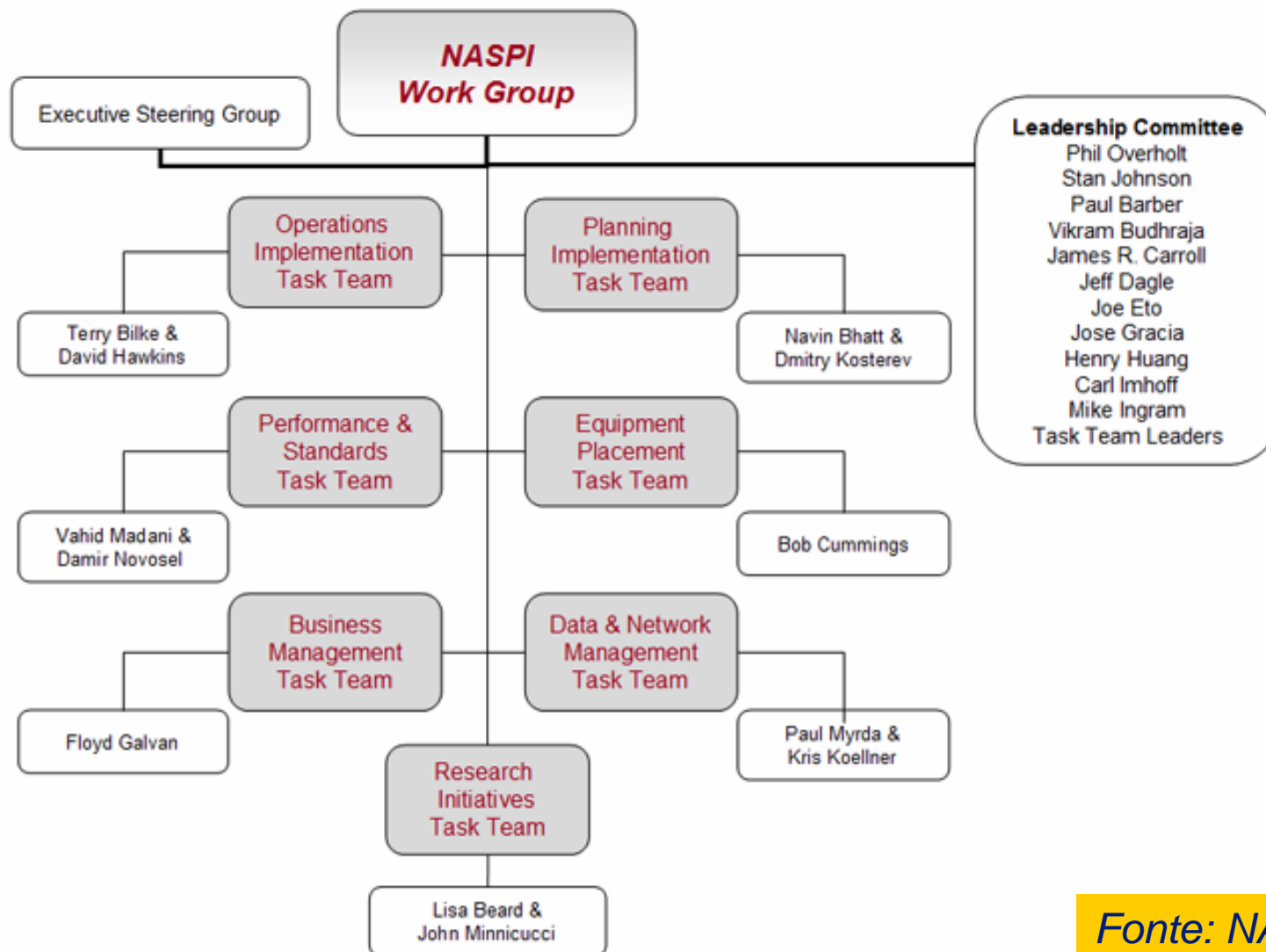
- **DOE** (*Department of Energy*) e Indústria

◆ Situação em 01/2007

- 35 Phasor Measurement Units (PMUs)
- 5 Phasor Data Concentrators (PDCs) - Ameren, AEP, TVA, NYISO, Entergy
- TVA SuperPDC
- **Redefinido como NASPI - North American SynchroPhasor Initiative**

Projeto NASPI

(Organização e Grupos de Trabalho)



Japão

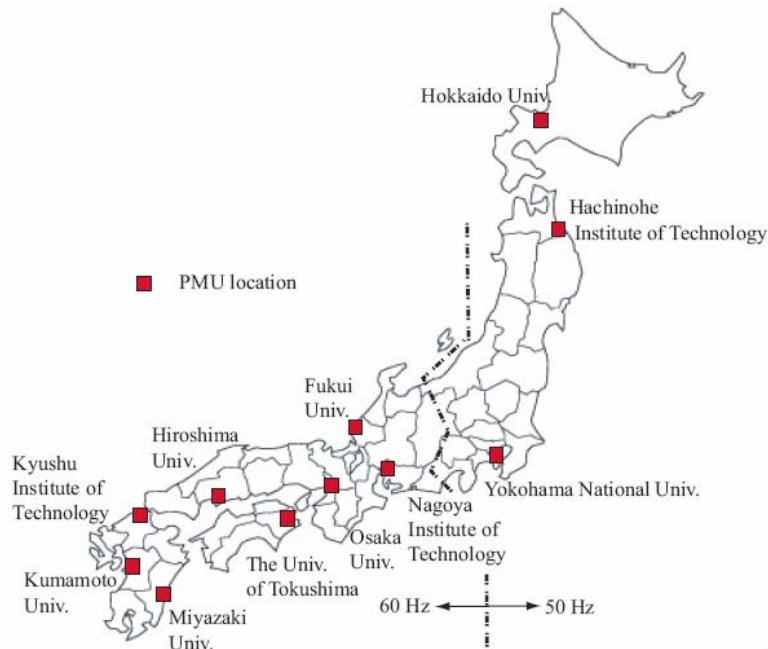
(Projeto envolve 11 Universidades – Situação em 2007)

◆ Objetivos:

- Implementar um SPMS em baixa tensão para monitorar oscilações de frequência entre áreas no sistema elétrico japonês.

◆ Resultados obtidos:

- Instalação de um SPMS em baixa tensão com 11 PMUs
- Registro e análise de diversos casos de oscilações da frequência síncrona



- KIT:Kyushu Institute of Technology
- Kumamoto University
- Miyazaki University
- Hiroshima University
- University of Tokushima
- Osaka University
- University of Fukui
- NIT: Nagoya Institute of Technology
- Hokkaido University
- Hachinohe Institute of Technology
- Yokohama National University

WAMS México

(Comision Federal de Electricidad - CFE)

◆ Início entre 1996 e 1997

- Instalação de 6 PMUs no sistema de transmissão de 230kV e 400kV.

