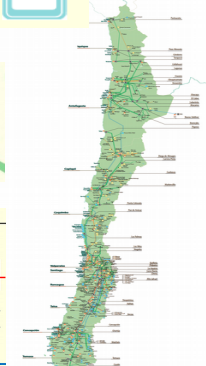
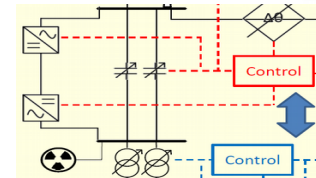
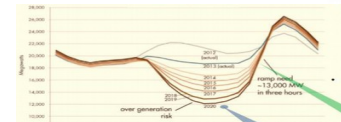
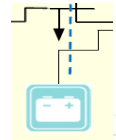
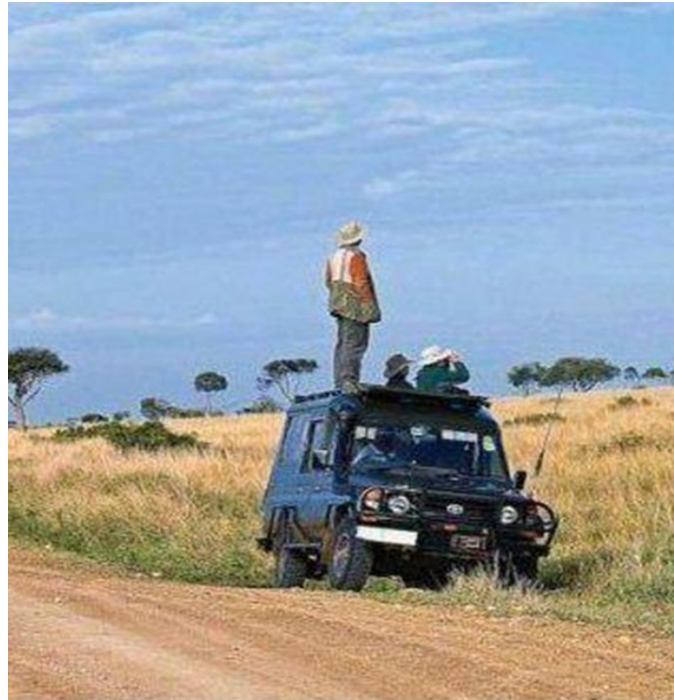


# Automatismos Sistémicos y Monitoreo Dinámico del Sistema Eléctrico Nacional

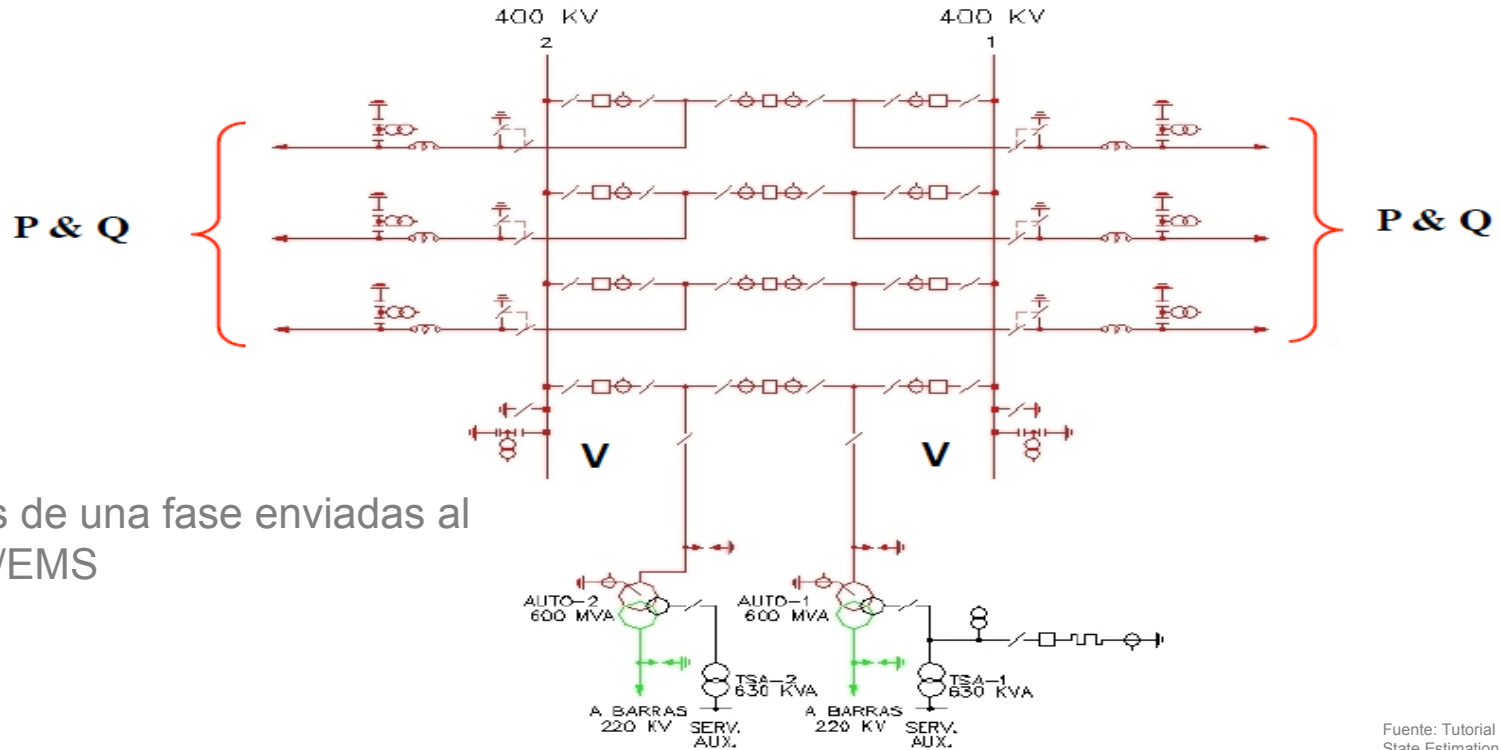


Jorge Vargas Cáceres  
Departamento de Aplicaciones para la Operación  
Gerencia de Operación  
e-mail: [jorge.vargas@coordinadorelectrico.cl](mailto:jorge.vargas@coordinadorelectrico.cl)

# Operar con seguridad y a mínimo costo...

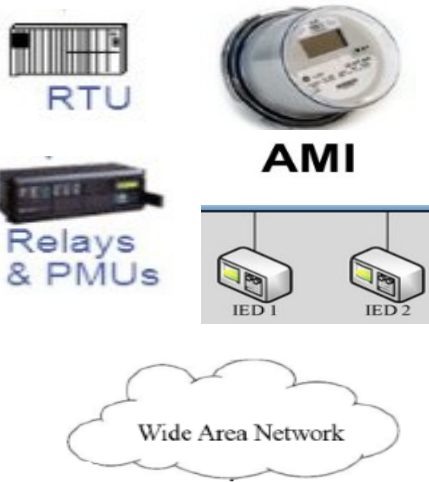


# Desde el monitoreo tradicional basado en RTU...



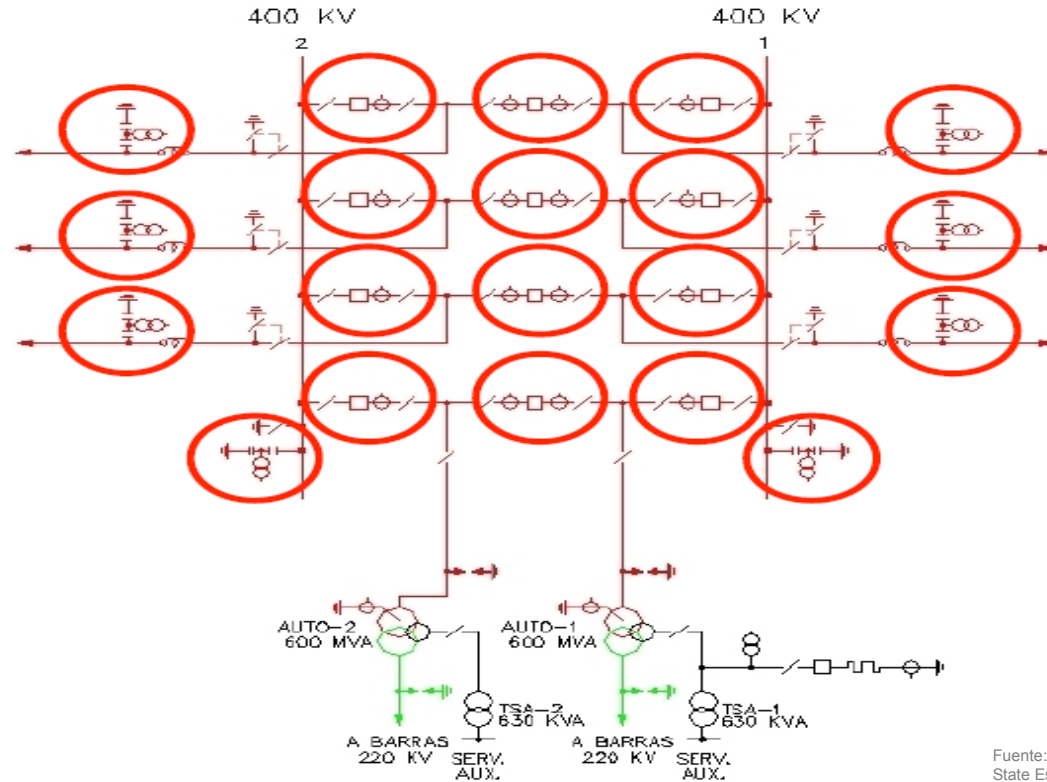
Medidas de una fase enviadas al  
SCADA/EMS

# ...al monitoreo digital (IED, PMU)



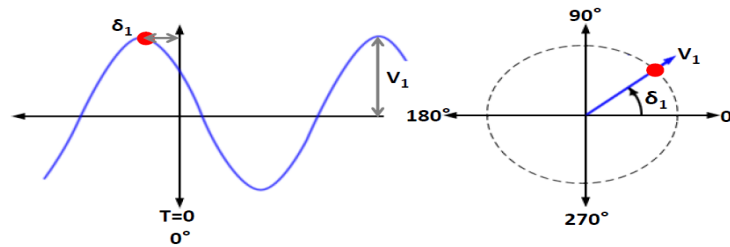
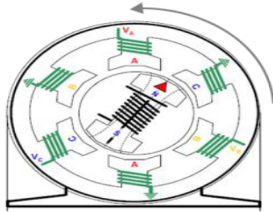
Medidas sincronizadas  
de tres fases

Información crece en un  
orden de magnitud



# El Fasor

- Un fasor es un vector rotativo.
- El fasor de voltaje está definido por la magnitud y el ángulo.
- El ángulo se mide con respecto al tiempo universal ( $T = 0$ ).
- El fasor gira en el sentido contrario a las agujas del reloj, similar al campo magnético giratorio en un generador síncrono.
- Un sincrofasor es un fasor referenciado a 50 Hz, con el ángulo referenciado al tiempo universal ( $T = 0$ ).



