

Sincrofasores

Se agradece al M. Sc. Ing. Pablo Pena.



Año 2019

SPS y Sincrofasores

PMU y concentradores

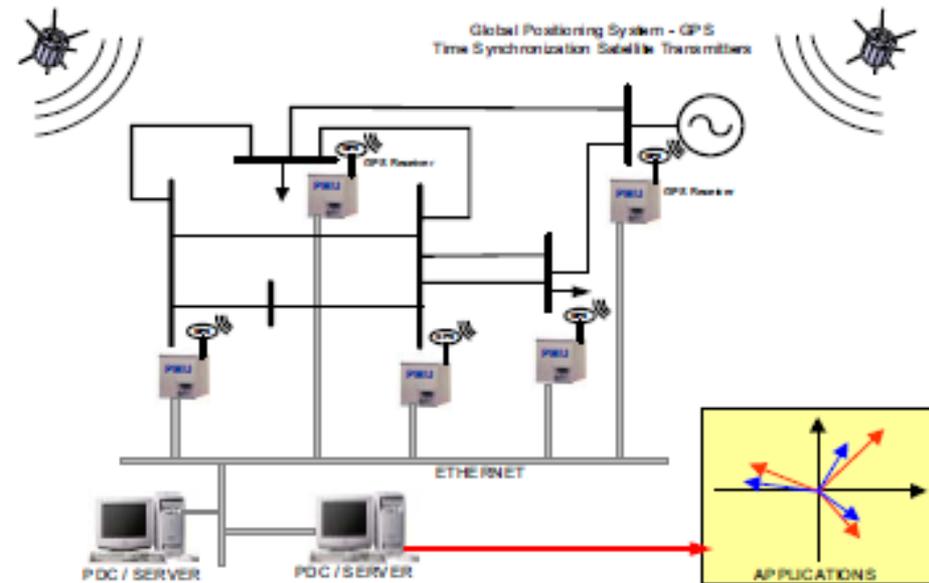


Fig. 1. Typical Transmission System with Phasor Measurement Units

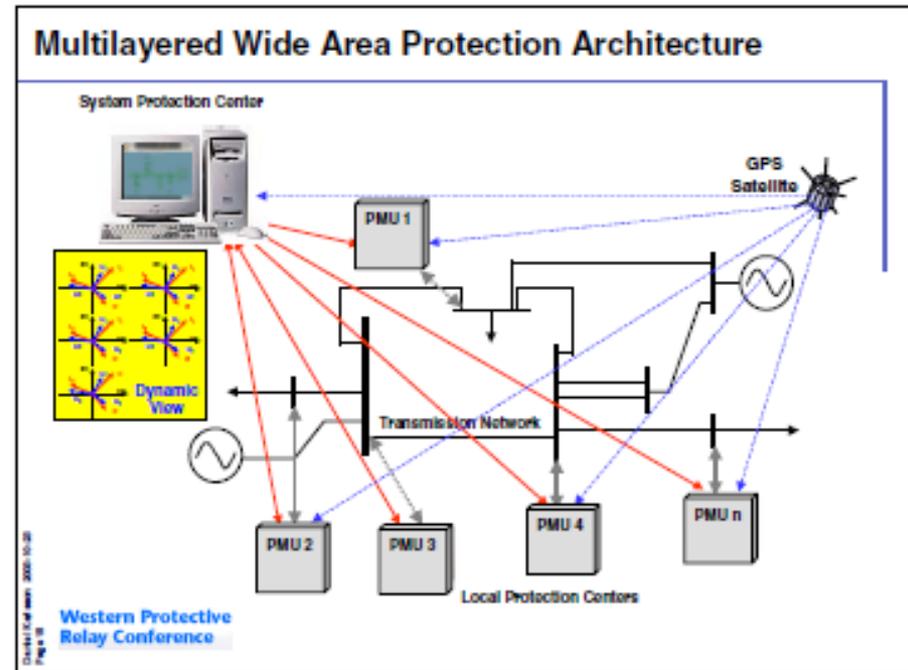


Figure 2: Multilayered wide area protection architecture 2

Normas sobre Sincrofasores, PMU, PDC, ...

- IEC/IEEE **60255-118-1:2018** (Norma Medidas de Sincrofasores para sistemas de potencia)
- IEEE **C37.118.2-2011** (Norma de Transferencia de Datos de Sincrofasores)
- IEC **61850-90-5 2012** (uso de IEC 61850 para transmitir sincrofasores IEEE C37.118)
- IEEE **C37.242-2013** (Guía de Sincronización, Calibración, Ensayo e Instala. de PMU)
- IEEE **C37.244-2013** (Guía para Phasor Data Concentrator, PDC)
- Borrador **IEEE PC37.247/D2.48**, Nov 2018. (futura Norma PDC para Sistemas de Potencia)
- IEC **60255-24-2013** – IEEE **C37.111-2013** (Norma COMTRADE)
- IEC **61588-2009** – IEEE **1588-2008** (Norma PTP, Protocolo Sincronización Precisa)
- IEEE **C37.238-2017** (Norma del perfil para SEP de IEEE 1588-2008)
- IEC/IEEE **61850-9-3:2016** (Perfil PTP para automatización en empresas eléctricas)
- IRIG **200 – 2004** (Códigos Serie de Tiempo, por ej. IRIG-B)
- IEEE **1815.1-2015** y Corrigenda **1-2016** (Norma Intercambio info. IEC 61850 - IEEE 1815 (DNP3))
- IEEE Synchrophasor Measurement Test Suite Specification (**TSS**) - Version 2 (2015)
- ~~IEEE **C37.118-2005** (Norma de Sincrofasores)~~
- ~~IEEE **C37.118.1-2011** y enmienda **C37.118.1a-2014** (Norma de Sincrofasores, PMU)~~

¿Qué es un Fasor?

Una senoide se puede representar como un fasor

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi)$$

\leftrightarrow

$$\bar{X} = X_r + jX_i = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi}$$

Fasor:

- Senoide \leftrightarrow Vector \leftrightarrow N° Complejo
- Para señales eléctricas sinusoidales como tensión y corriente
- Definido para la velocidad angular ω
- ϕ ángulo de fase inicial (cuando $t = 0$)
- Son comparables fasores de igual ω y escala

¿Y qué es un Sincrofasor?

Fasor Sincronizado

- se calcula a partir de una señal muestreada,
- para la frecuencia fundamental de la señal,
- usando una señal de tiempo estándar como referencia para las medidas.

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi)$$

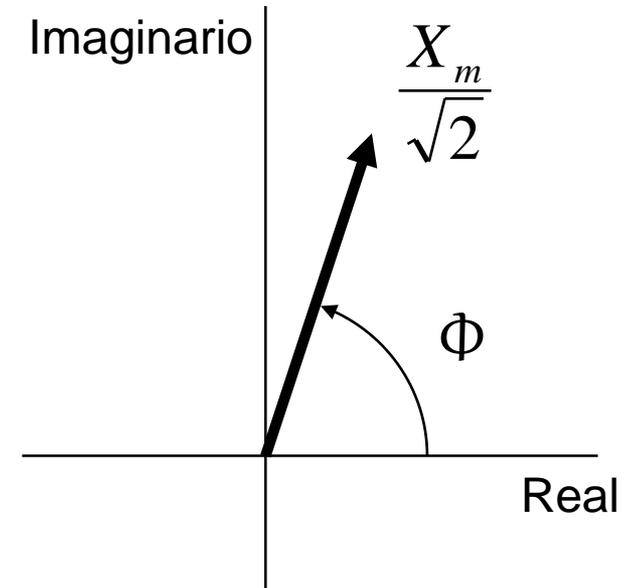
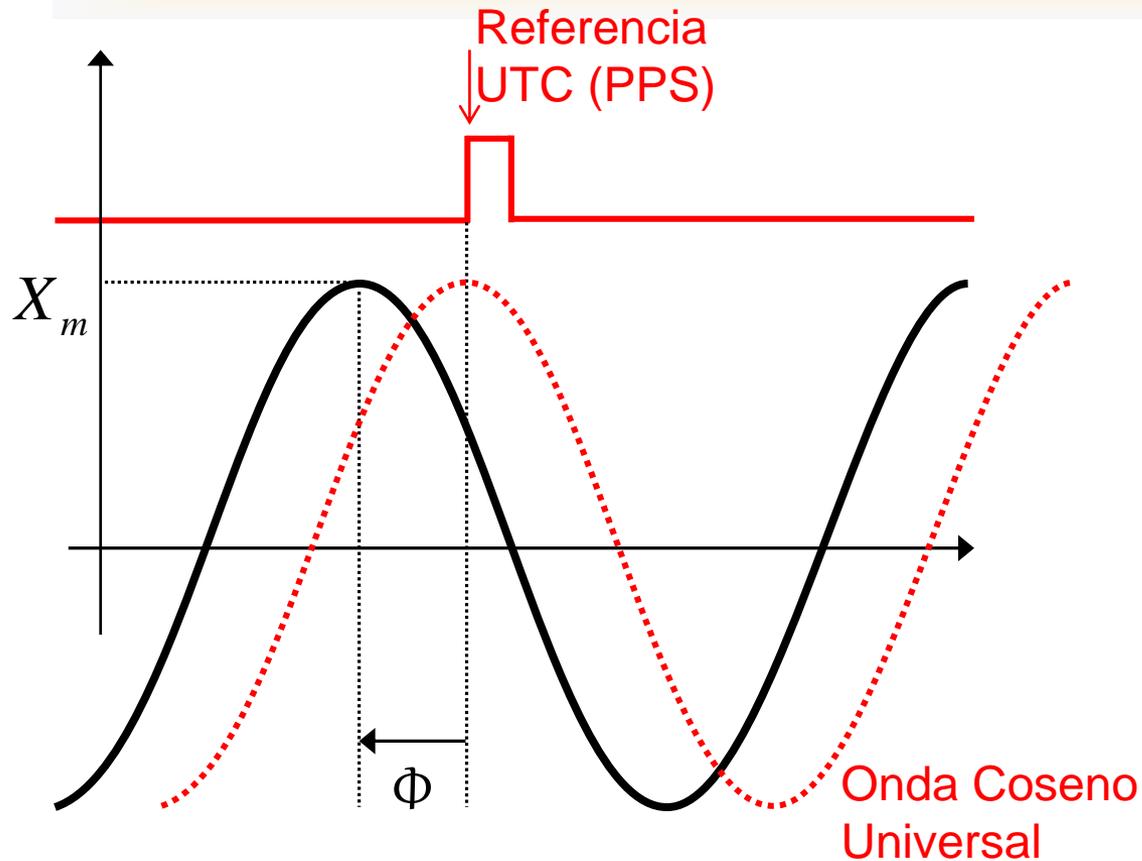
\leftrightarrow