◆ Objetivos

- Registro de eventos de longo duração; análise de estabilidade; medir a eficácia dos sistemas de controle; validação de simulações.

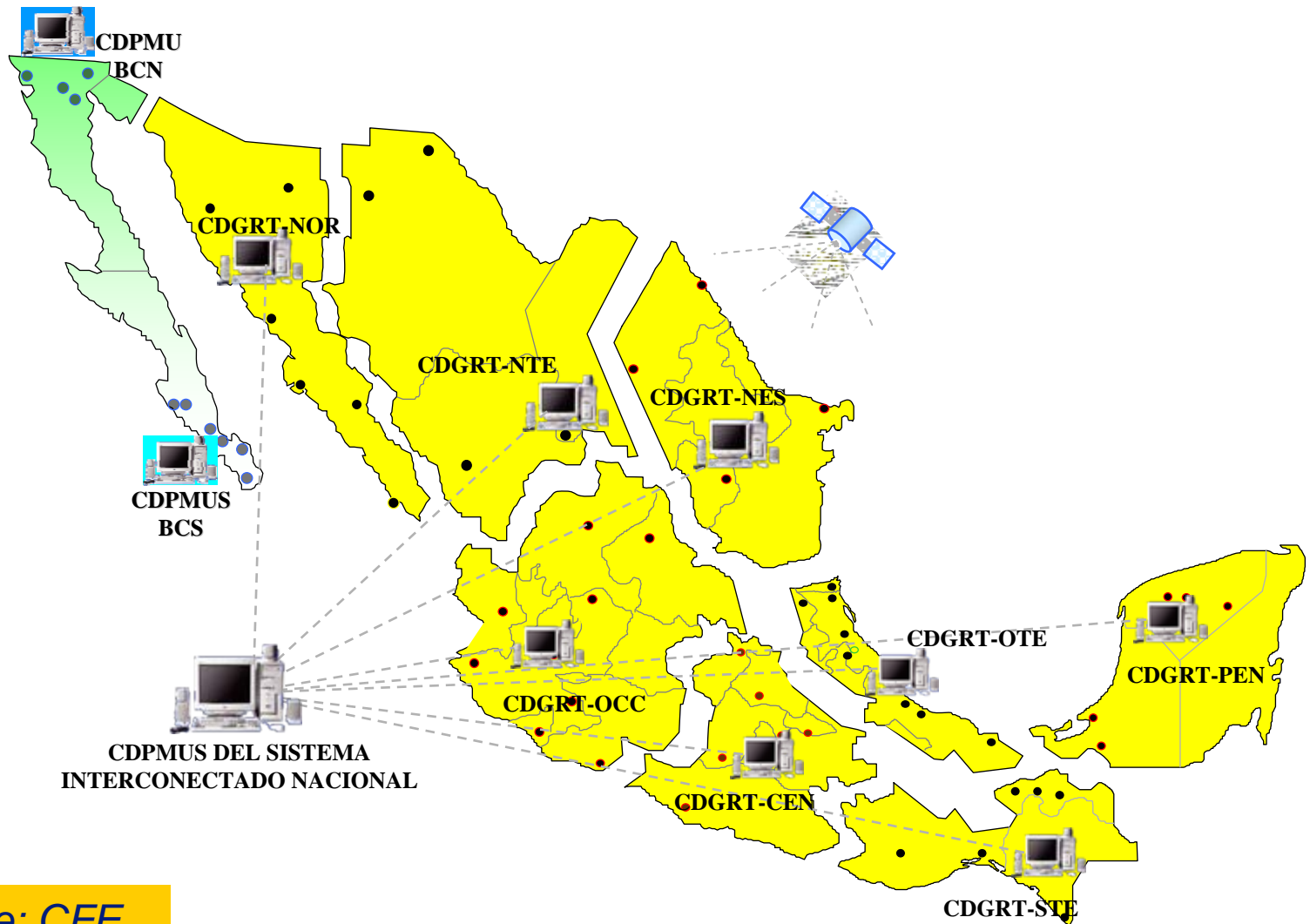
◆ Aplicação no sistema CFE

- Análise de desligamentos de linhas
- Visualização do sistema em tempo real
- Sistemas especiais de controle e proteção
- Estimação de estados

◆ Situação em 2007

- 37 PMUs
- 73 Relés-PMUs
- 5 PDCs

WAMS México (Sistema CFE)

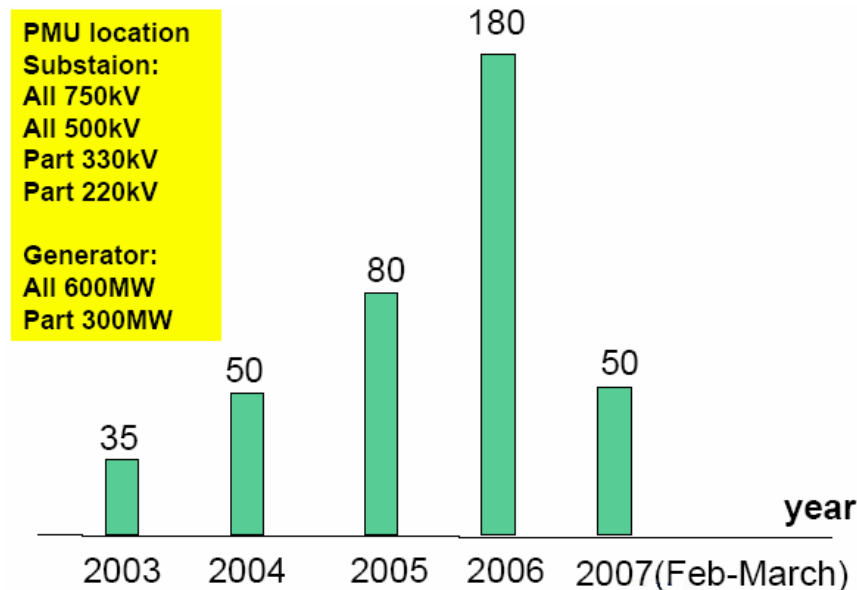


Fonte: CFE

WAMS na China

◆ Aspectos Gerais da arquitetura:

- Início dos trabalhos de pesquisa em 1994
- 10 projetos de WAMS em desenvolvimento sob IEEE 1344/95 Std.
- 5 sistemas de potência regionais + 5 sistemas de potência provinciais
- Cerca de 400 PMUs serão instaladas até o final 2007.
- Investimento superior a 12 milhões de dólares.
- **380 GW (Cap. Ger.)**