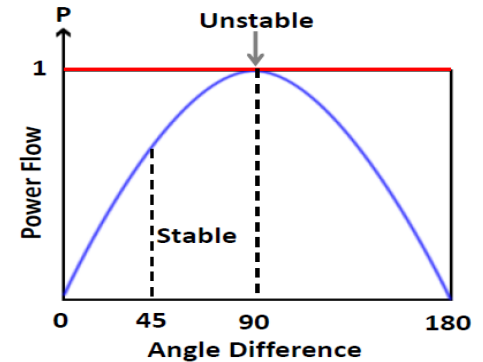
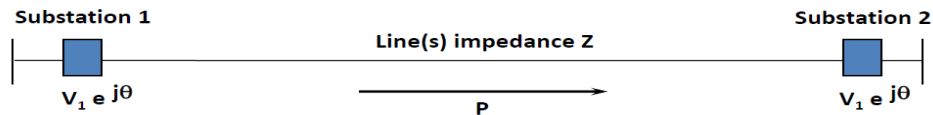
$$x(t) = \sqrt{2}X \cos(2\pi ft + \phi)$$

$$\mathbf{X} = Xe^{j\phi}$$

- Los datos sincrofasoriales proporcionan información dinámica del sistema eléctrico, lo que ayuda a los operadores a iniciar acciones correctivas para mejorar la confiabilidad del sistema de energía.

# Flujo de potencia es función de la diferencia angular

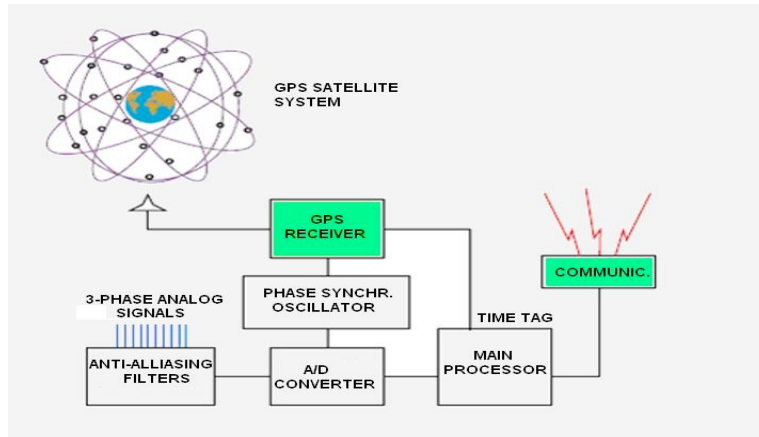
- Ecuación de flujo de potencia:  $P = V1*V2*\text{seno}(\theta-\phi) / X$ .
- La diferencia de ángulo de voltaje entre dos subestaciones se correlaciona con la potencia que se transfiere entre ellas.
- El ángulo de corriente con el ángulo de la tensión describen la potencia real y reactiva de cualquier línea.
- Los flujos de potencia van desde el mayor ángulo de tensión hasta el menor ángulo de tensión.
- Los ángulos de tensión en una red cambian cuando ocurre un evento (por ejemplo, apertura de línea, pérdida de generación o cambio de carga).
- Diferencia angular entre dos PMU distantes indica el relativo estrés a través de la red, incluso si las PMU no están directamente conectadas por una línea simple de transmisión.



FUENTE: Electric Power Group. 2013

# Unidades de medición de fasor (PMU)

- Una referencia de tiempo arbitraria (pero compartida) define los ángulos de fase de un conjunto de formas de onda sinusoidales (fasores).
- Los ángulos de fase relativos son independientes de la referencia de tiempo (fasores sincronizados).
- El GPS proporciona acceso global a un reloj muy preciso (etiqueta de tiempo)
- Los fasores se calculan a partir de una ventana de datos muestreados utilizando DFT



## Capacidades PMU

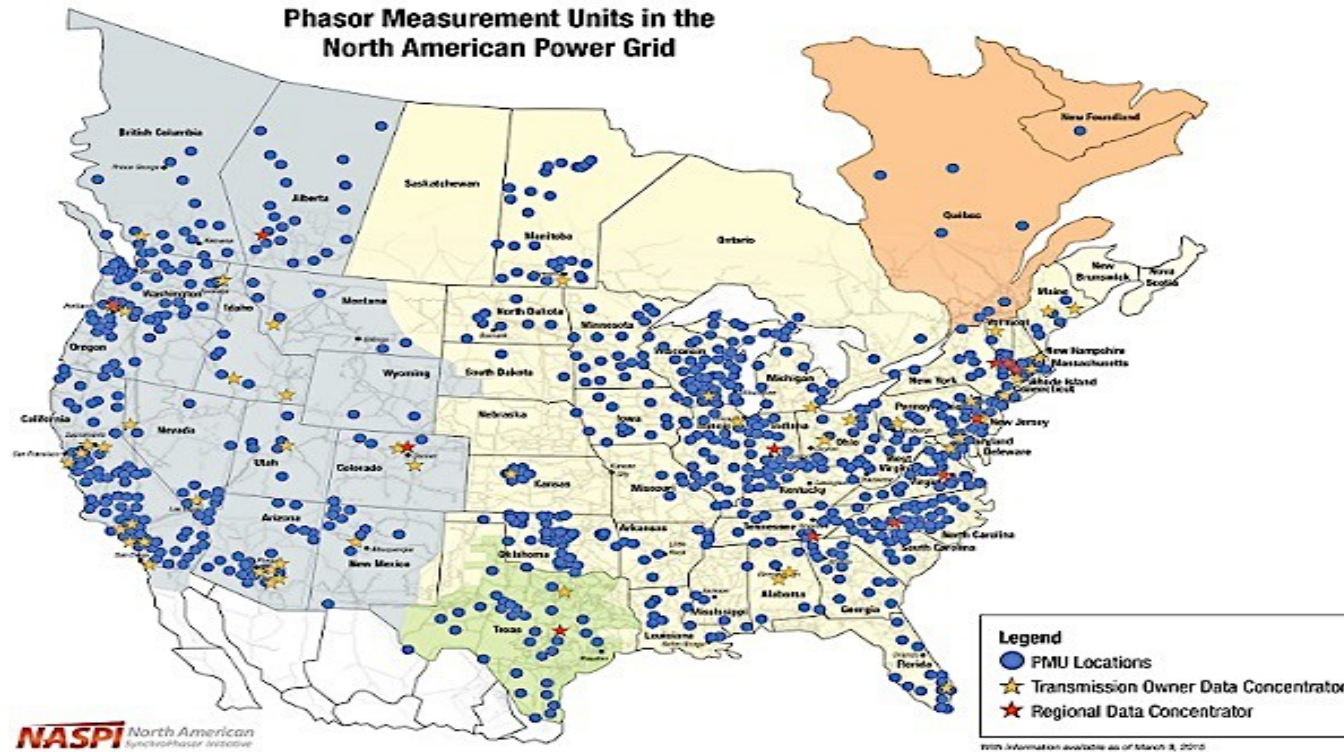
- Corrientes y tensiones
- Secuencia positiva-negativa-cero
- Frecuencia

## Estándar IEEE C37.118

- Definiciones y convenciones
- Límites de error
- Protocolo comunicaciones

FUENTE: A. G. Phadke, J. S. Thorpe, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Springer, 2008.

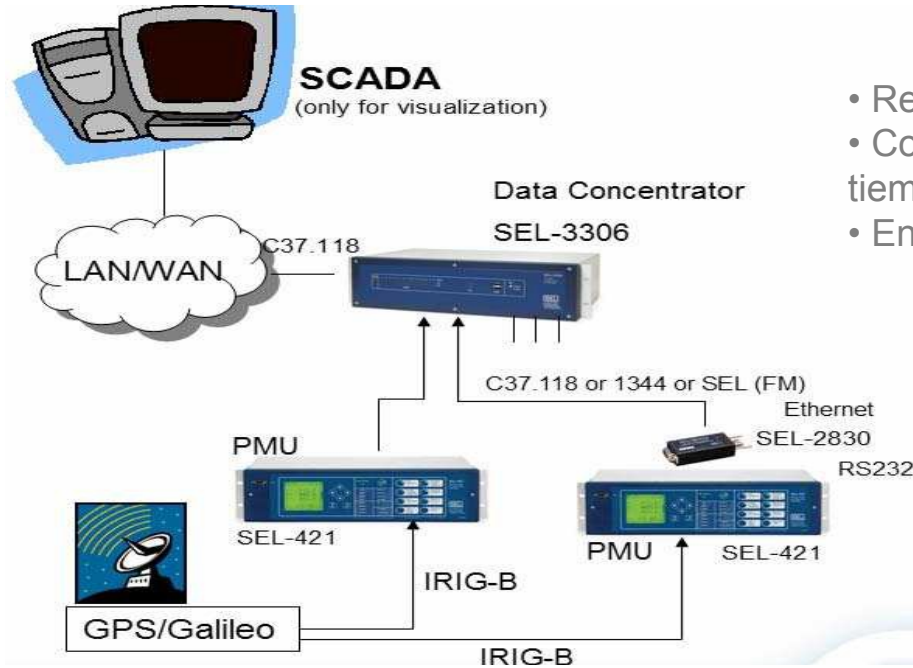
# Unidades de medición de fasor (PMU)



Fuente: NASPI.