$$\bar{X} = X_r + jX_i = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi}$$

- \emptyset - ángulo de fase instantáneo de $x(t)$
relativo a una onda coseno de frecuencia nominal ω_0
sincronizada al Tiempo Universal (UTC) u Onda Coseno Universal

La fase de sincrofasores de distintos lugares es relativa a una referencia común (referencia dada por la estampa de tiempo del instante UTC en que son medidos)
 \Rightarrow se requiere sincronización horaria muy precisa

¿Y qué es un Sincrofasor?



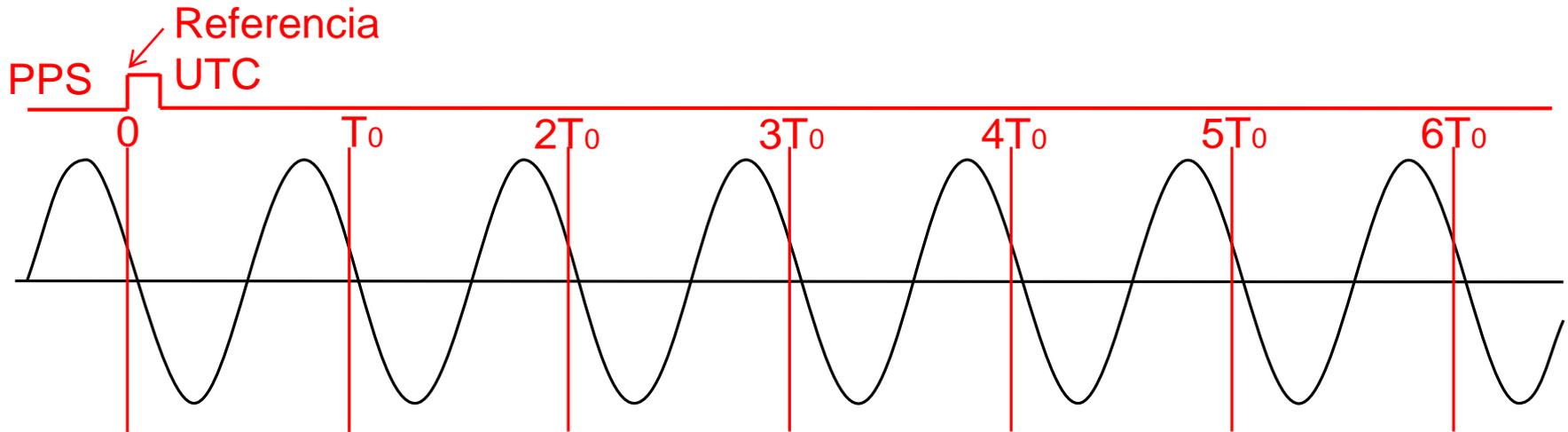
Generalización del Sincrofasor

Definición para amplitud y frecuencia variables (generalización)

$$x(t) = X_m(t) \cos \left(2\pi \int f dt + \phi \right) \leftrightarrow \boxed{\bar{X}(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \int g dt + \phi)}}$$
$$g(t) = f(t) - f_0$$

- Todas las medidas tienen una base de tiempo común referida a una frecuencia común (la nominal).
- Entonces los ángulos de fase son comparables directamente.
- La estimación del sincrofasor incluye el efecto de oscilaciones y variaciones de frecuencia.
- Para determinar \emptyset es necesario un reloj preciso que de el tiempo UTC.

Caso particular: $f = f_0 = 50 \text{ Hz}$



$$x(t) = X_m(t) \cos \left(2\pi \int f dt + \phi \right)$$

$$g(t) = f(t) - f_0$$

$$\bar{X}(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \int g dt + \phi)}$$

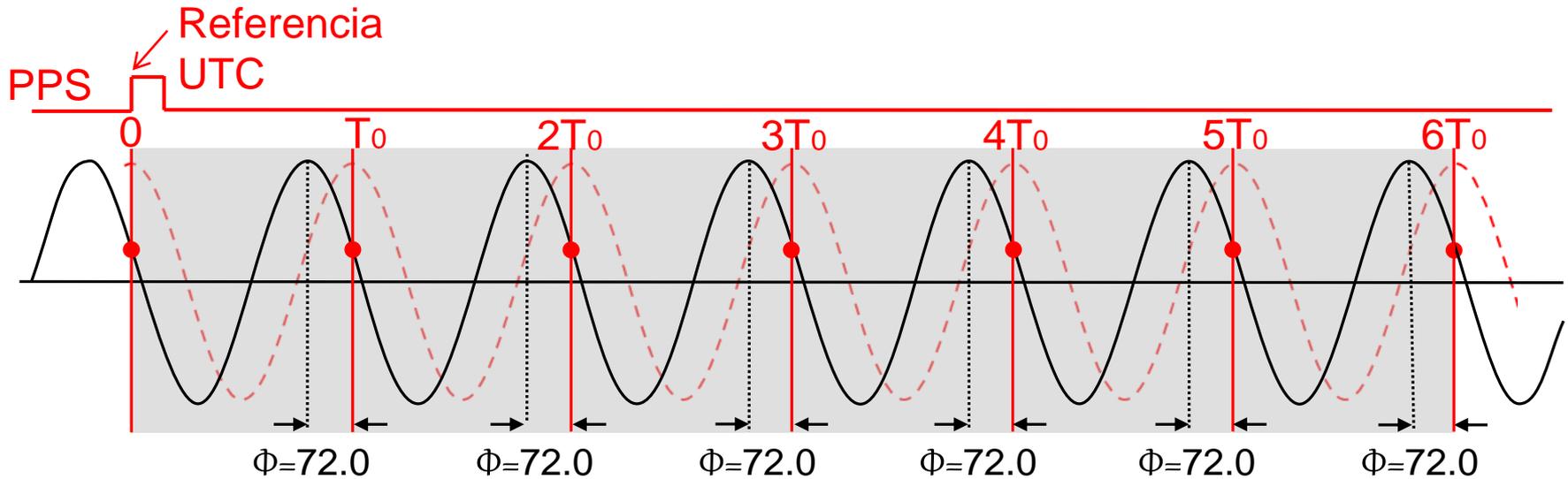
$$x(t) = X_m \cos \left(2\pi \int f_0 dt + \phi \right)$$