WAMS na China

(Ilustração)



WAMS na China

(Aplicações Enumeradas)

◆ Aplicações Básicas:

- Aquisição e tratamento de dados fasoriais (função PDC)
- Análise e monitoração da dinâmica de grandes áreas
- Registro sincronizado de dados de perturbações

◆ Aplicações de Monitoramento:

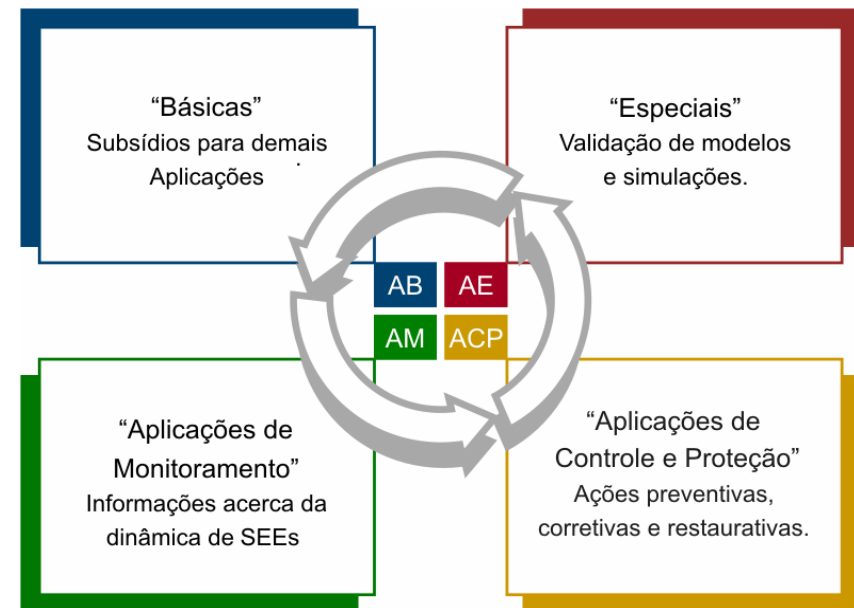
- Monitoração do estado de geradores
- Análise on-line de pequenas perturbações
- Estimação de estados híbrida
- Monitoração de estabilidade de tensão

◆ Aplicações de Controle e Proteção

- Controle de emergência,
- Predição e alarme de estabilidade angular
- Identificação on-line de perturbações
- Controle automático de tensão.

◆ Aplicações Especiais

- validação de modelos e simulações
- Identificação e validação de modelos



Outros Países

◆ Suíça

- 5 PMUs instaladas e desenvolvimento de alarmes e monitoração de oscilações eletromecânicas (2007)

◆ Itália

- Previsão de instalação de 30 PMUs e desenvolvimento de possíveis aplicações de estimação de estados, validação de modelos e teste em equipamentos de proteção, entre outras (2007)

◆ Países Nórdicos

- Há registros de algumas PMU instaladas na Islândia e Dinamarca visando estudos de monitoramento de perturbações, análises off-line e validação modelos de simulação.

◆ Coreia do Sul

- 24 PMUs instaladas e uma aplicação de monitoração (2005)

◆ Taiwan

- 5 PMUs e aplicações de monitoração e localização de faltas (2005)

Aplicações de SPMS no Brasil

- ✓ O projeto de SPMS para o SIN/ONS
- ✓ O projeto MedFasee

O Projeto de SPMS para o SIN

◆ Objetivo Geral:

- Aumentar a confiabilidade do SIN usando a tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada para o registro da dinâmica de perturbações, monitoração em tempo real e melhoria da estimação de estados.

◆ Projetos Específicos:

- **Projeto 6.2**: Sistema de Oscilografia de Longa Duração
 - ✓ Proposto inicialmente em outubro de 2000 após blecaute de 1999
 - ✓ Reativado pela Resolução Autorizativa Aneel 170/2005
 - ✓ Suporte a estudos off-line.
- **Projeto 11.11** – Aplicações para Suporte a Decisão em Tempo Real
 - ✓ Preferencialmente, utilizar medições de PMU para a melhoria da estimação de estados no SIN

Aplicações de Interesse do ONS

◆ Registro da dinâmica do SIN:

- suporte a análise de pós-perturbação, incluindo a análise modal de frequência
- Validação de modelos dinâmicos e de ajustes de controladores
- Monitoração de atuação da proteção
- Medição de parâmetros de linhas de transmissão

◆ Monitoração de dados em tempo real:

- Predição de eventos por meio do uso de ferramentas de visualização nos Centros de Controle do ONS

◆ Introdução de medições fasoriais no EMS:

- Visa a melhoria da estimação de estados no SIN

O Projeto de SPMS para o SIN

(Organização e Responsabilidades)

◆ Projeto 6.2 - Oscilografia de Longa Duração

- Resolução Autorizativa Aneel 170/2005 define as seguintes atribuições:
 - ✓ **ONS**: especificar a arquitetura e requisitos do SPMS, coordenar a implantação das PMUs e adquirir um PDC central.
 - ✓ **Agentes**: adquirir, instalar e manter as PMUs e prover os meios de comunicação necessários.
- Dimensão estimada:
 - ✓ Monitoração em cerca 58 subestações (≈ 400 circuitos)
 - ✓ Aquisição e armazenamento confiável de dados

◆ Projeto 11.11 – Aplicações em tempo real

- Incluído no Projeto Estal:
 - ✓ Projeto de Assistência Técnica ao Setor Elétrico.
- Dimensão estimada:
 - ✓ Instalação de PMU em todas as subestações acima de 345 kV (≈ 350 SE).
 - ✓ Requisito inicial de latência inferior a 2 segundos.

Fonte: ONS

Projeto MEDFASEE

**Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica**

Visão Geral

Parceria UFSC / Reason / Finep

2003/2006

Projeto MEDFASEE (Objetivos)

- ◆ Desenvolver um protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada para Sistemas de Energia Elétrica, envolvendo atividades de pesquisa e implementação relacionadas aos seguintes temas:
 - unidades de medição fasorial (PMUs);
 - sistema de aquisição e tratamento dos dados de medições fasoriais (PDC);
 - aplicações nas áreas de monitoração e controle da operação do sistema em tempo real.