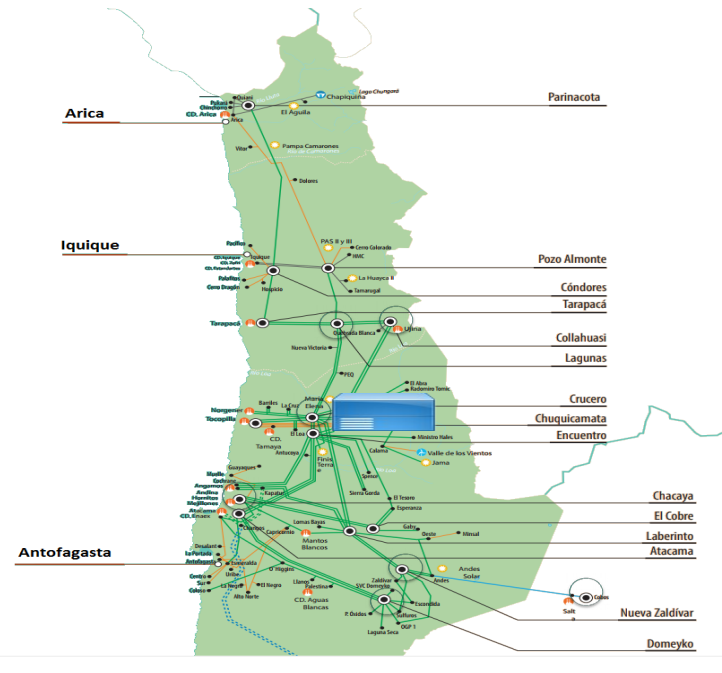
# Concentrador de Datos Fasoriales (PDC)



- Recibe información de PMU y otros PDC
- Correlaciona los datos de fasor etiquetados en el tiempo
- Enlace con SCADA

# Inicios del monitoreo sincrofasorial en Chile

- A finales de 2012 se implementó un proyecto piloto de WAM en el SING.
- Ausencia de marco regulatorio.
- CDEC-SING definió los requerimientos de integración.
- Implementado durante 2014
- Expansión durante 2015
- Crecerá a 11 PMU para el 2017



# Marco regulatorio para Sistemas de Monitoreo



La NT de SyCS de septiembre de 2015 exige la realización de un estudio de implementación de unidades de medición fasorial.

El **Coordinador** es el encargado de definir:

- Arquitectura del Módulo Medición Fasorial
- Puntos de monitoreo
- Aplicaciones requeridas

Los **Coordinados** son responsables de la implementación de las unidades de medición y de los canales de comunicación requeridos.

# Definición de los puntos de monitoreo

Se realiza a partir de la previsión de posibles fenómenos, restricciones, y problemas de estabilidad detectados en estudios de mediano plazo (Estudios Norma Técnica):

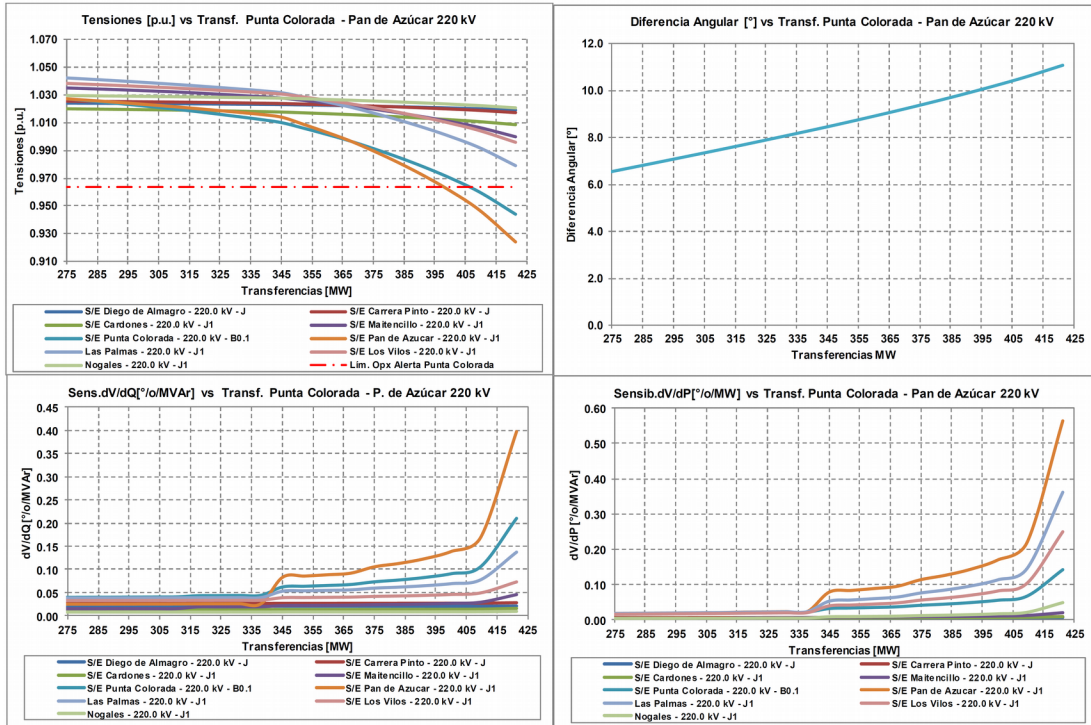
- Limitaciones por estabilidad (tensión, angular, entre otras)
- Estabilidad angular (pequeña señal)
- Control de tensión

Requerimientos particulares:

- Fenómenos detectados en la operación del sistema (oscilaciones no previstas en simulaciones).
- Planes de recuperación de servicio / monitoreo de frecuencia.
- Monitoreo de grandes centros de generación.
- Verificación del desempeño de los Planes de Defensa Contingencias Extremas.
- Instalaciones asociadas a la Interconexión de los sistemas SIC – SING.

# Definición de los puntos de monitoreo, ejemplos

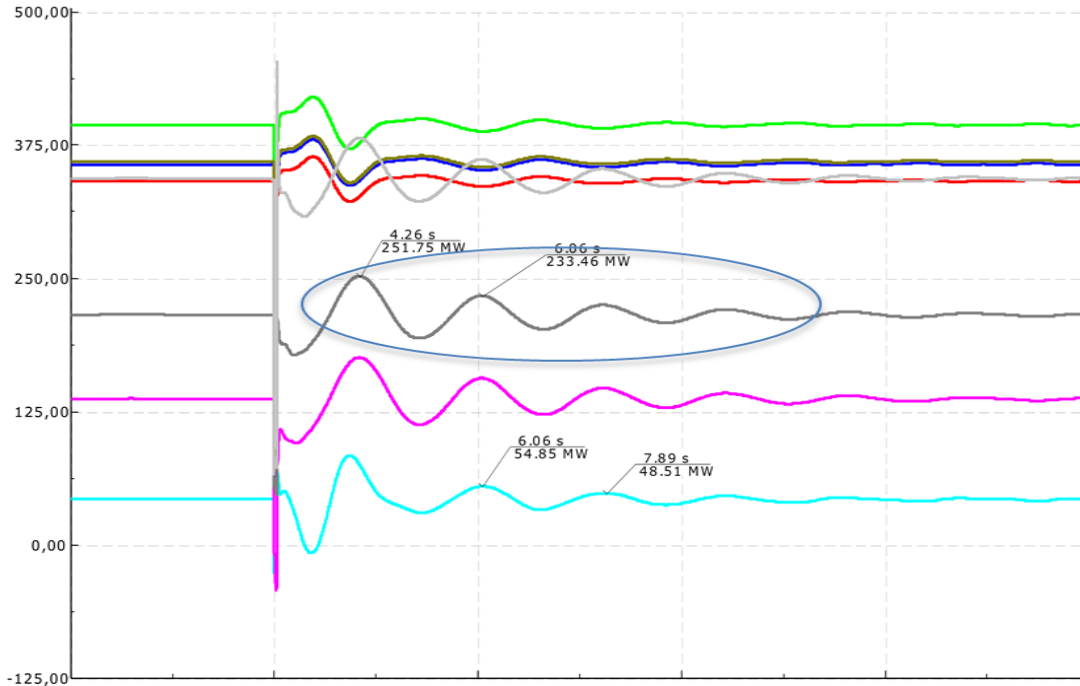
## Ejemplos de Estabilidad de Voltaje



Esto es particularmente interesante en aquellas líneas donde su capacidad operacional está dada por el límite de estabilidad.

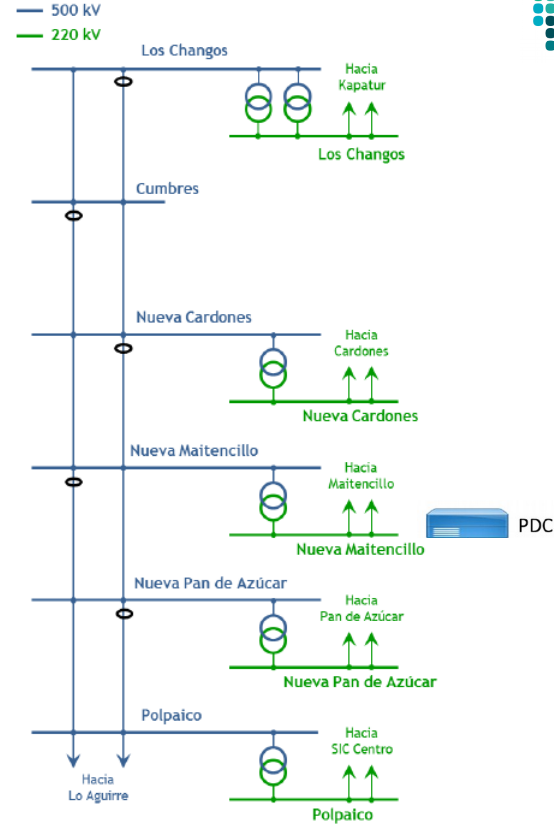
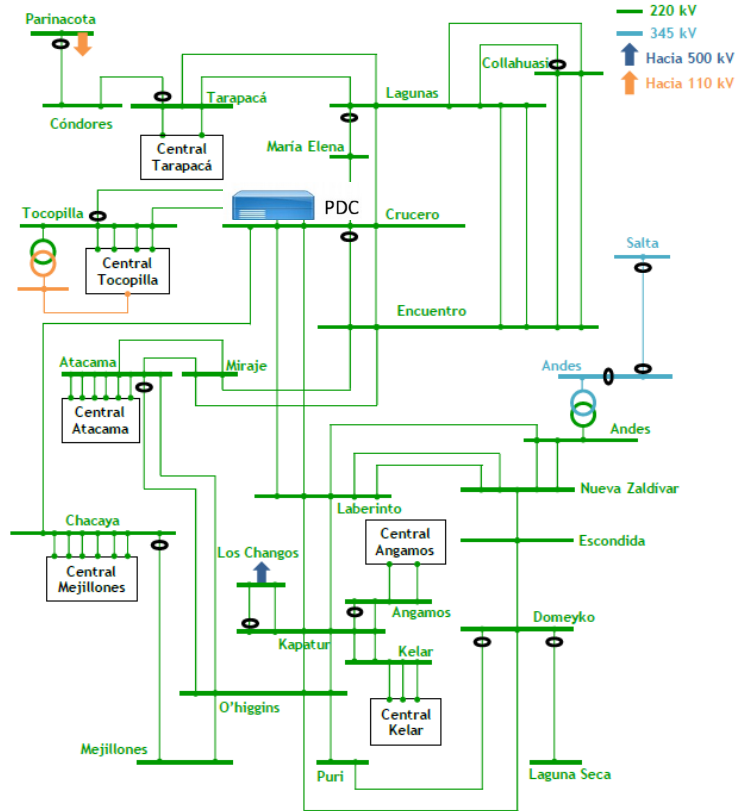
# Definición de los puntos de monitoreo, ejemplos