$$g(t) = f_0 - f_0 = 0$$

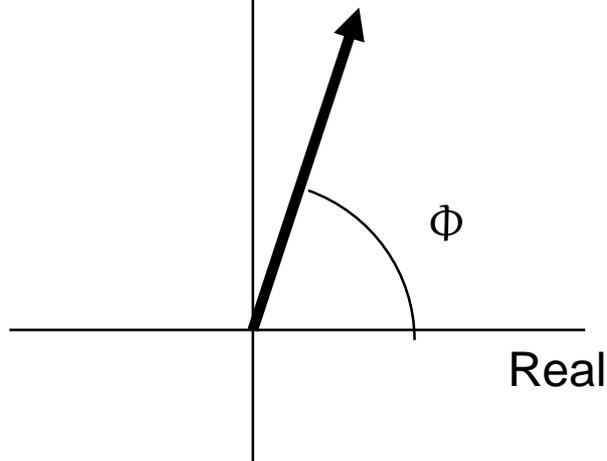
$$\bar{X}(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi}$$

cte

Caso particular: $f = f_0 = 50 \text{ Hz}$

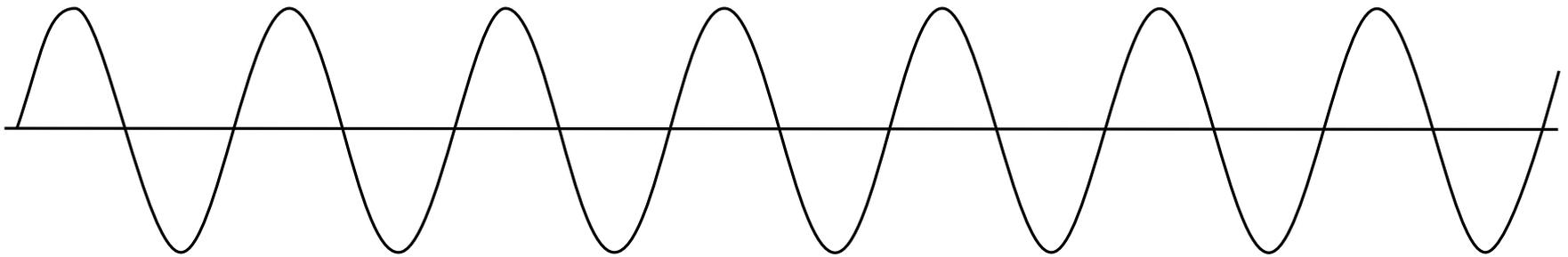


Imaginario



Tiempo	Frac.	Módulo	Fase
12:00:00	.00	$X_m/\sqrt{2}$	72°
12:00:00	.02	$X_m/\sqrt{2}$	72°
12:00:00	.04	$X_m/\sqrt{2}$	72°
12:00:00	.06	$X_m/\sqrt{2}$	72°
12:00:00	.08	$X_m/\sqrt{2}$	72°
12:00:00	.10	$X_m/\sqrt{2}$	72°

Otro caso particular: $f = 51 \text{ Hz} \neq f_0$



$$x(t) = X_m(t) \cos\left(2\pi \int f dt + \phi\right) \neq \cancel{x(t) = X_m \cos\left(2\pi \int f_0 dt + \phi\right)}$$

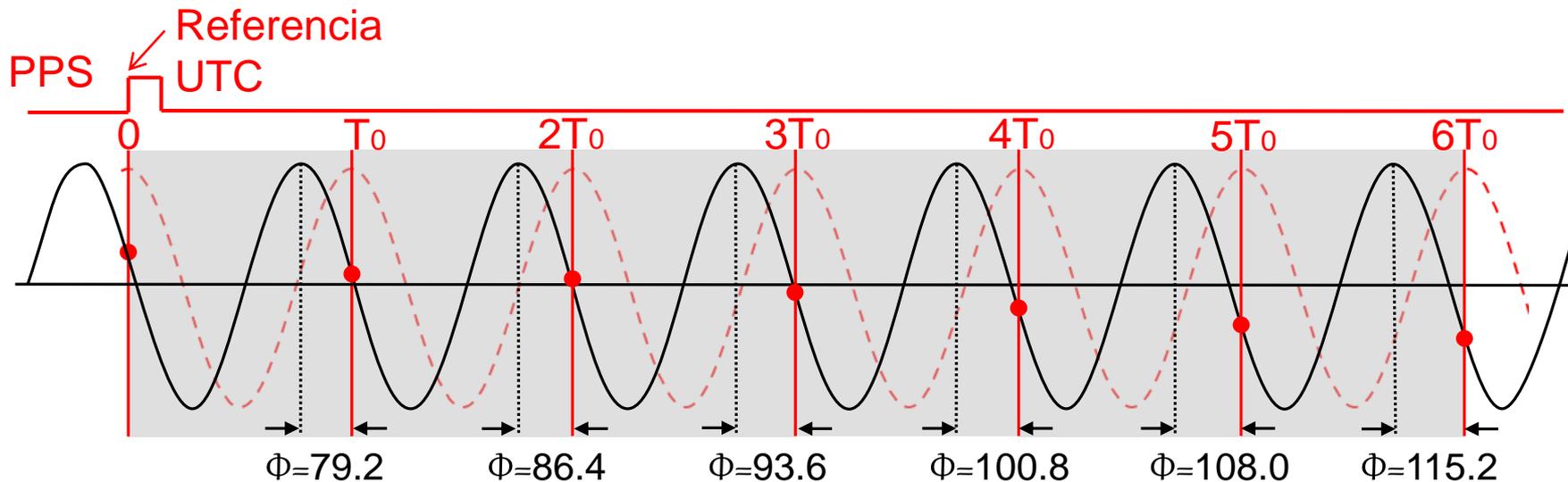
$$g(t) = f(t) - f_0$$

$$g(t) = f - f_0 = \Delta f = 1 \text{ Hz}$$

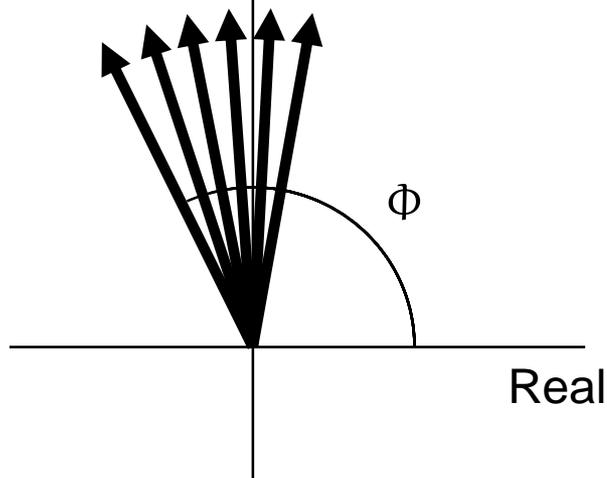
$$\bar{X}(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \int g dt + \phi)}$$

$$\bar{X}(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi \Delta f t + \phi)}$$

Otro caso particular: $f = 51 \text{ Hz} \neq f_0$



Imaginario



Tiempo	Frac.	Módulo	Fase
12:00:00	.00	$X_m/\sqrt{2}$	79.2°
12:00:00	.02	$X_m/\sqrt{2}$	86.4°
12:00:00	.04	$X_m/\sqrt{2}$	93.6°
12:00:00	.06	$X_m/\sqrt{2}$	100.8°
12:00:00	.08	$X_m/\sqrt{2}$	108.0°
12:00:00	.10	$X_m/\sqrt{2}$	115.2°

¿Qué es una PMU?

PMU (*Phasor Measurement Unit*)

Equipo (IED – Intelligent Electronic Device) o **Función** de un IED que produce estimaciones de:

- **Sincrofasores (tensión y/o corriente)** (de fases y/o de secuencia)
- **Frecuencia**
- **Variación de frecuencia** (ROCOF – Rate of Change of Frequency)

Debe

- Reportar las medidas a una tasa constante. Para 50 Hz: $F_s = 10, 25$ o 50 *fps* (veces/s)

Puede

- Tener otras funciones (protección, oscilografía, registro, ...) en el IED
- Reportar otras medidas (analógicas, digitales, muestras, ...)