Projeto MEDFASEE

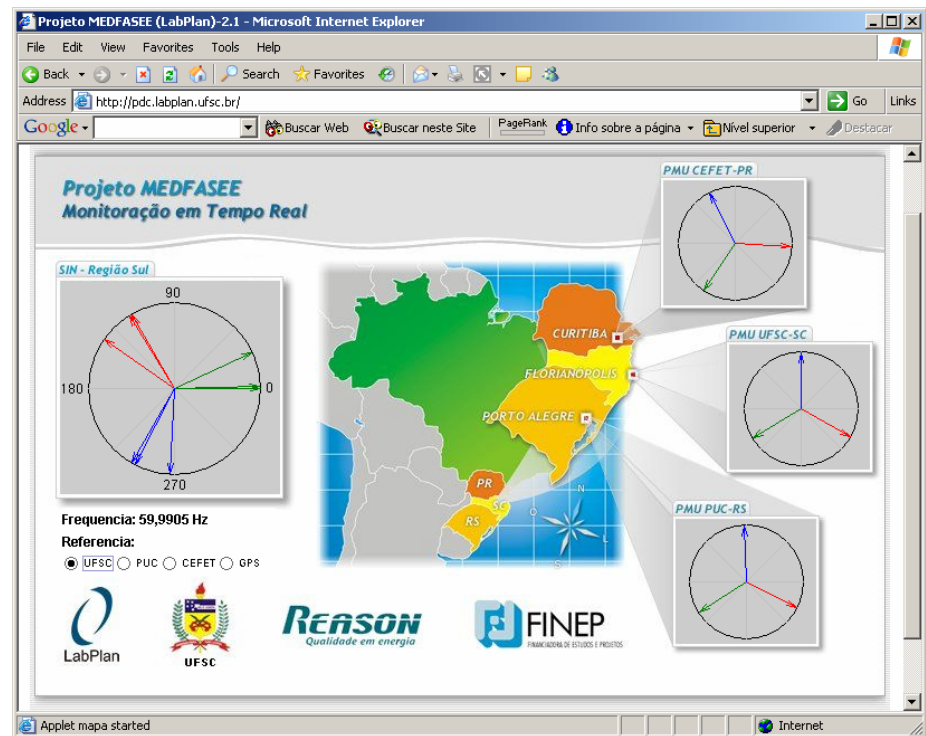
(Desenvolvimentos Realizados)

- ◆ Simulador de SPMS - Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
- ◆ Protótipo de SPMS (3 PMUs + PDC)
- ◆ Aplicações de monitoração em tempo real e estudos off-line
- ◆ Monitoração e análise da frequência em 3 capitais do sul do Brasil
- ◆ Registro e análise de ocorrências no SIN
- ◆ Metodologias para aplicações envolvendo:
 - Controle e estabilidade
 - Localização de faltas
 - Estimação de estados

Protótipo de SPMS

(Estrutura e Localização Geográfica)

- ◆ PMUs instaladas nas 3 capitais do Sul do Brasil
- ◆ Medição das tensões trifásicas da rede de distribuição
- ◆ Uso da Internet para conexão entre PMUs e PDC
 - Protocolo UDP/IP
 - 60 sincrofasores / segundo
- ◆ PDC instalado no LabPlan/UFSC
- ◆ Histórico de dados de 7 dias