Fenómeno oscilatorio (pequeña estabilidad de señal))

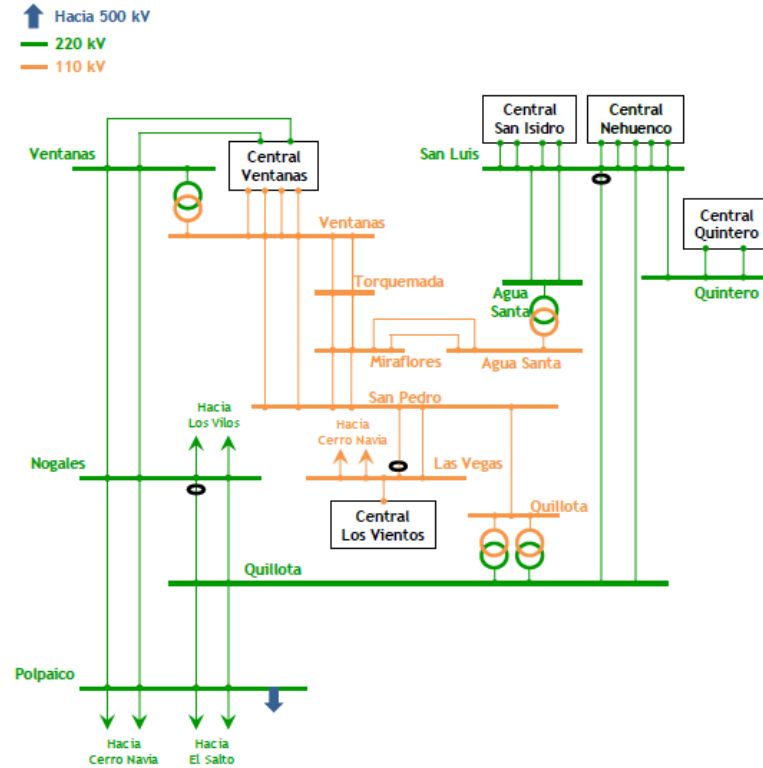
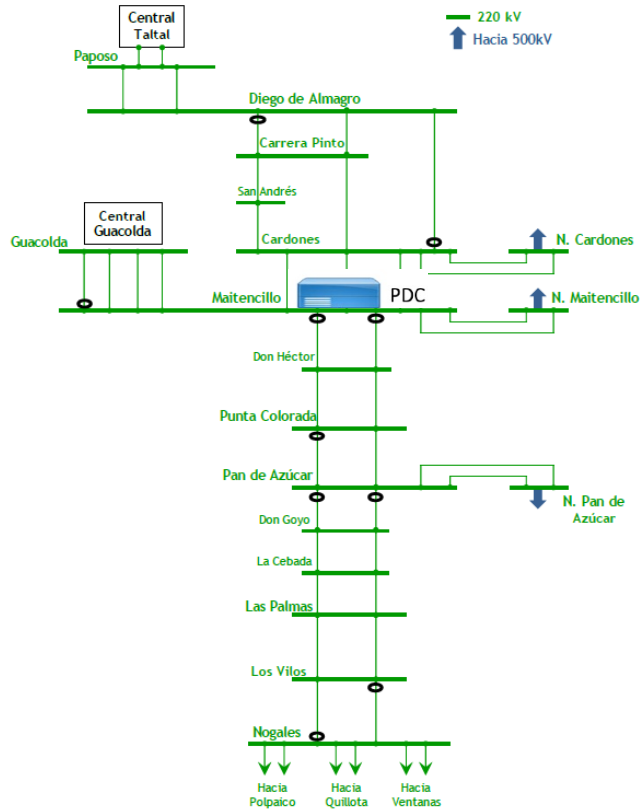


Modo de oscilación post-interconexión

# Ubicación PMU

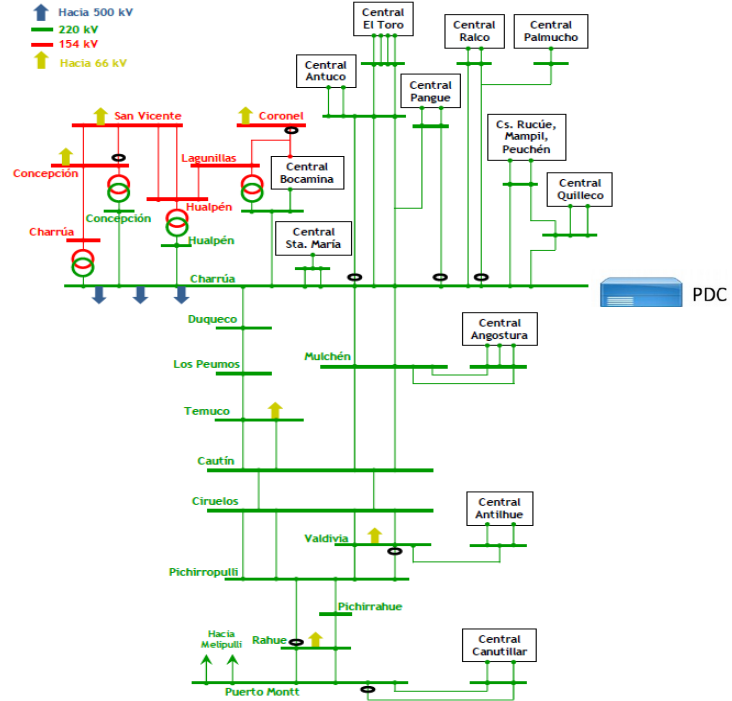
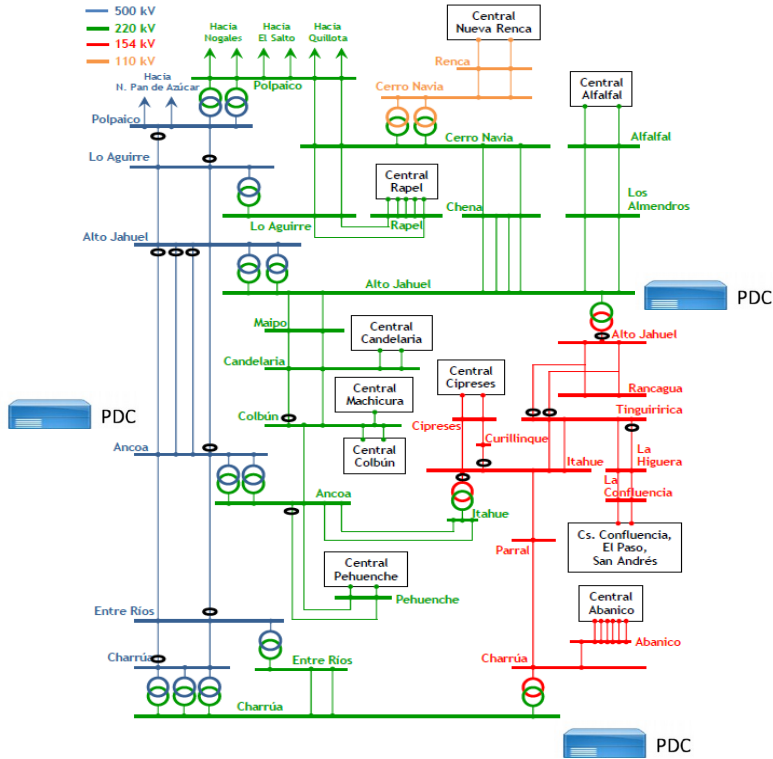