Sincrofasores y PMU (errores)

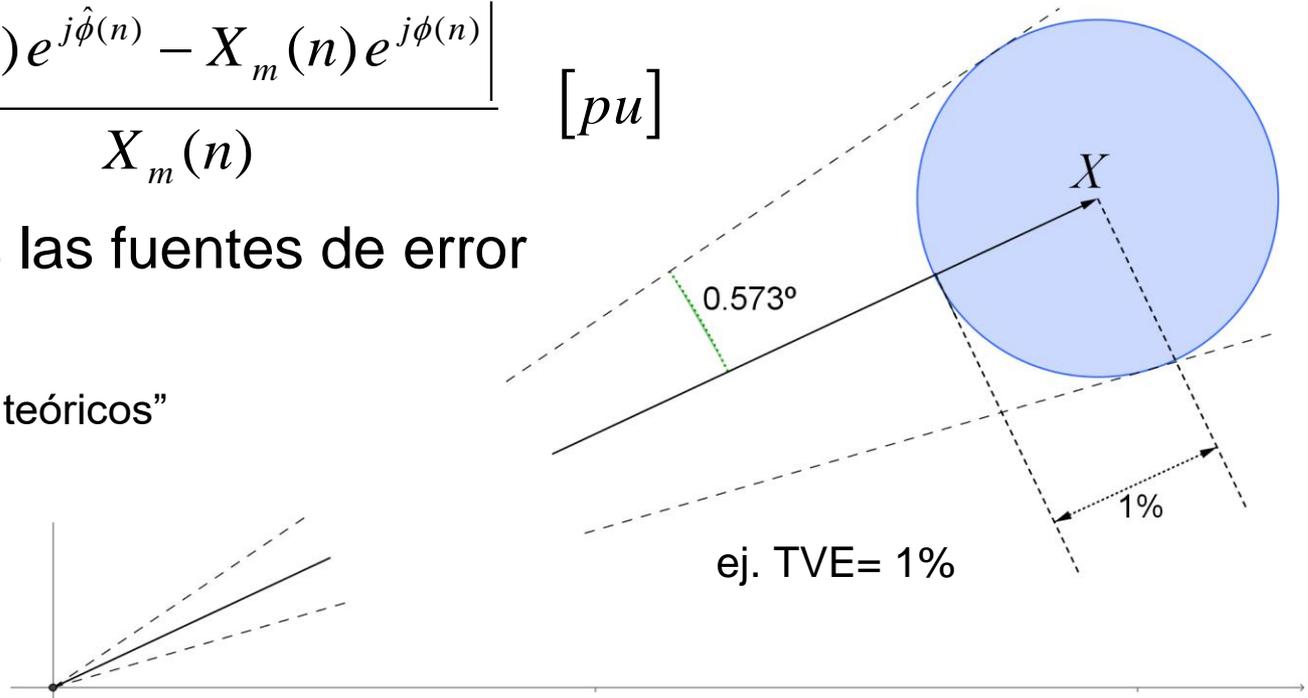
TVE (Total Vector Error o Error Total del Vector)

$$TVE(n) = \frac{|\hat{X}_m(n)e^{j\hat{\phi}(n)} - X_m(n)e^{j\phi(n)}|}{X_m(n)} \quad [pu]$$

combina todas las fuentes de error

Estimación = Medida

Valores “verdaderos o teóricos”



$$TVE = \pm 1\% \leftrightarrow \text{error } \pm 0,573^\circ \leftrightarrow \text{error } \pm 31,8 \mu\text{s}$$

Sincrofasores y PMU (errores)

TVE (Total Vector Error o Error Total del Vector)

Norma IEEE C37.118.1-2011 y enmienda C37.118.1a-2014

Causa de error	Error en grados	Error en μs	TVE en %
Sincronización horaria	$\pm 0,018^\circ$	$\pm 1 \mu\text{s}$	$\pm 0,031 \%$
Transformador de medida clase 0,5	$\pm 0,33^\circ$	$\pm 19 \mu\text{s}$	$\pm 0,58 \%$ $\pm 0,5 \%$ (*)
PMU	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 5,6 \mu\text{s}$	$\pm 0,17 \%$

(*) error en amplitud

⇒ Se requiere sincronización horaria con error $< 1 \mu\text{s}$

por ej. mediante

- GPS e IRIG-B 004 (con o sin PPS),
- PTP (IEC 61588-2009 - IEEE 1588-2008) y su power profile IEEE C37.238-2011

Sincrofasores y PMU (errores)

Comparación con cálculo de fasores mediante DFT
(visto anteriormente en este curso)

Para cumplir los requerimientos de la norma IEEE C37.118.1
(estar por debajo de los errores máximos aceptables
en régimen y en comportamiento dinámico, etc.)

- No alcanza con usar DFT (por ej. recordar dificultad con $f \neq f_N$)
- La ventana sería de más de 1 ciclo de la fundamental
 - los algoritmos reales de estimación de sincrofasores son secreto de los fabricantes
 - la norma presenta un modelo de referencia de estimación de sincrofasores, frecuencia, ROCOF, etc.

¿Qué es un PDC?

PDC (*Phasor Data Concentrator*)

- Es una función que colecta datos de fasores y eventos discretos de PMUs y otros PDCs y los trasmite a otras aplicaciones.
- Esta función puede existir en un dispositivo dado cualquiera.
- Puede memorizar datos por un corto período (*buffer*) pero no almacenarlos.
- Un modo de operación posible es combinar y alinear los datos en un *stream* de datos sincronizados en el tiempo y enviarlos a otro PDC y/u aplicación.
- Puede incluir otras funciones como: juntar , reenviar, comunicar, validar, convertir protocolos, convertir tasas de reporte, calcular latencias, ajustar las medidas, *buffering*, redundancia o duplicación de manejo de datos, ciber-seguridad , configuración, pedir re-trasmisión,

...

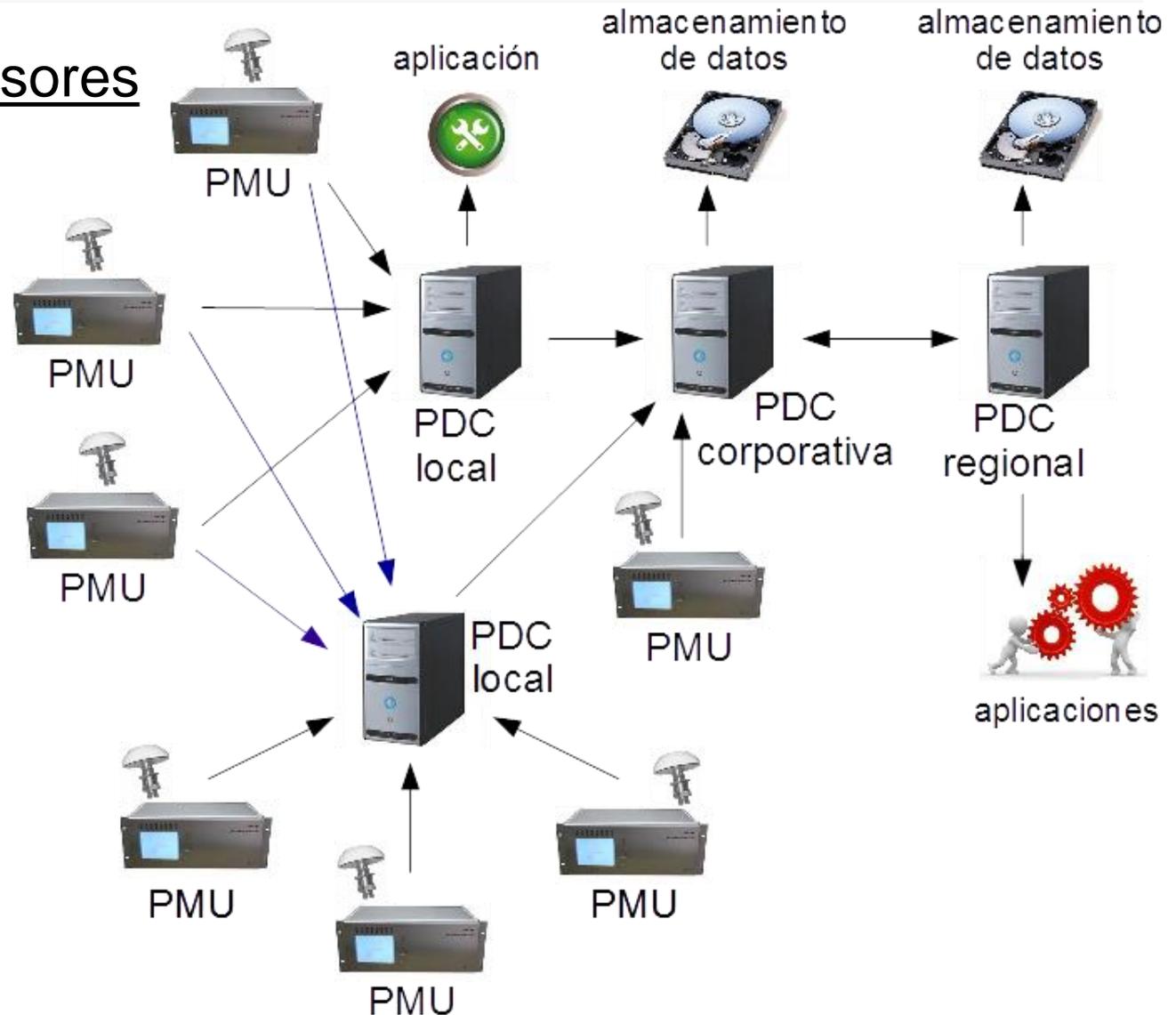
Red de Sincrofasores

Red de Sincrofasores

Un ejemplo

Recordar:

- PMU y PDC son funciones



SPS con sincrofasores y las comunicaciones

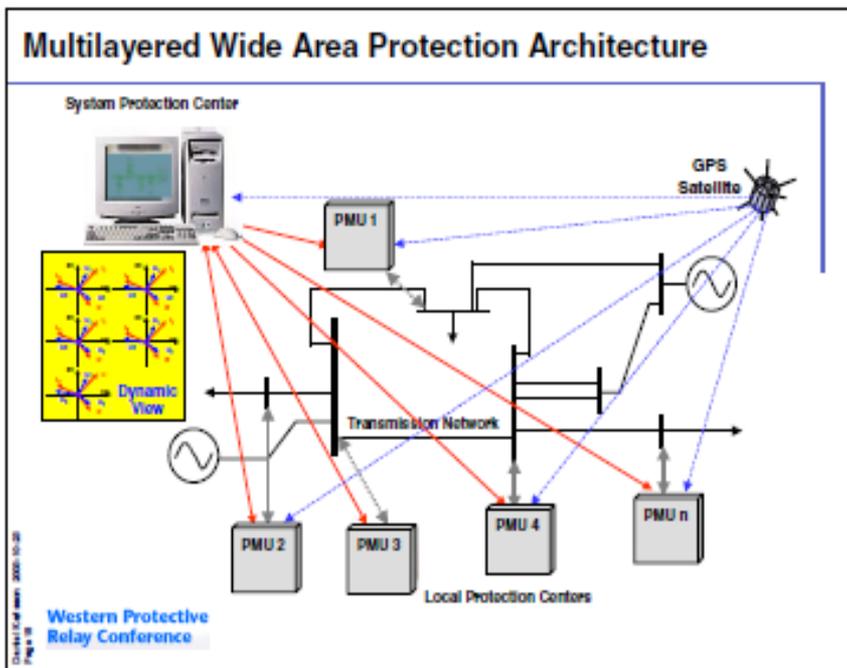
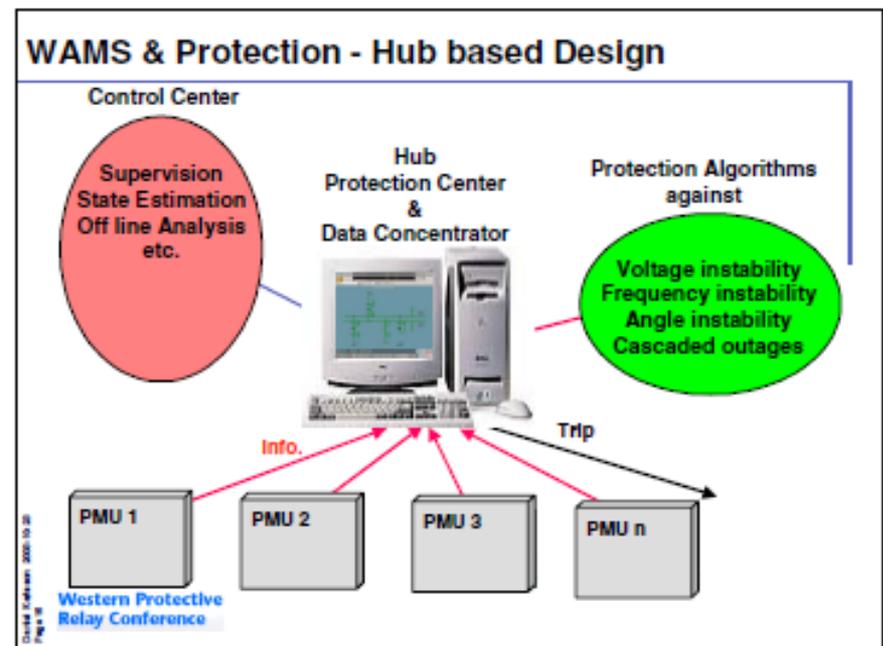


Figure 2: Multilayered wide area protection architecture



SPS con sincrofasores y las comunicaciones

Tipo de SPS basado en la comunicación entre equipos.

El uso de sincrofasores y PMU para SPS precisa comunicación:

- rápida,
- buen ancho de banda (mucha información),
- confiable, con redundancia (separación física, no puede caer por un evento simple)
- adecuada señal durante contingencias
- con formas de verificar su performance
- con formas de monitoreo para evaluar equipos y la disponibilidad de los canales
- que evite operaciones indeseadas (por equipos o personas)

Para las acciones de SPS, el ancho de banda puede no ser crítico,

- PLC (onda portadora o power line carrier) puede ser suficiente

Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection And Control)

HOY

- Operativas fundamentalmente aplicaciones on-line de Monitoreo.
- Se almacenan sincrofasores para:
 - Análisis post-mortem de perturbaciones y accionamientos,
 - Almacenamiento de datos para evaluar ahora y en el futuro posibles y/o futuras aplicaciones de Protección y Control (WAP y WAC).
- Se estudian, crean y analizan aplicaciones y posibles aplicaciones WAP y WAC con simulaciones y datos reales.

Aplicaciones de Sincrofasores

Temas en que se trabaja hoy

- Algoritmos y tecnología de medición de sincrofasores (SMT) y estructura de redes de sincrofasores (PMU/WAMPAC).
- Aplicaciones genéricas de SMT, PMU y WAMPAC.
- Técnicas de localización de PMU.
- Estimación de estado (SE) incluyendo o en base a PMU.
- Validación de modelos, calibración y extracción mediante datos de PMU.
- Detección de eventos y localización de faltas usando datos de PMU.
- Estabilidad dinámica, monitoreo y predicción basados en sincrofasores.
- Estrategias de control basadas en sincrofasores.
- Esquemas de protección basados en sincrofasores.

Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

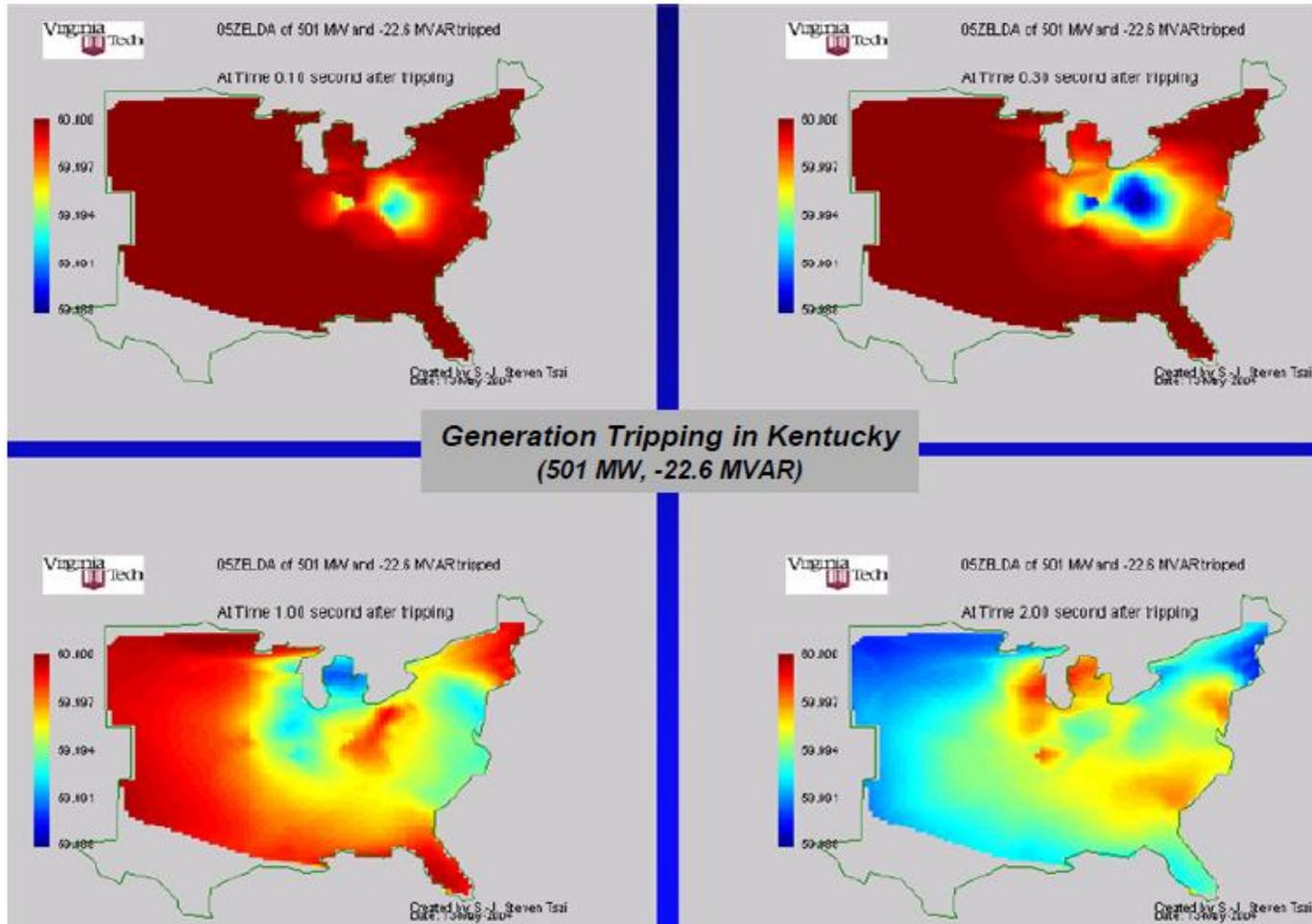
Ángulos, frecuencias, tensiones



Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

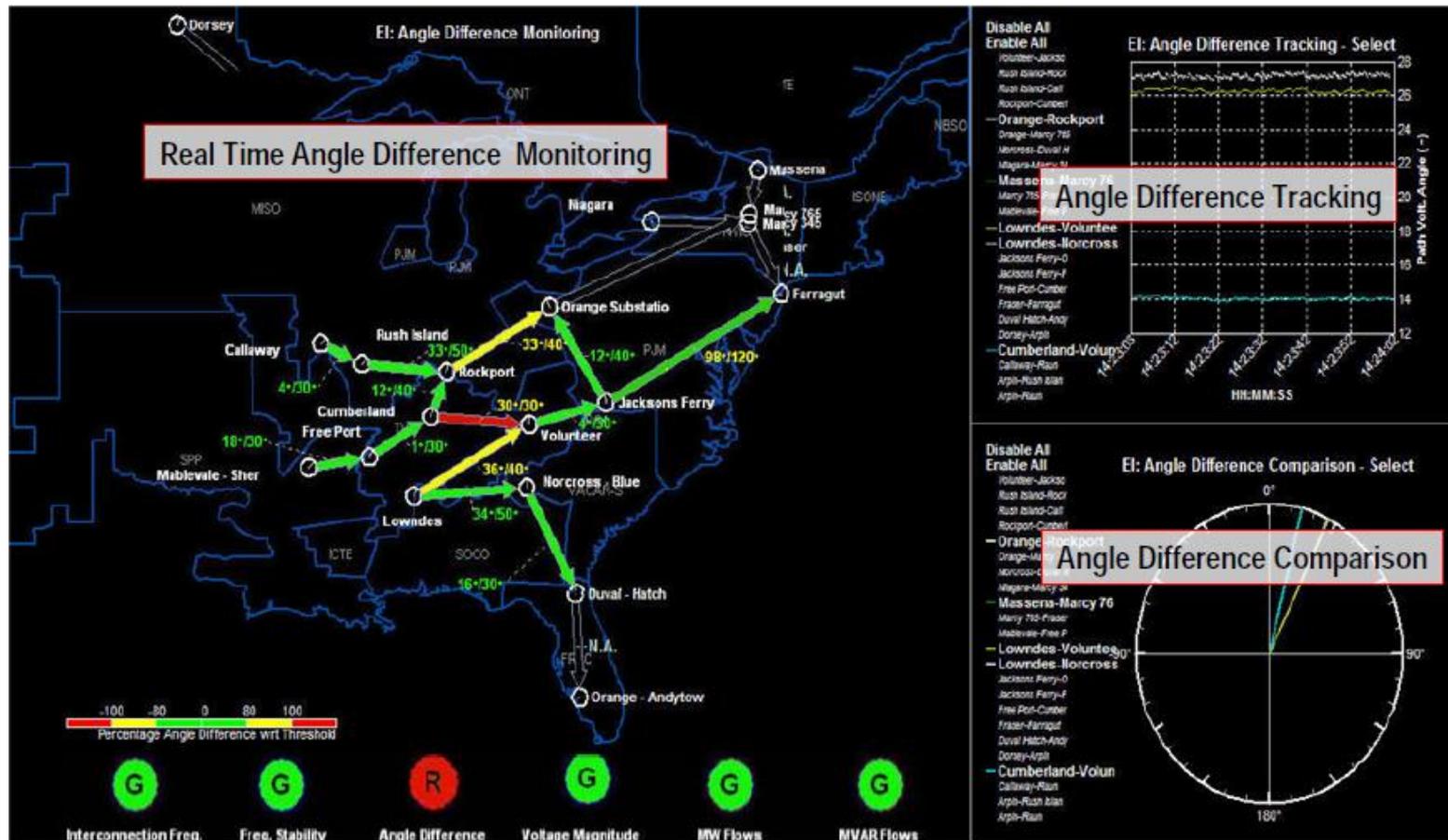
Perfil de tensiones



Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

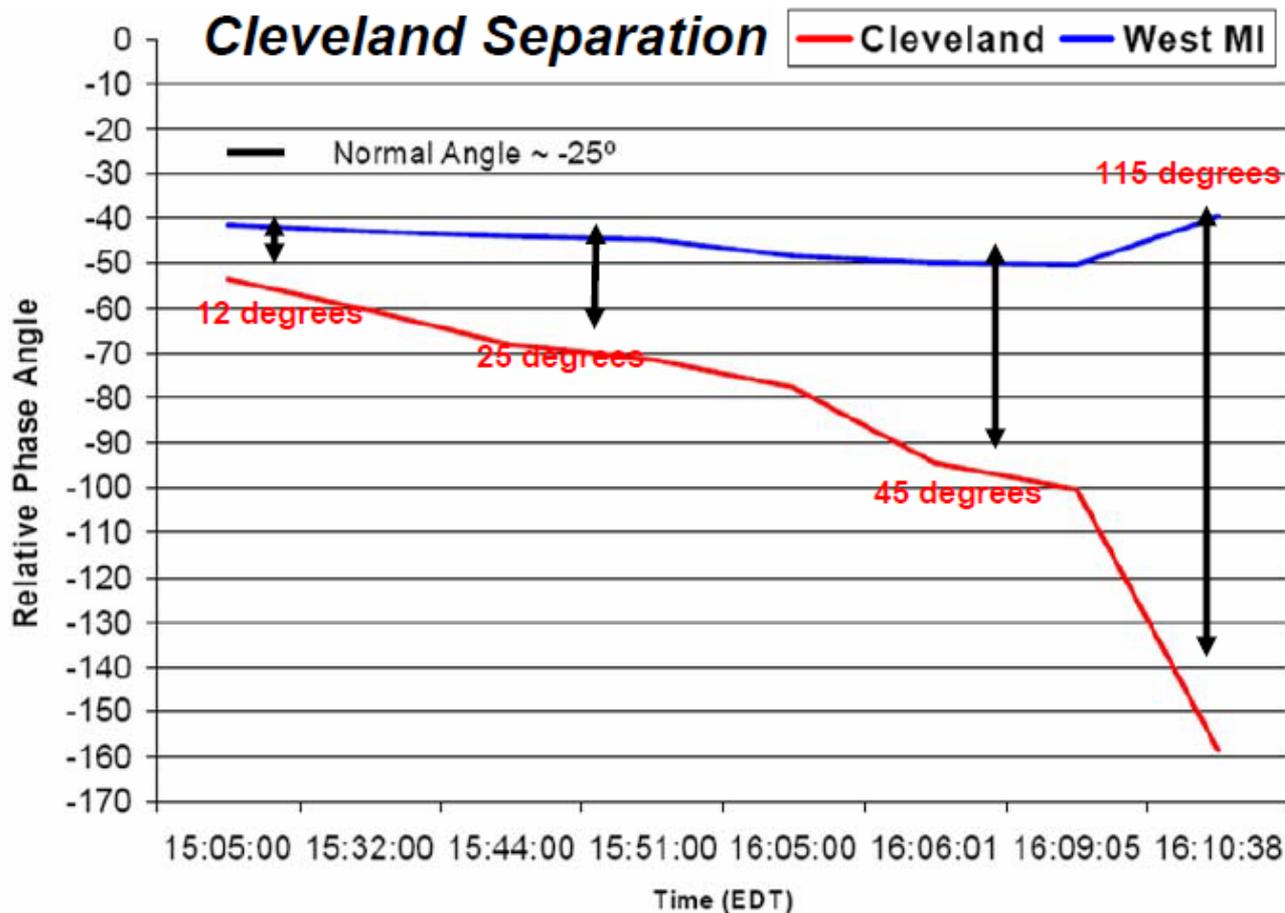
Diferencia angular



Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

Diferencia angular

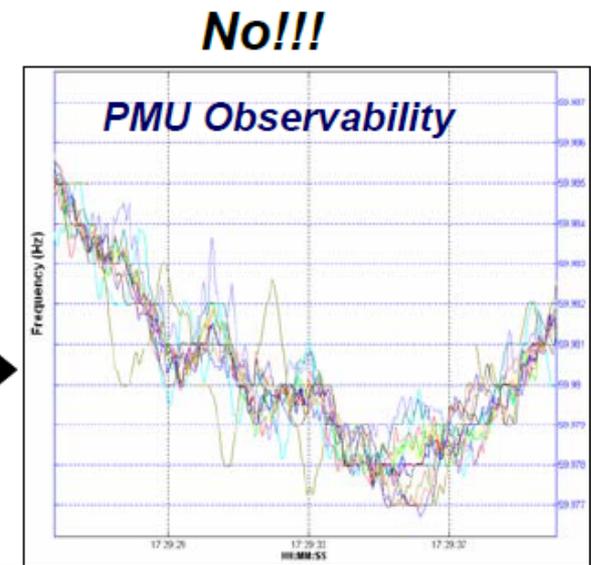