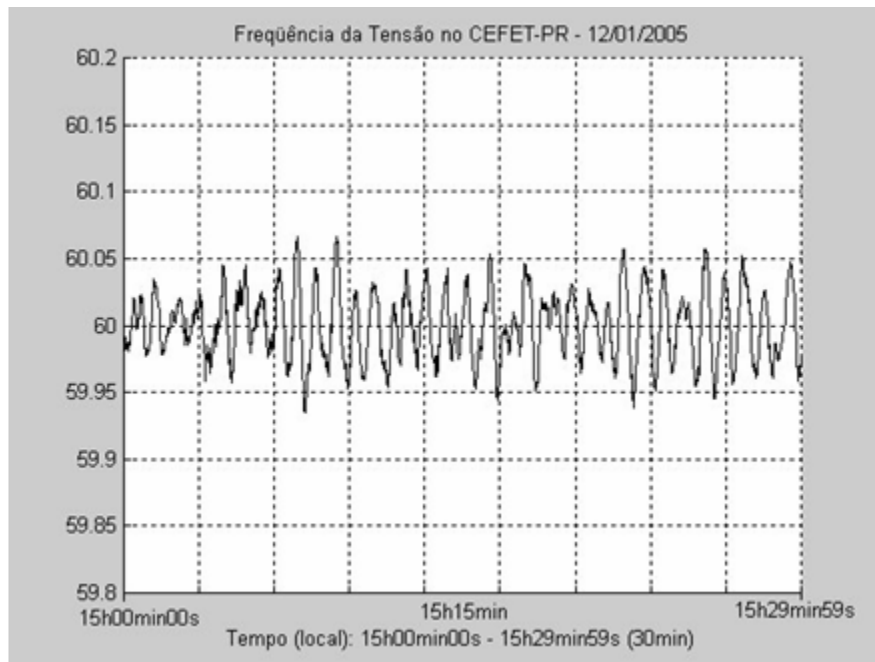


<http://pdc.labplan.ufsc.br/mapa.html>

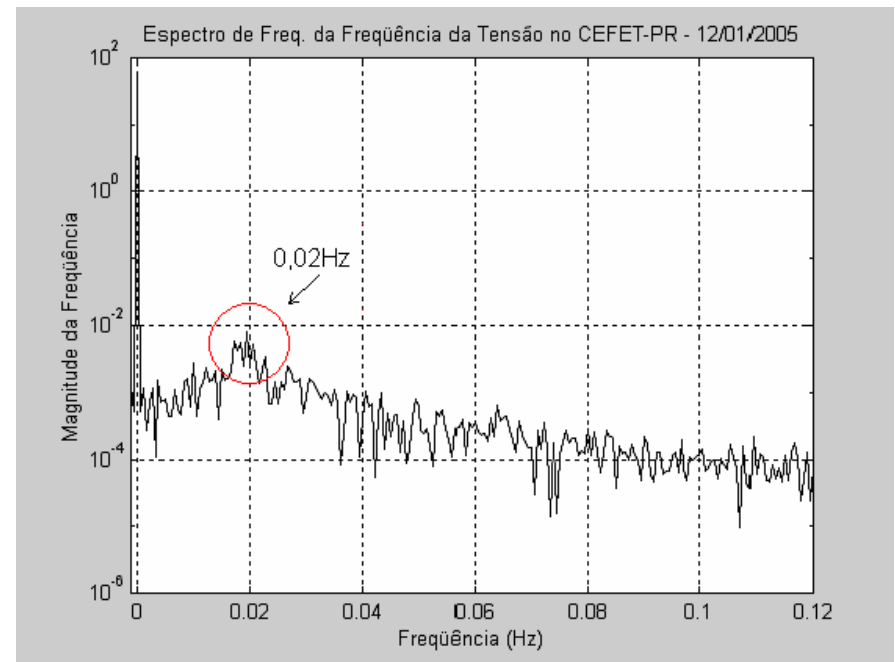
Avaliação do Protótipo

◆ Monitoração de Frequência

- Monitoração contínua da freqüência do SIN - Região Sul



a) Evolução no tempo



b) Espectro de freqüência

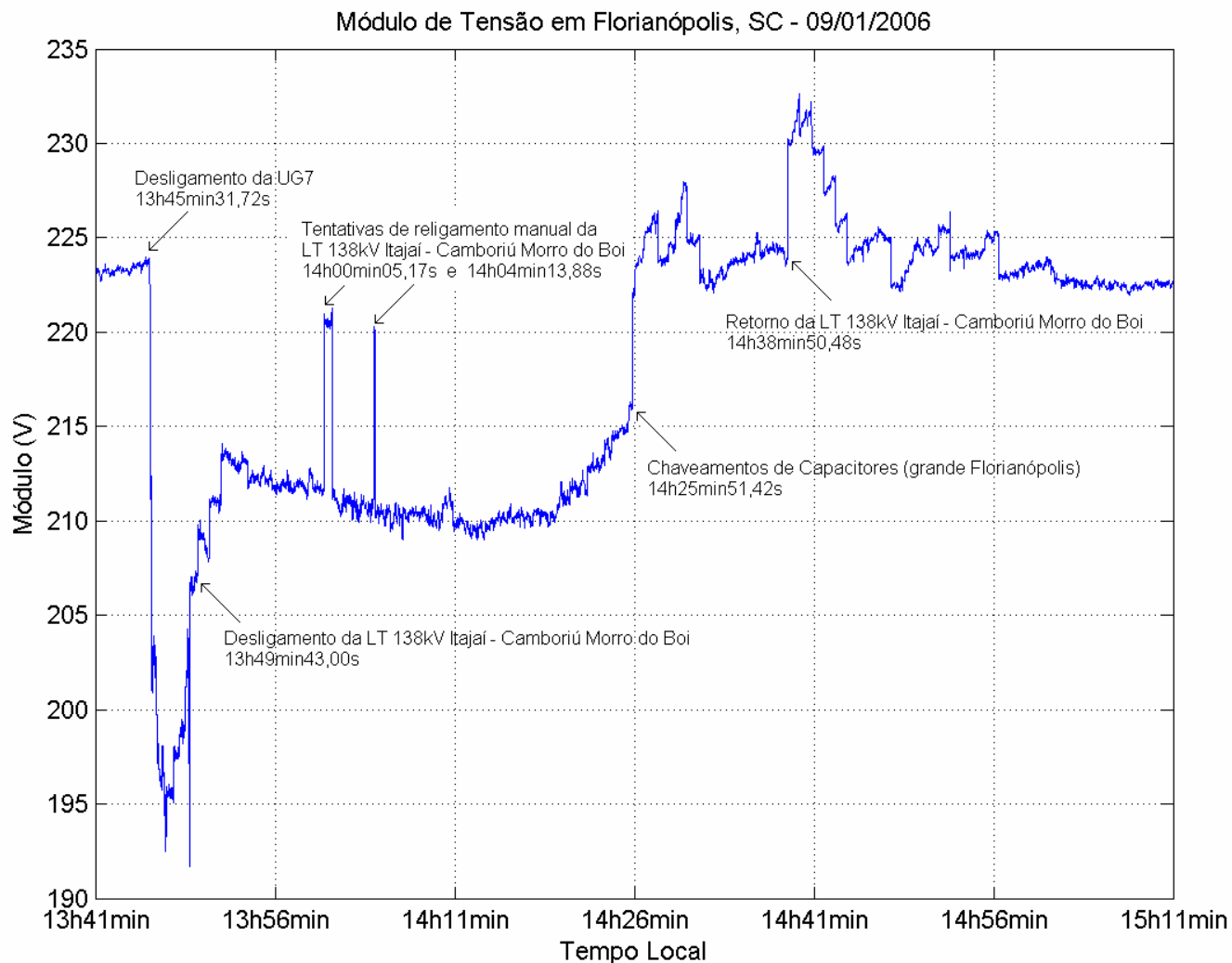
Avaliação do Protótipo

◆ Registros de Ocorrências no SIN:

- Desligamento Total da Usina de G.B.Munhoz (05/01/2005)
- Perturbação no Sudeste / Centro-Oeste (14/03/2005)
- Queda da LT Foz do Iguaçu – Ivaiporã (14/06/2005)
- Desligamentos na SECI da CEEE, RS (23/08/2005)
- Queda da LT Campos Novos – Caxias (29/08/2005)
- Queda da LT Foz do Iguaçu – Ivaiporã (04/10/2005)
- Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda (09/01/2006)
- Explosão de Pára-Raio no RS (11/01/2006)
- Comportamento da Carga do SIN na Copa (27/06/2006)