# Ubicación PMU





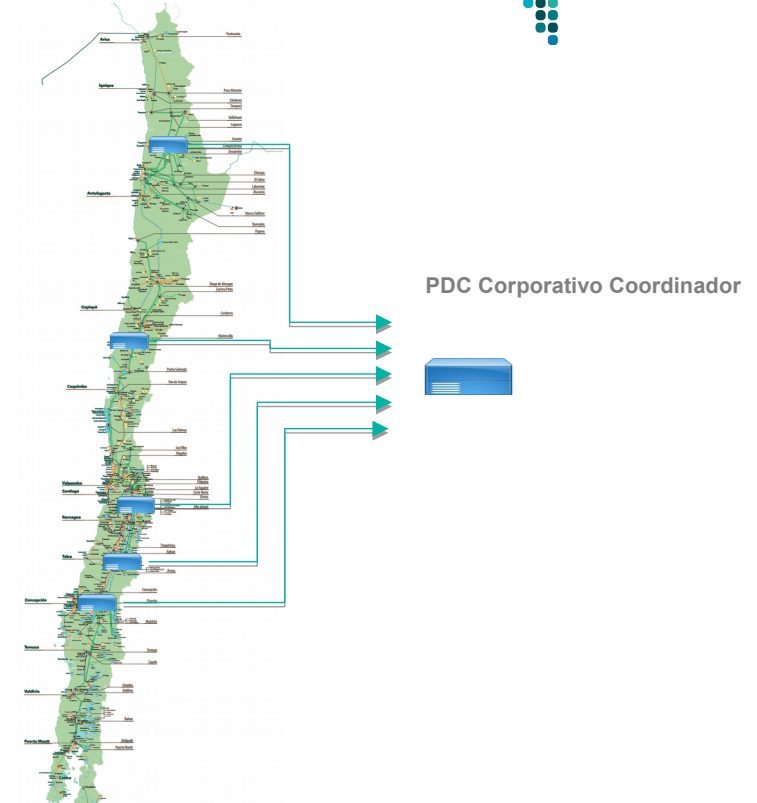
# Ubicación PMU



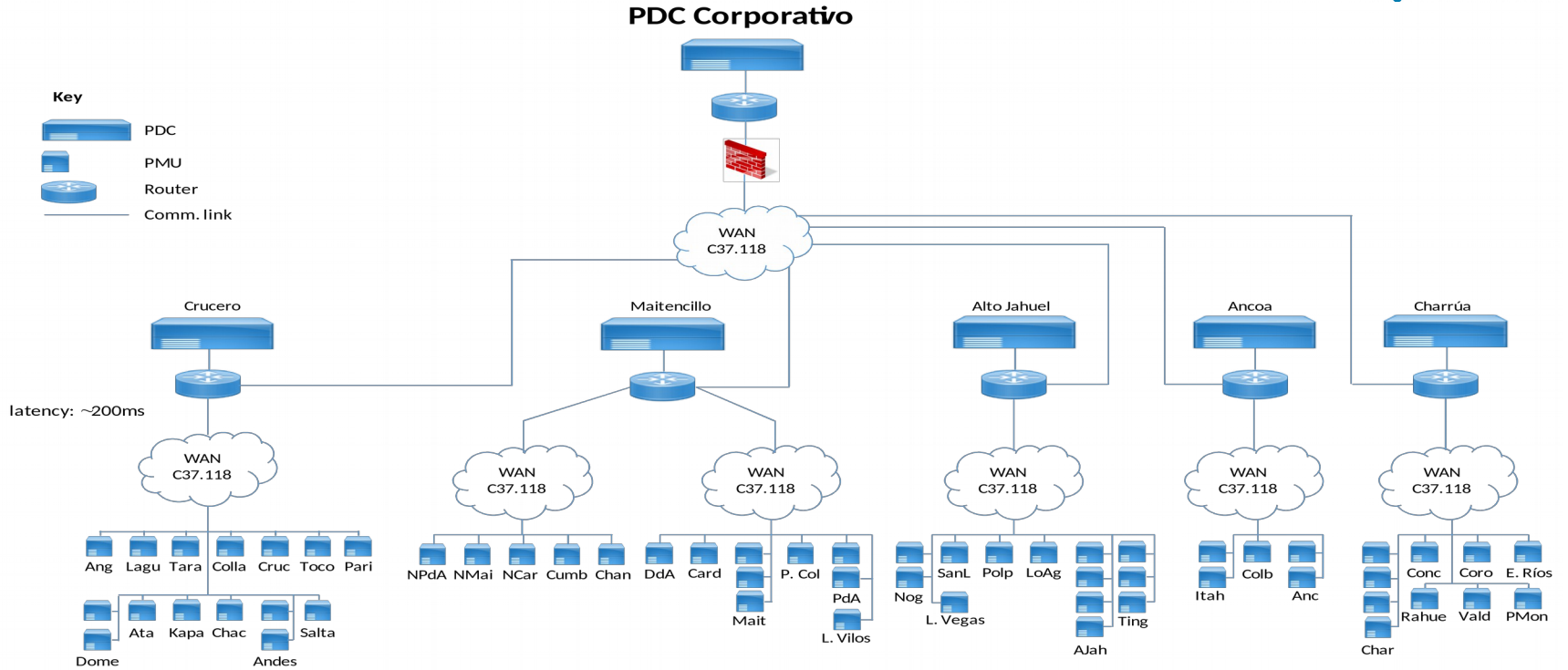
# Arquitectura WAMS del Sistema Eléctrico Nacional

La arquitectura de la red de monitoreo sincrofasorial del Coordinador se realizó considerando:

- Topología del Sistema Eléctrico Nacional.
- Flexibilidad.
- Respaldo de datos.
- Interconexión SIC-SING.
- Futuros centros de control de respaldo autosuficientes en el norte y el sur.
- Futura expansión a WAMPAC (zonal).



# Arquitectura de la red WAMS



# Aplicaciones WAMS

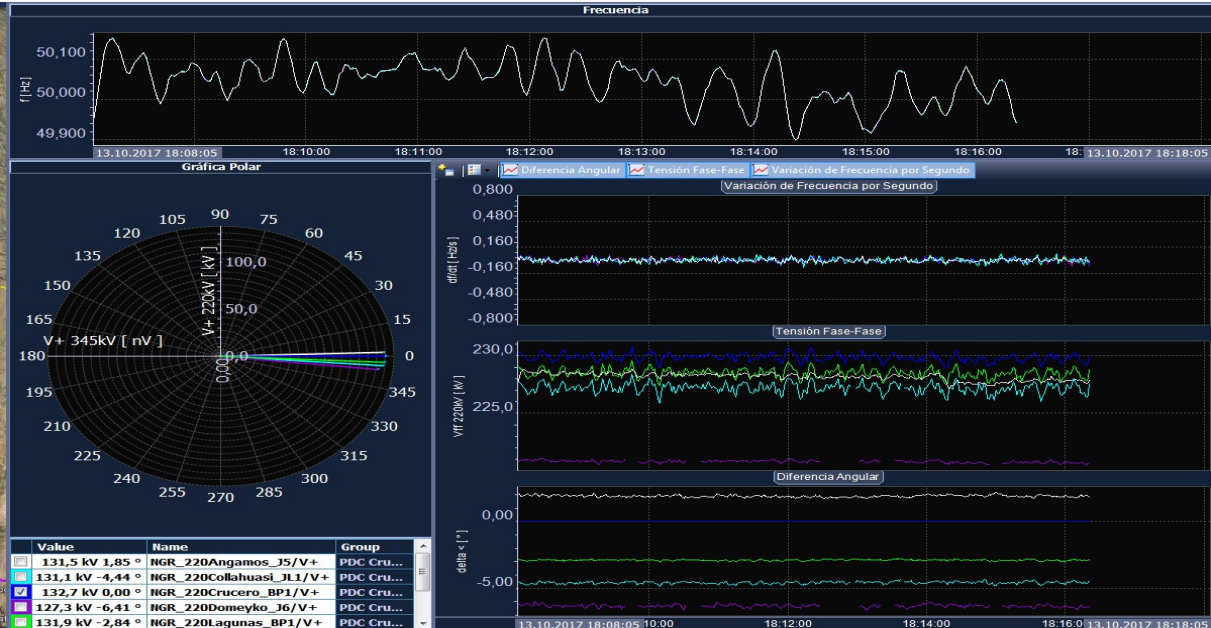
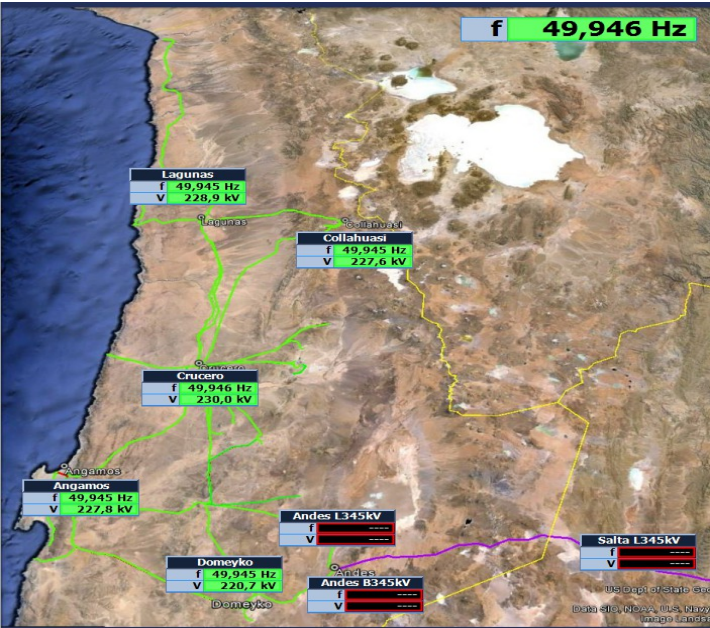
## Detectores disponibles

- Diferencia angular
- Oscilaciones de baja frecuencia
- Fuentes de oscilación
- Aislamiento de redes
- Tasa de cambio de variables (configurable)
- Umbrales (tensión, frecuencia, etc.)
- Estabilidad de voltaje