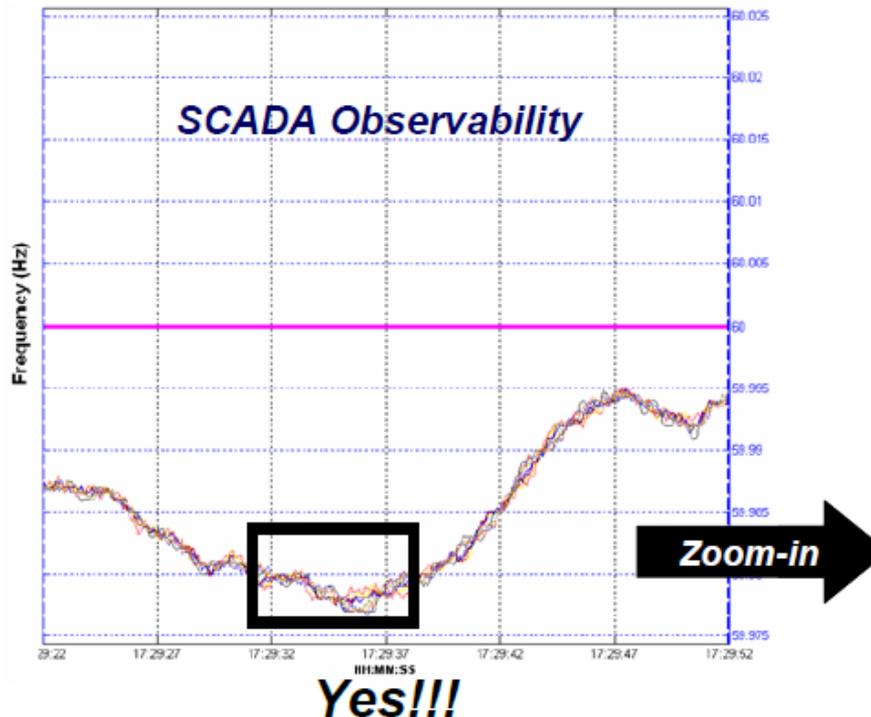


Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

Frecuencia

QUESTION: Is frequency the same across the Interconnection?

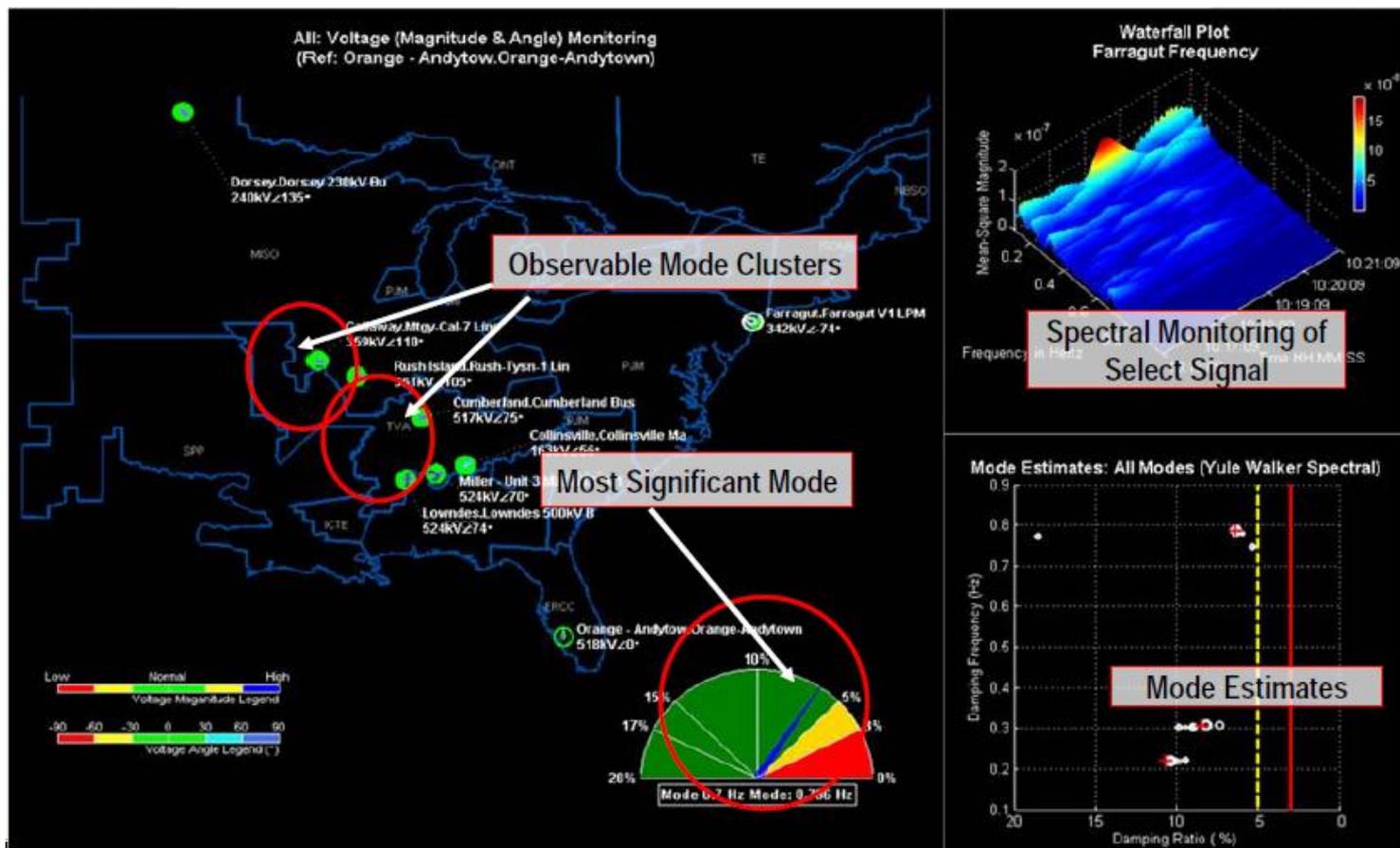


ANSWER 1) The frequency is the same across the Interconnection – almost.
2) Frequency measurements from different locations show small variations.
– associated with inter-area dynamics ('oscillations').

Aplicaciones de Sincrofasores

¿Qué se hace hoy?