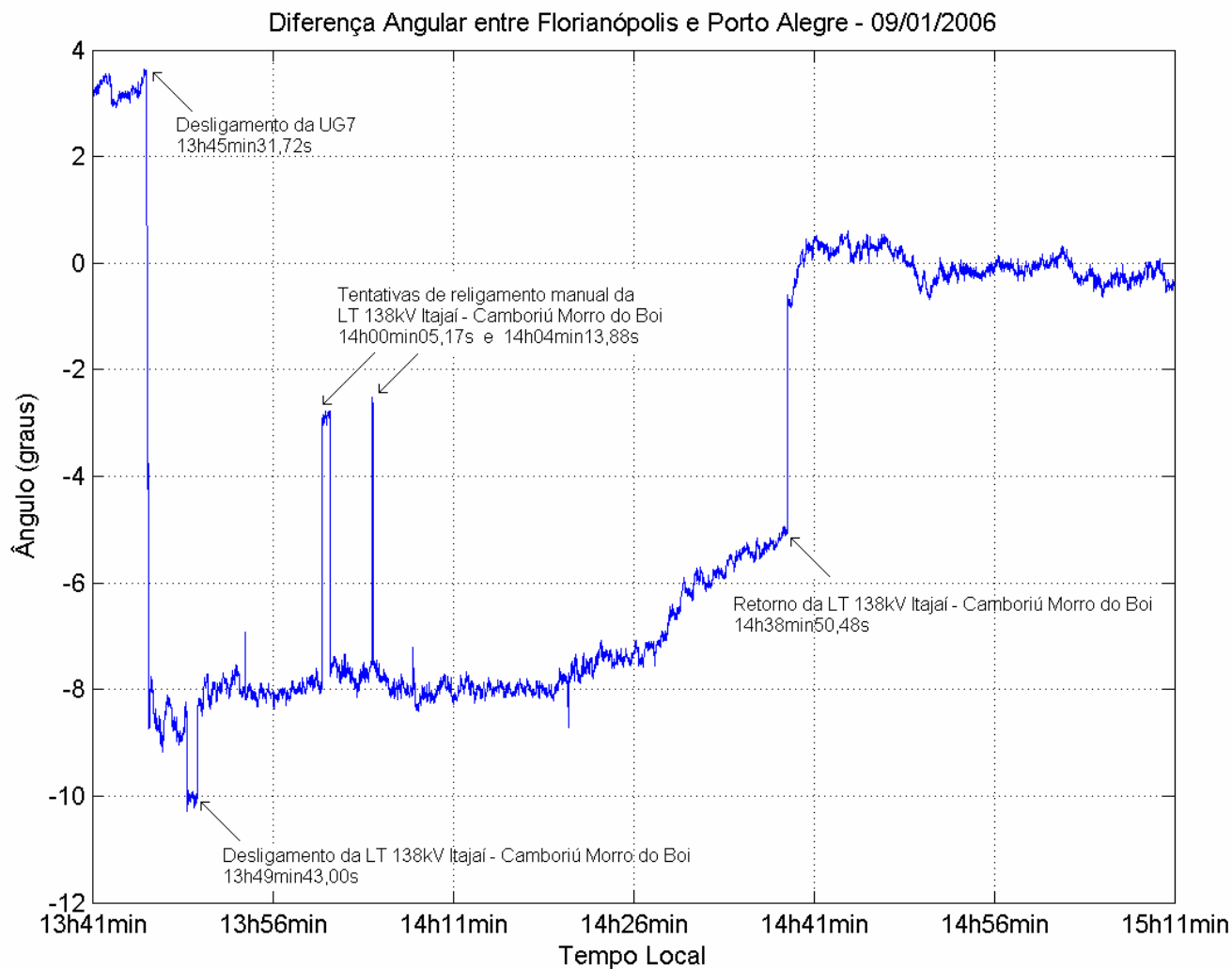
Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda

(09/01/2006 – 13h45min31s)



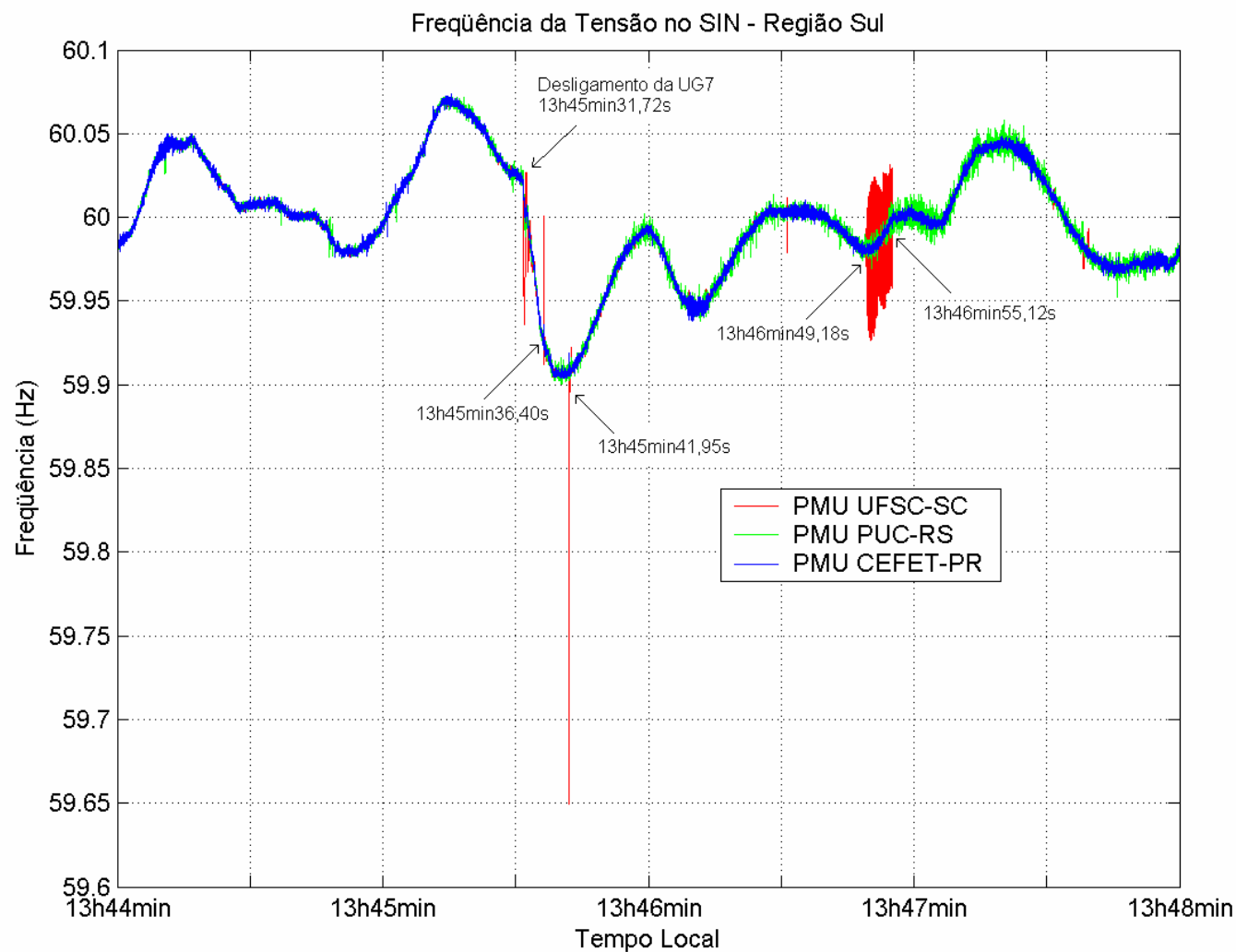
Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda

(09/01/2006 – 13h45min31s)



Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda

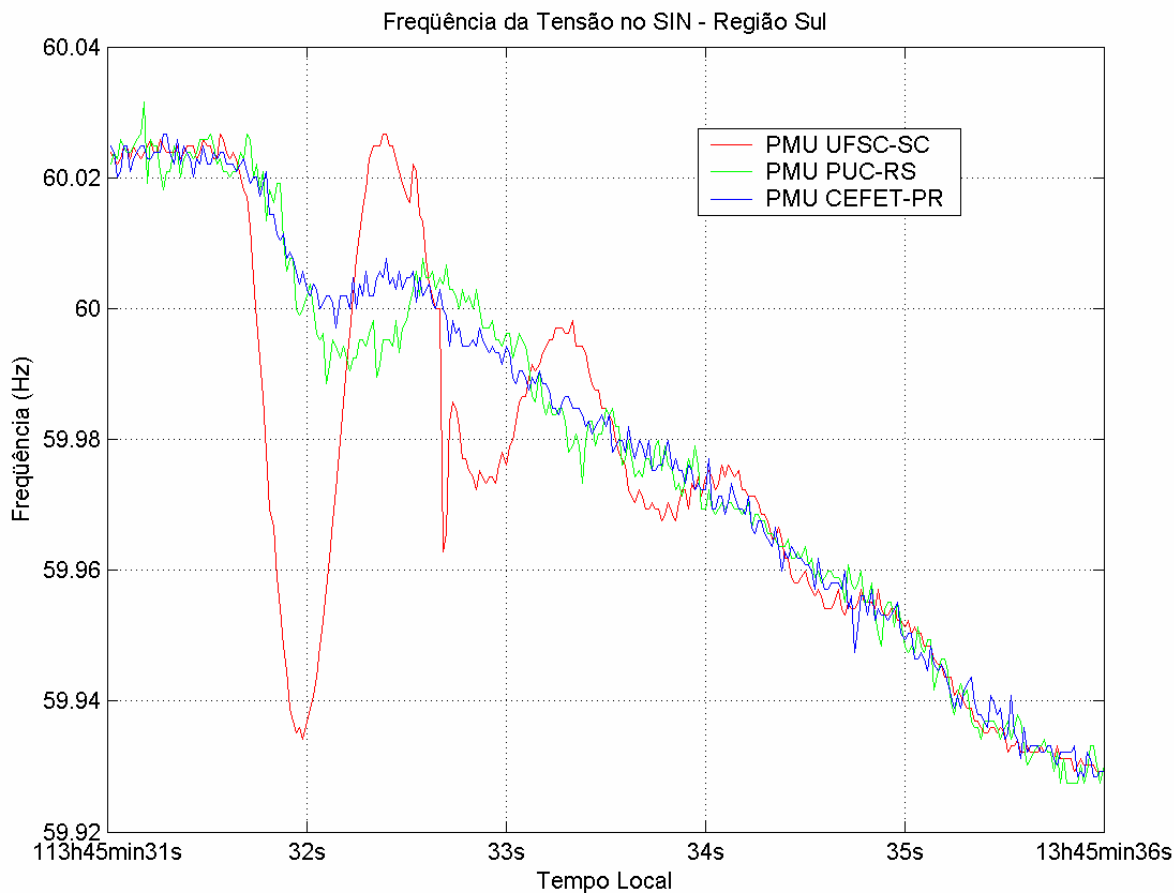
(09/01/2006 – 13h45min31s)



Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda

(09/01/2006 – 13h45min31s)

- ◆ Oscilações eletromecânicas no momento do desligamento da UG7
 - Demais UG de Jorge Lacerda oscilando contra o sistema elétrico



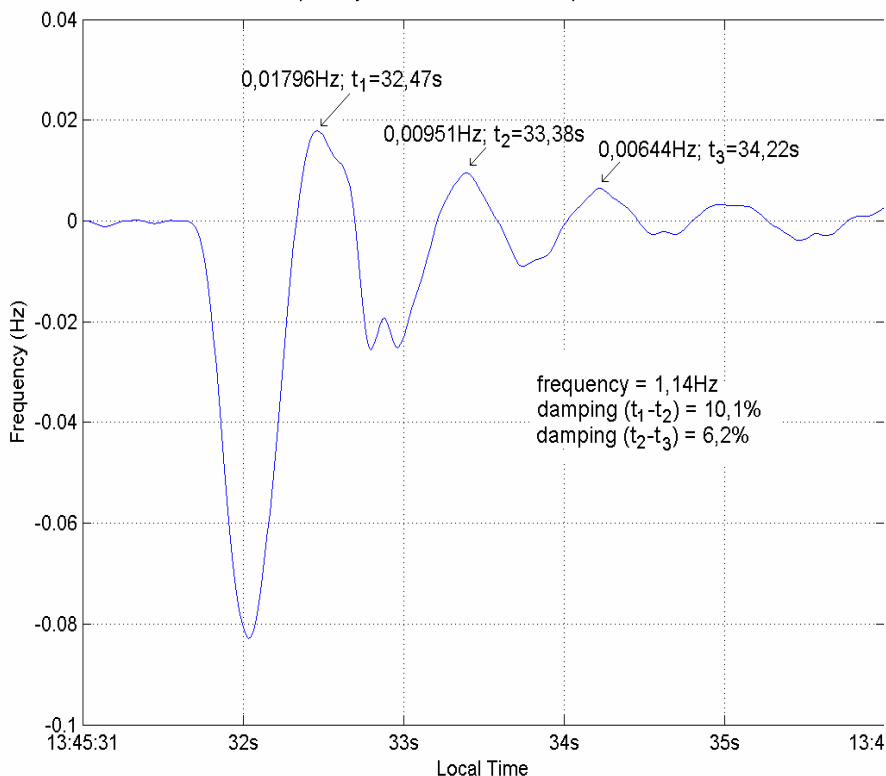
Desligamento da UG7 de Jorge Lacerda

(09/01/2006 – 13h45min31s)