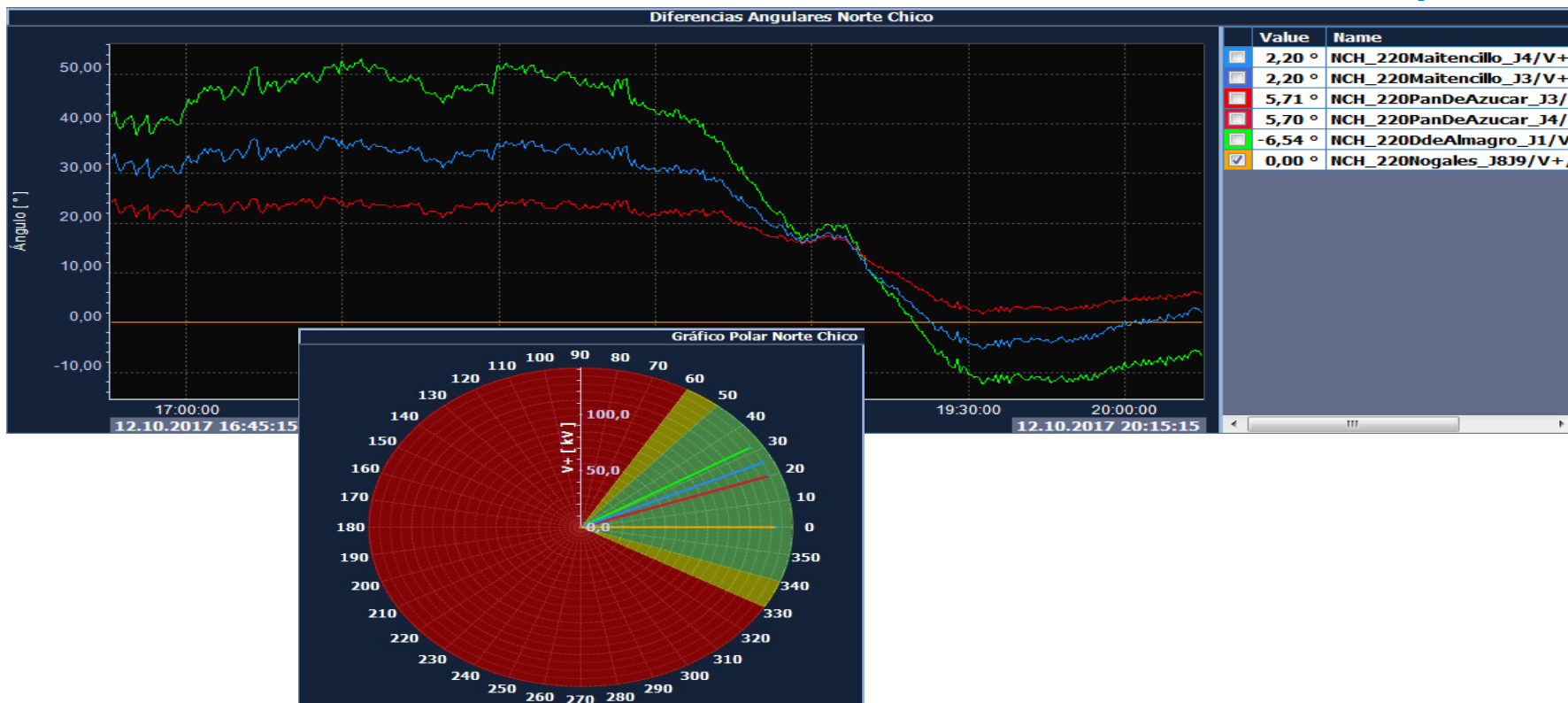
## Otros desarrollos

- Cálculo online de parámetros de líneas de transmisión
- Sincro-check

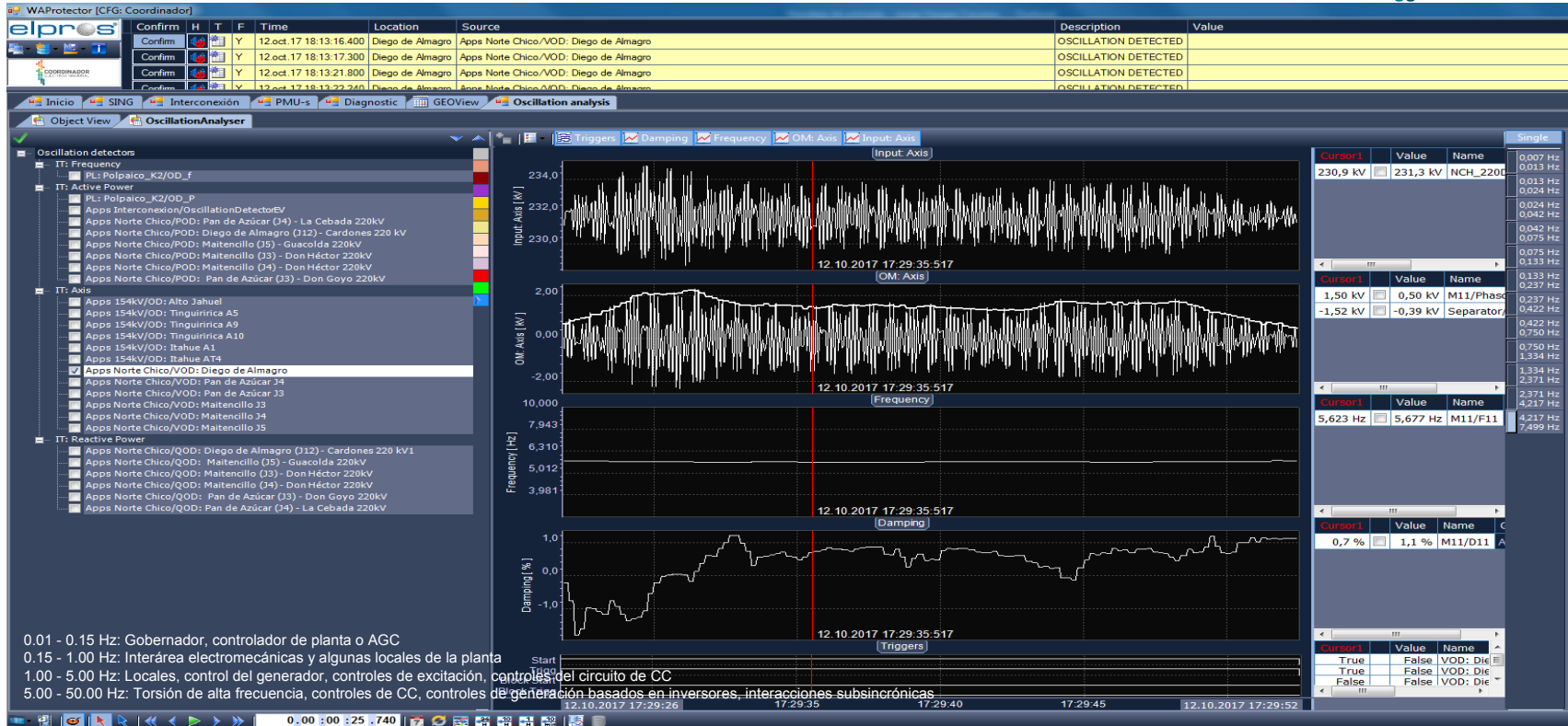
# Monitoreo de la red



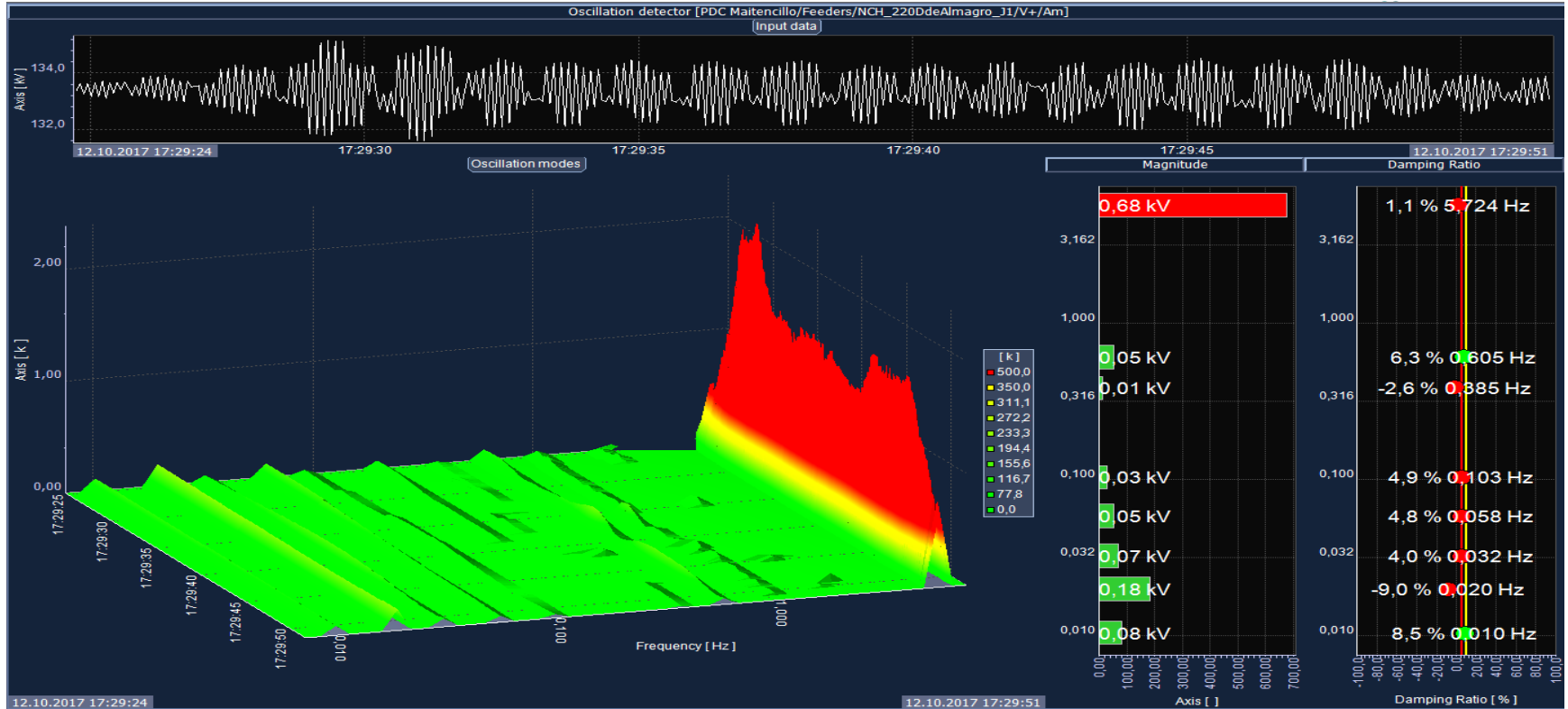
# Diferencias Angulares Norte SIC



# Detección de oscilaciones



# Detección de Oscilaciones





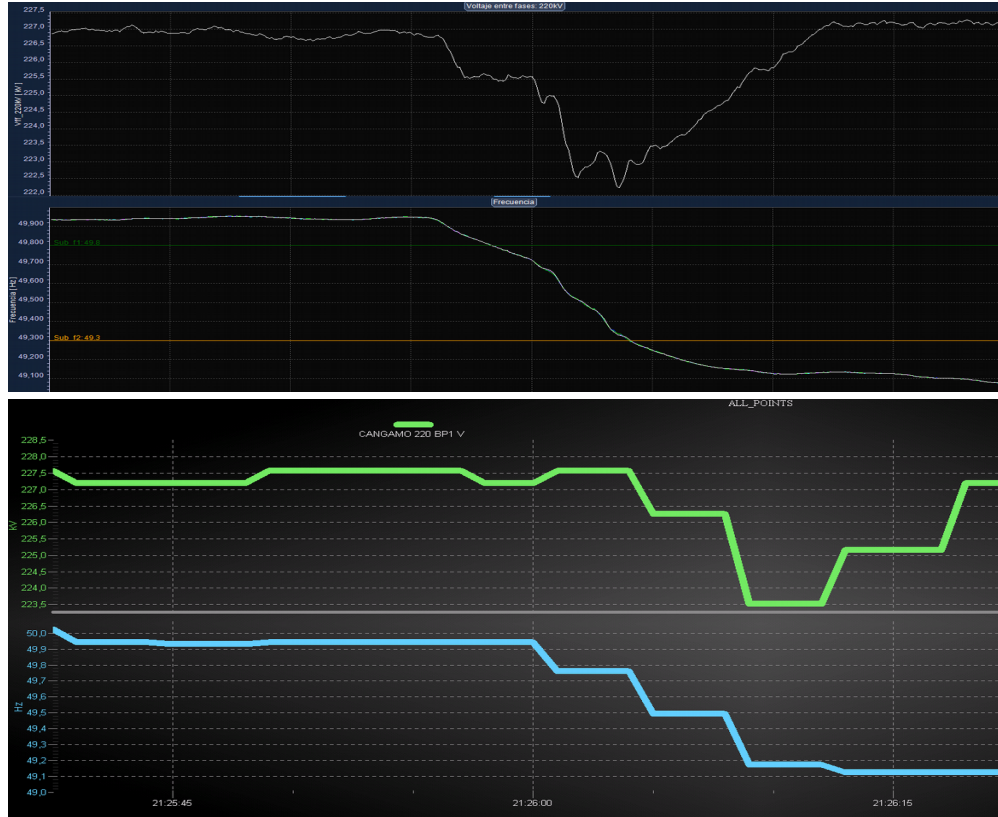
# Falla U16 con 177 MW



# Falla U16 con 177 MW



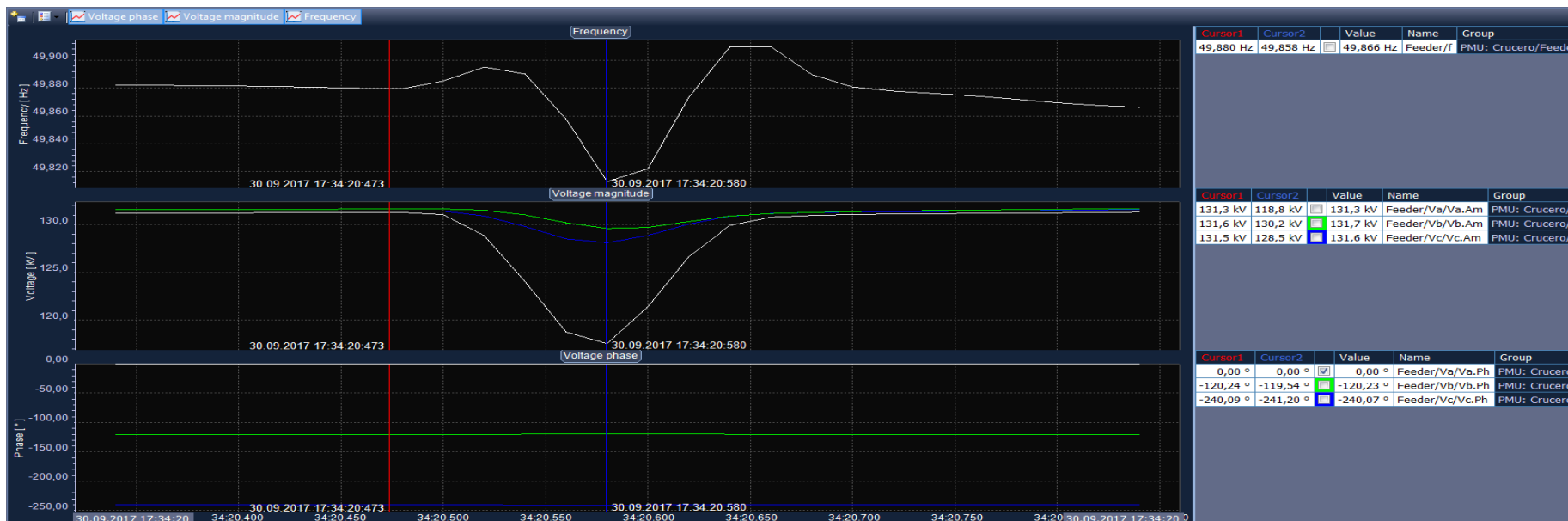
# Falla U16 con 177 MW



WAMS

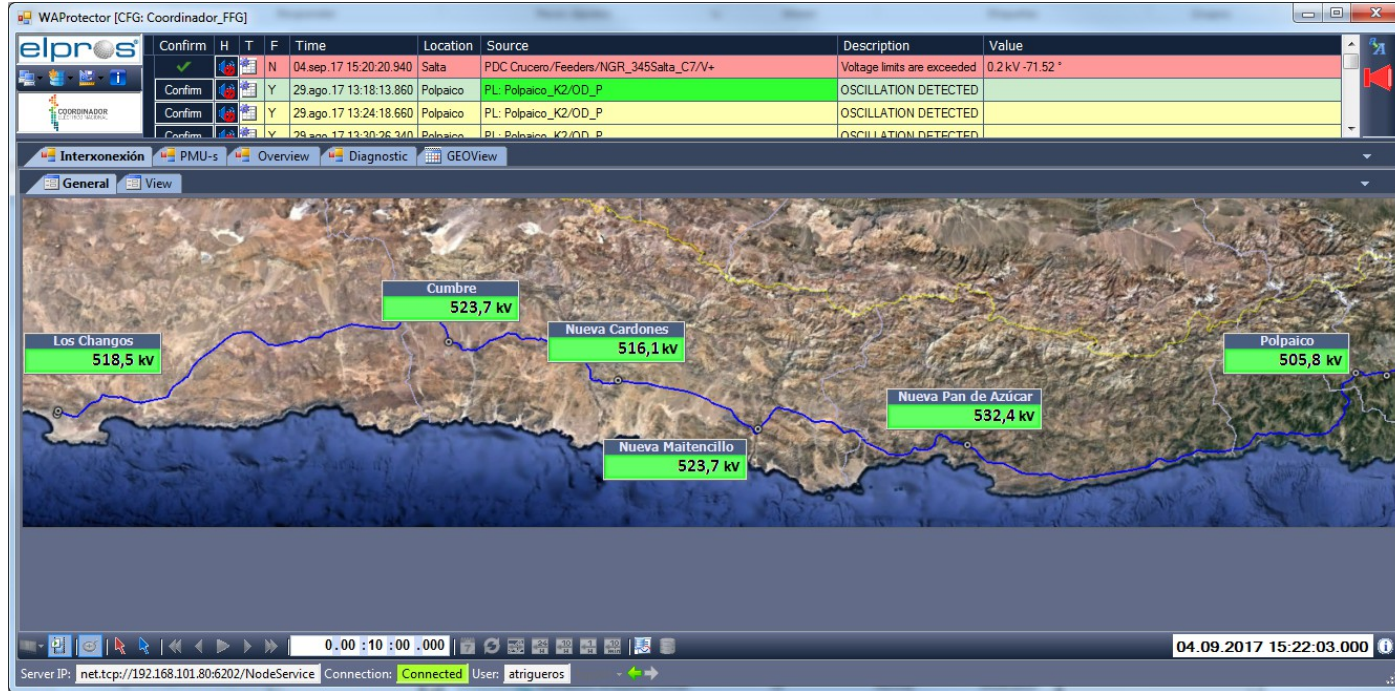
SCADA

# Falla en LT 220 kV Encuentro – Cerro Dominador – Sierra Gorda



Desconexión chicote de trampa de onda paño J1 fase A

# Monitoreo de la interconexión SIC - SING



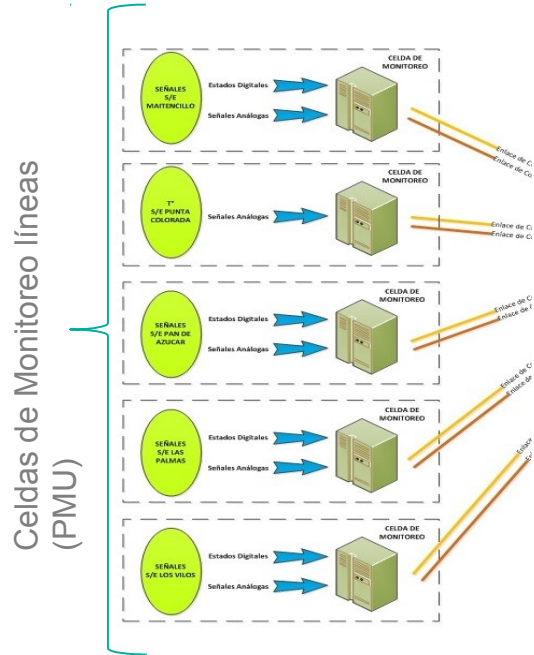