Pequeña señal



El estado del arte en SPS con PMU (2008)

- Ver 4, 14, 15

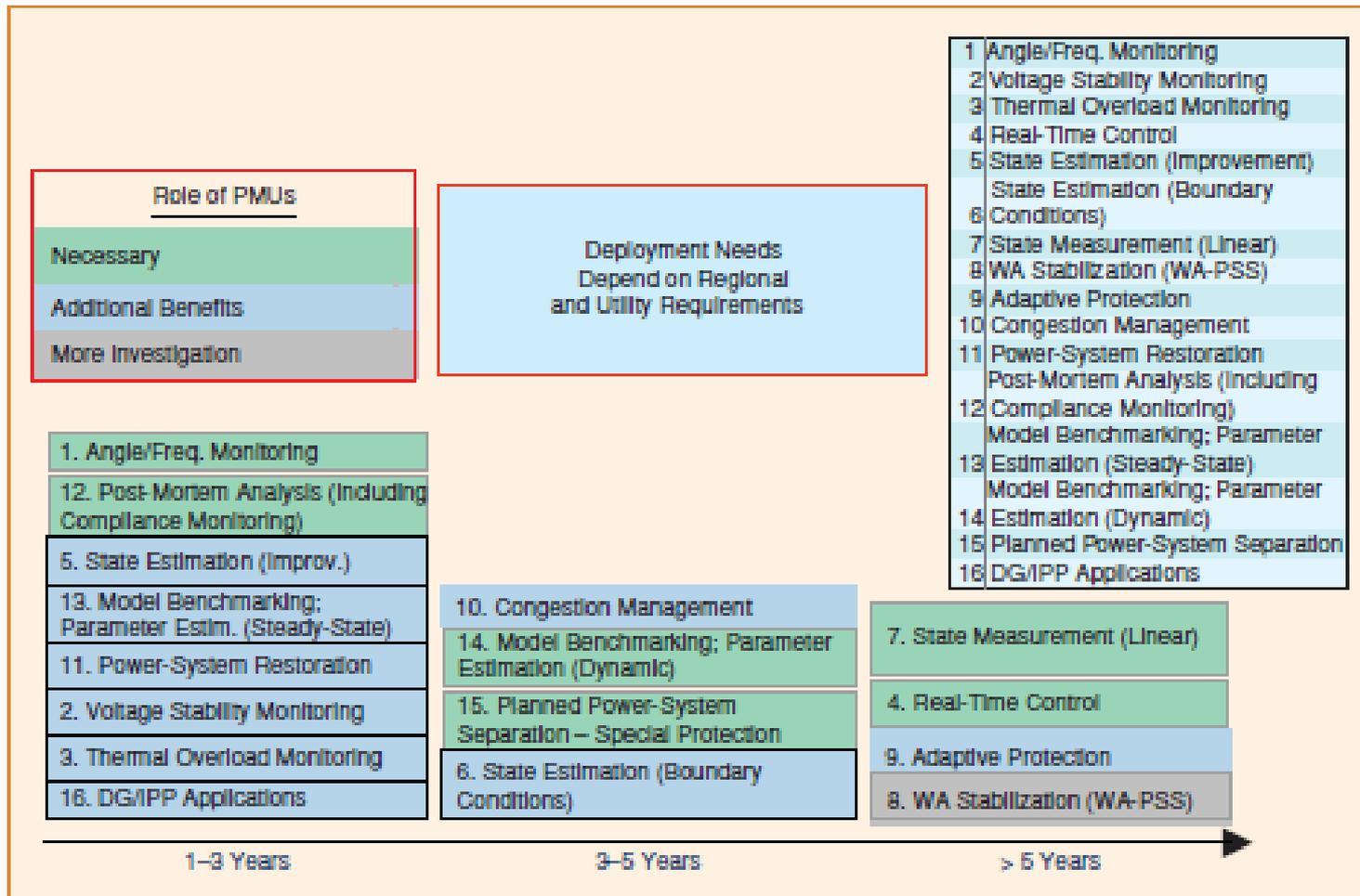


figure 10. Roadmap for deploying PMU applications.

El estado del arte en SPS con PMU (2008)

Application	Benefits and approach	Beneficiaries/Status	Implementation costs/gaps
<i>System Integrity Protection Scheme (SIPS)</i>	<p>Improved planned separation of power system into islands when instability occurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> — More accurate detection whether a power system is heading to an unstable state and if a network separation is necessary to avoid a catastrophic failure. — Dynamically determine islanding boundaries according to the prevailing system conditions (e.g. among which groups of generators the loss of stability is imminent and how to optimally balance load and generation in each island). 	<p>Utilities, ISOs, power producers.</p> <p>Under investigation by a few utilities.</p>	<p>Adding PMU measurements to the existing SIPS is within the scope of the technology. More demanding applications may require a large number of synchronized data points and dedicated fiber-optic channels so that data latency can be limited to less than 50 ms. Coherency detection algorithms and self-sufficient island identification algorithms would need to be further developed and tested.</p>
<i>Adaptive Protection</i>	<p>Improving existing relay algorithms by making certain functions/parameters self-adjustable based on changing system conditions. Some potential applications:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Adaptive security & dependability to avoid cascading. — Improved out-of-step protection schemes (incl. multi-machine instability). — Improved backup protection. — Intelligent load shedding. 	<p>Utilities, ISOs.</p>	<p>Barriers include: dedicated data high-speed communications, field experience, industry acceptance, cost.</p>

El estado del arte en SPS con PMU (2008)

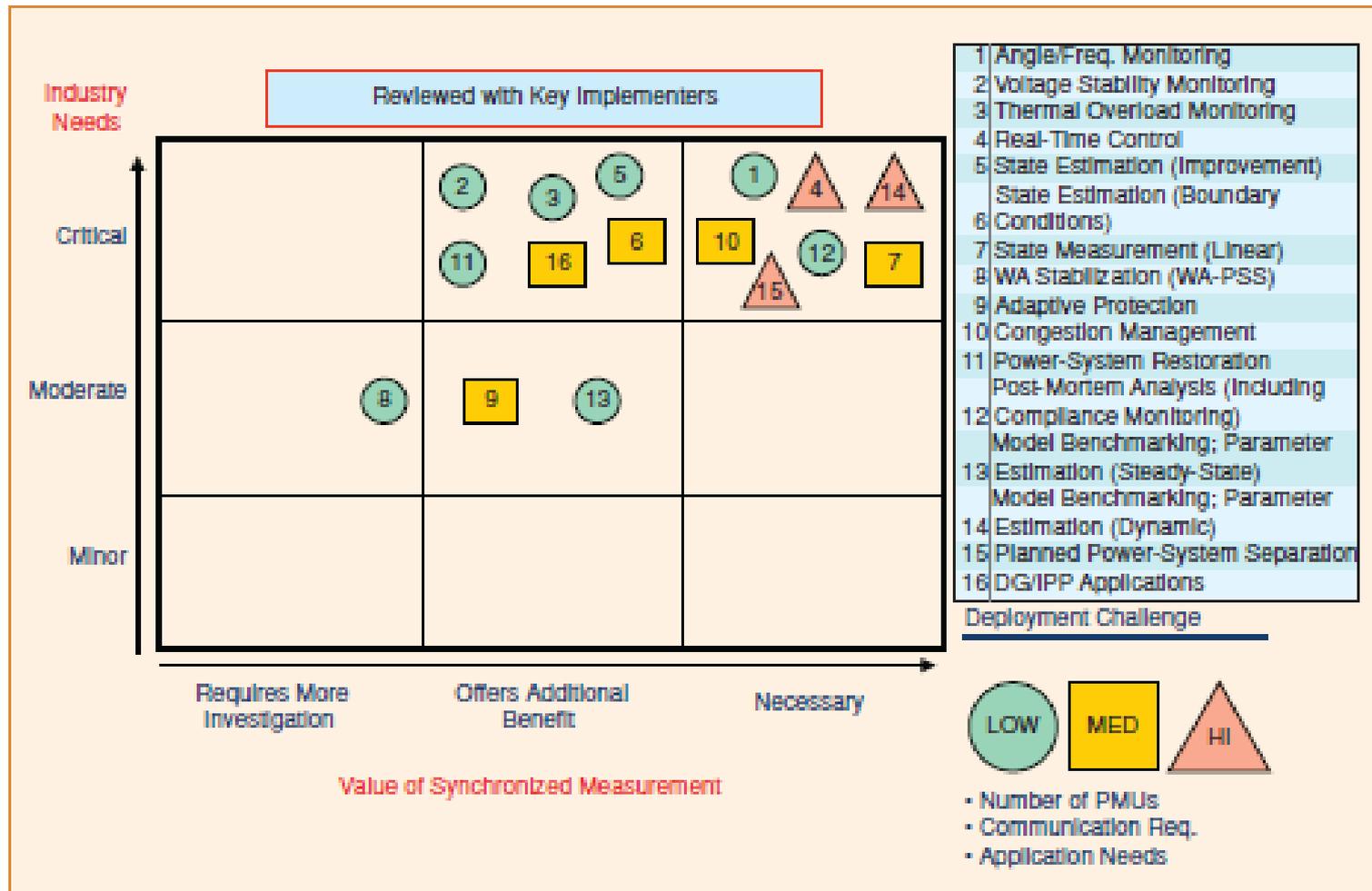


Figure 9. Synchronized measurements and industry needs.