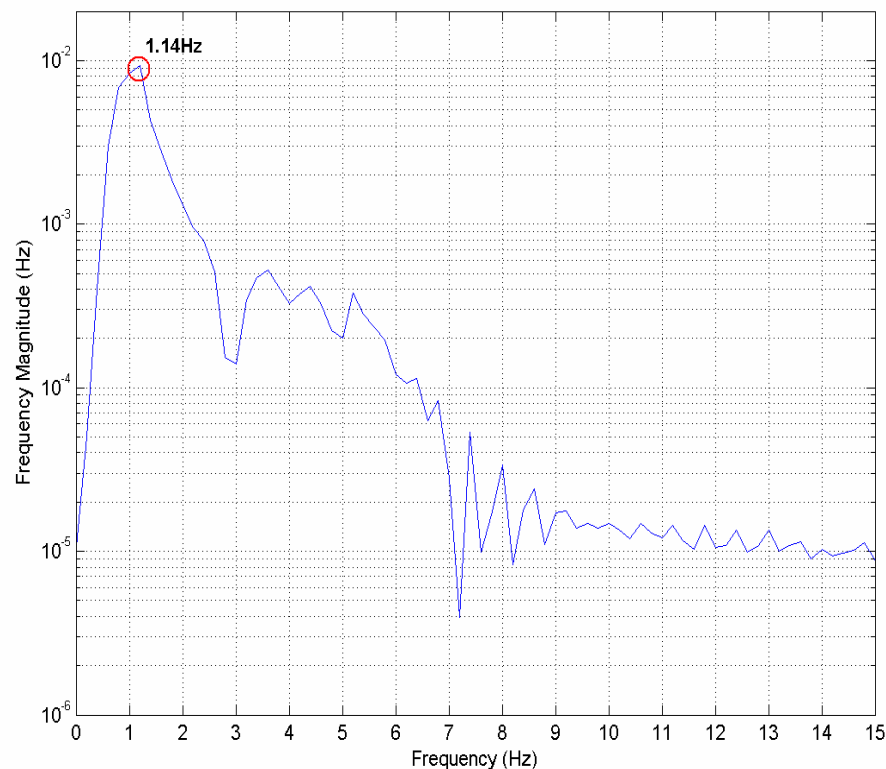
◆ Identificação do modo de oscilação:

- Desvio de frequência em Florianópolis, SC
- Filtro passa-baixa em 5Hz
- Modo detectado: 1,14Hz, com amortecimento de 10,1%

Frequency Deviate at Florianópolis - 09/01/2006



Frequency Spectrum at Florianópolis



Projeto MedFasee – Eletrosul

((Projeto de P&D Eletrosul/UFSC/Reason))

Implementação de um Protótipo de SPMS no
Sistema de Transmissão da Eletrosul

Parceria Eletrosul / LabPlan/ Reason

2007/2008

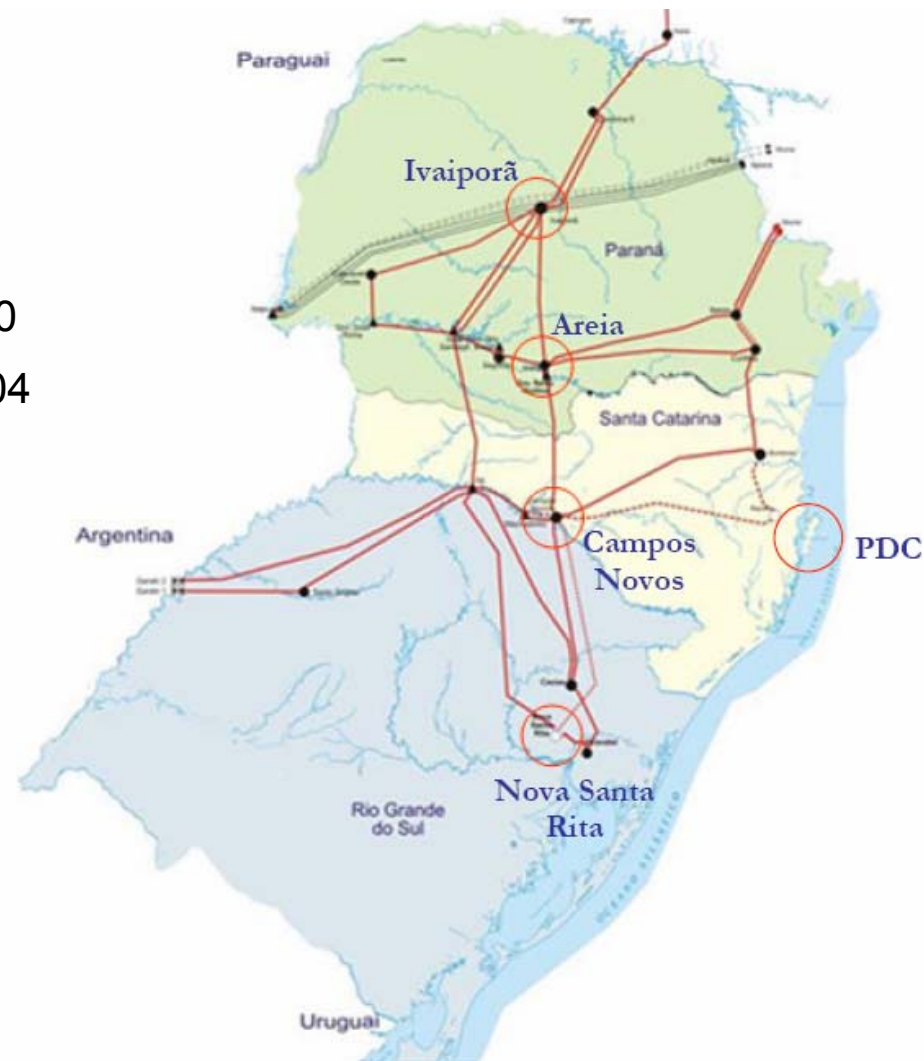
Visão Geral do Protótipo Instalado

■ Subestações (4):

- SE Ivaiporã (SE-IVA): RPV-304
- SE Areia (SE-ARE): RPV-310
- SE Campos Novos (SE-CNO): RPV-310
- SE Nova Santa Rita (SE-NSR): RPV-304

■ Circuitos monitorados (6):

- LT 500kV Ivaiporã – Londrina C1
- LT 500kV Ivaiporã – S.Santiago C1
- LT 500kV Ivaiporã – Areia
- LT 500kV Areia – C.Novos
- LT 500kV C.Novos – Caxias
- LT 500kV N.S.Rita – Gravataí



Visão Geral do Protótipo Instalado

❑ PDC (1):

- Instalado na sede da empresa, em Florianópolis, SC

❑ Monitoração:

- Grandezas trifásicas de cada circuito
 - » tensões e correntes
 - » total de 45 canais
- Taxa de transmissão:
 - » 60 sincrofasores por segundo
- Dados históricos:
 - » 5 dias



Comentários Finais

- ❑ É elevada a demanda pelo desenvolvimento da tecnologia de SPMS em todo o mundo.
- ❑ A monitoração da dinâmica do sistema em tempo real e o registro de perturbações são as aplicações predominantes.
- ❑ A integração de aplicações de Controle e Proteção e Estimação de Estados ainda encontram-se em estágio incipiente.
- ❑ Constatou-se no projeto MedFasee que informações relevantes sobre o desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência podem ser obtidas a partir da monitoração em baixa tensão.
- ❑ O projeto atual de SPMS para o SIN é de grande relevância para a capacitação técnica dos agentes e desenvolvimento desta tecnologia no Brasil.

Obrigado!

◆ Ildemar C. Decker

- 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: decker@labplan.ufsc.br