# Enlace PDC – SCADA

	ANDES B	F	0.00	CRUCERO	F	50.03
		VAB	0.0		VAB	229.3
		VBC	0.0		VBC	229.0
		VCB	0.0		VCB	228.9
	ANDES L	F	0.00	DOMEYKO	F	50.03
VALOR DE PMU-1 CRUCERO		VAB	0.0		VAB	229.0
F 50.03		VBC	0.0		VBC	229.0
VA 115.40		VCB	0.0		VCB	228.9
	ANGAMOS	F	50.03	LAGUNAS	F	50.03
		VAB	226.1		VAB	226.7
		VBC	226.0		VBC	226.0
		VCB	226.1		VCB	226.2
	COLLAHUASI	F	50.03	SALTA	F	49.88
		VAB	226.1		VAB	0.2
		VBC	225.0		VBC	0.3
		VCB	225.6		VCB	0.6

El envío de información desde el PDC se realiza mediante el protocolo ICCP.

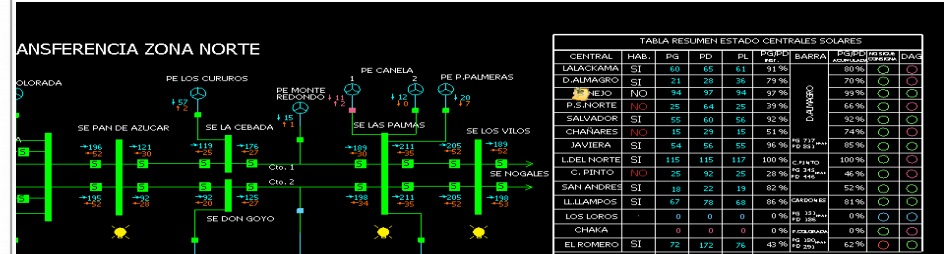
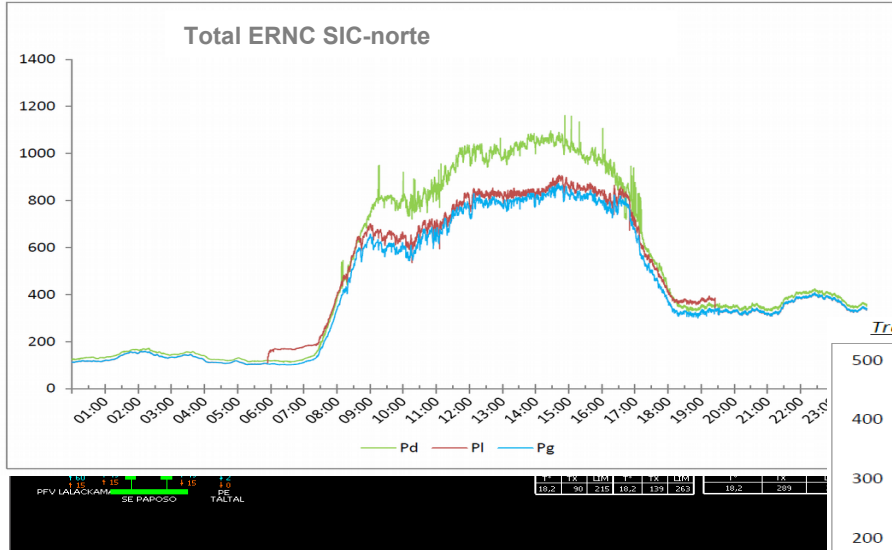
Las tensiones obtenidas serán utilizadas para mejorar la solución del estimador de estado del SCADA.

# Sistema Integral de Control de Transferencias

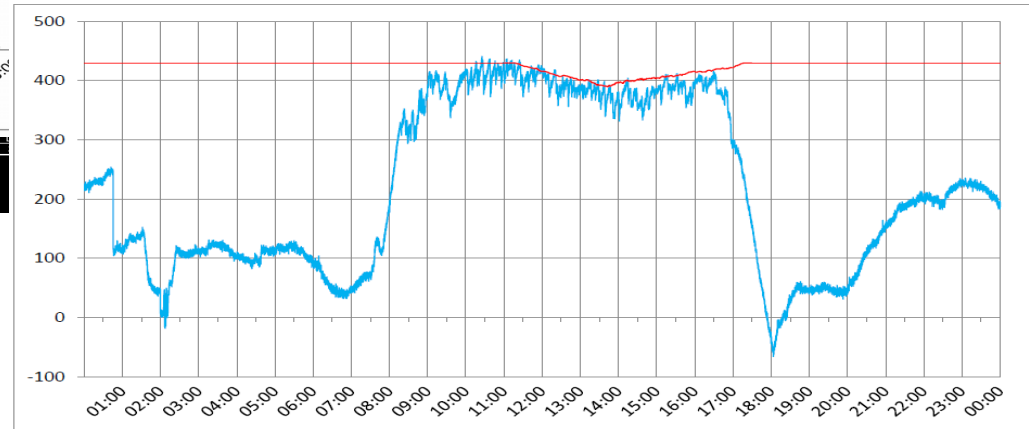


# Sistema Integral de Control de Transferencias

## control de generación ERNC



Tramo: Punta Colorada - Pan de Azúcar





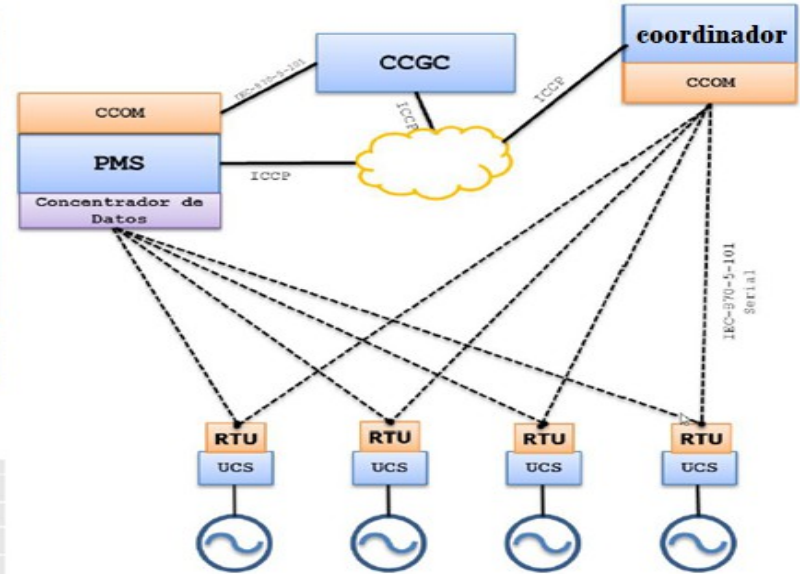
# Control Automático de Generación (AGC)

- CSF
- Seguimiento de la demanda
- Intercambios

Señales Sentido CDEC requeridas por Unidad	
Potencia Activa Neta en MW	Entrada Analógica
Referencia primaria de MVAR	Entrada Analógica
Temperatura Externa (solo turbinas de gas)	Entrada Analógica
Referencia de presión ambiental para turbinas de gas	Entrada Analógica
Límite reducido de las unidades	Entrada Analógica
Tipo de Control para AGC - Remoto/Local	Entrada Digital
Interrupción 01 (dentro /fuera)	Entrada Digital
Interrupción 02 (dentro /fuera)	Entrada Digital
Control Individual/Grupo indicación	Entrada Digital
Indicador de operación como condensador sincrónico (solo si puede operar con CS)	Entrada Digital

Señales de Control hacia el Generador	
Consigna de Potencia Deseada MW	Salida Analógica

Leyenda	
CCGC	Centro de Control de Generación de Coordinado
CCOM	Controlador de Comunicaciones Serial
PMS	Sistema de Supervisión de Central (plant management system)
UCS	Sistema de Control de la Unidad (Unit control system)



$$ACE_{CF} = 10 B_f (f_a - f_s)$$

$$ACE_{CNI} = I_a - I_s$$

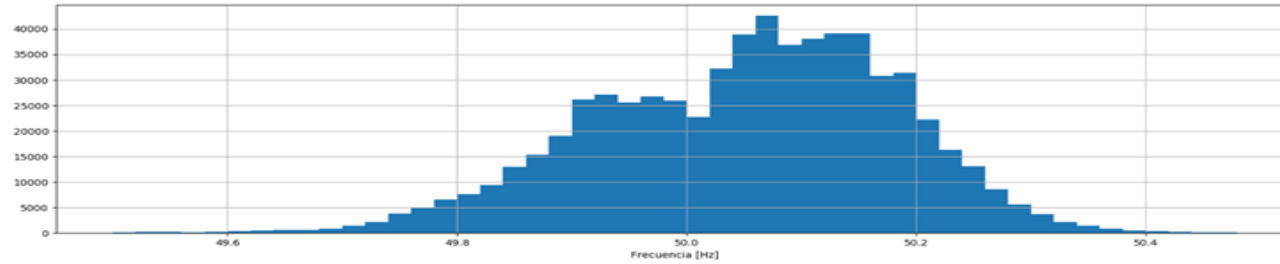
$$ACE_{TLB} = ACE_{CF} + ACE_{CNI}$$

# Control Automático de Generación (AGC)

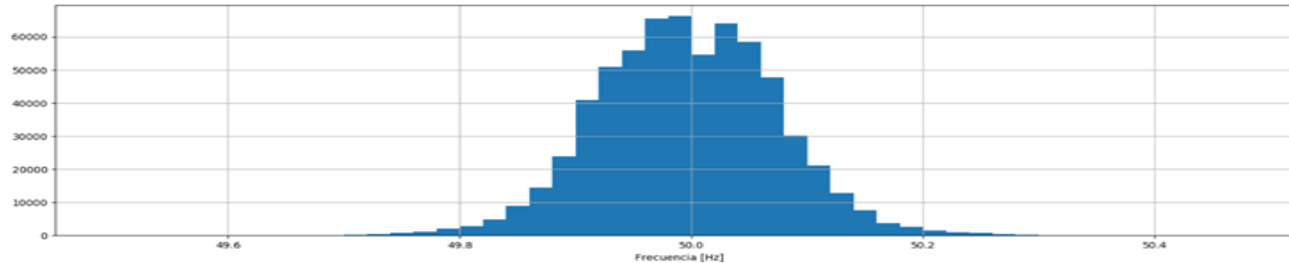


# Control Automático de Generación (AGC)

SING



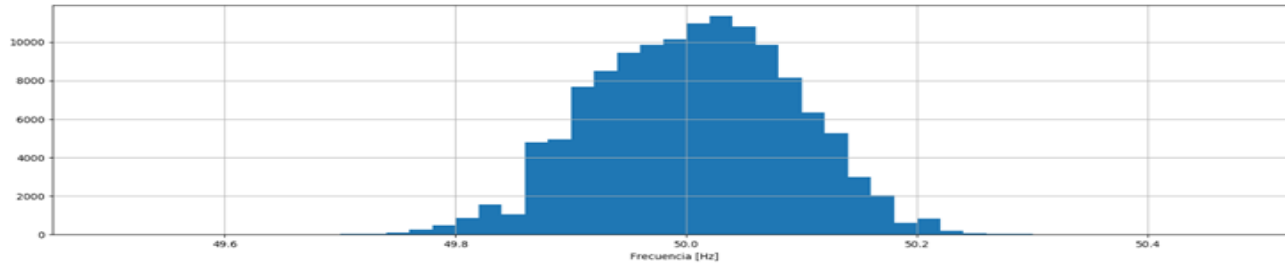
SIN AGC



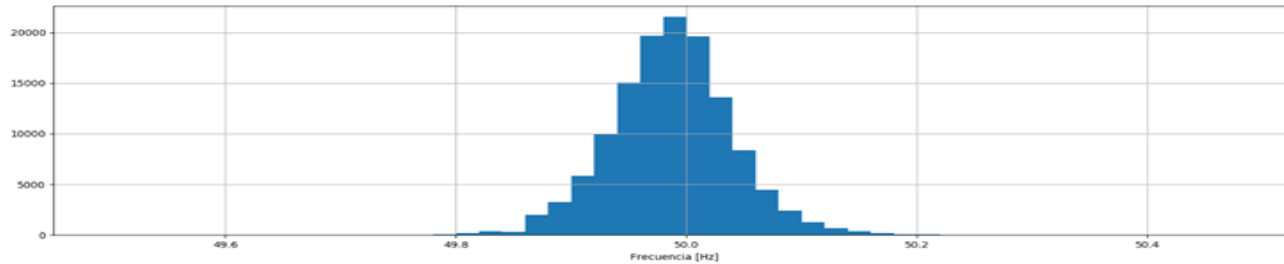
CON AGC

# Control Automático de Generación (AGC)

SIC



SIN AGC



CON AGC

# Comentarios Finales

- La dinámica del SEN cambió y seguirá cambiando, por lo tanto, el monitoreo de su comportamiento es hoy una obligación para la operación eficiente y segura.
- Nuevas aplicaciones y herramientas: SLRP, VSA, RTDS...

## Desafíos

- Seguimiento de la interconexión SIC-SING.
- Entrenamiento despachadores del centro de control.
- Expansión de puntos a monitorear.
- Evaluar la utilización en el Plan de Defensa contra las Contingencias Extremas, Protecciones Sistémicas, WAMPAC.



Muchas Gracias



Jorge Vargas Cáceres  
Departamento de Aplicaciones para la Operación  
Gerencia de Operación  
e-mail: [jorge.vargas@coordinadorelectrico.cl](mailto:jorge.vargas@coordinadorelectrico.cl)