



CDEC SING
CENTRO DE DESPACHO ECONÓMICO DE CARGA
SISTEMA INTERCONECTADO NORTE GRANDE

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE MEDICIÓN FASORIAL

CDEC-SING

Julio de 2016

Departamento de Integridad del Sistema
29 de julio de 2016

CDEC-SING C063/2016
Versión 1



Departamento de Integridad del Sistema
29 de julio de 2016

CDEC-SING C063/2016
Versión 1



CONTROL DEL DOCUMENTO

APROBADO POR

Versión	Aprobado por	Cargo
1	Juan Carlos Araneda T.	Director de Planificación y Desarrollo

REVISADO POR

Versión	Revisado por	Cargo
1	Erick Zbinden A.	Jefe Departamento de Integridad del Sistema

REALIZADO POR

Versión	Realizado por	Cargo
1	Carla Hernández O'.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Patricio Lagos R.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Felipe Neira M.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema
	Sebastián Novoa U.	Ingeniero Departamento de Integridad del Sistema

REGISTRO DE CAMBIOS

Fecha	Autor	Versión	Descripción del Cambio
29-07-2016	Departamento de Integridad del Sistema	1	Versión final. Incluye requerimientos de expansión de CDC y DOP
22-06-2016	Departamento de Integridad del Sistema	A	Confección del documento preliminar.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. ALCANCE	8
3. ANTECEDENTES	9
4. MARCO NORMATIVO	10
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	11
6. DESARROLLO DEL ESTUDIO	12
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DE LA RED WAM	12
6.2 EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO NORMATIVO DE LA RED WAM ACTUAL	19
7. PLAN DE EXPANSIÓN DE LA RED WAM	37
7.1 ESCENARIO TOPOLÓGICO	37
7.2 SELECCIÓN DE INSTALACIONES	38
7.3 JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO PARA LOS PUNTOS DE MEDIDA	40
8. ACTUALIZACIONES	45
8.1 INFORMACIÓN TÉCNICA	45
8.2 NUEVOS PUNTOS DE MEDIDA	45
8.3 HARDWARE	45
8.4 SISTEMAS DE COMUNICACIONES	45
8.5 DESPLIEGUES GRÁFICOS Y APLICACIONES	46
9. PROGRAMA DE TRABAJO	48
10. PLAN DE EXPANSIÓN 2017 - 2018	49
10.1 INSTALACIONES POR EVALUAR	49
10.2 ANÁLISIS PROPUESTO	50
11. ANEXO	52
11.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE IMPLEMENTACIÓN	52



ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

BD	: Base de Datos.
CDEC	: Centro de Despacho Económico de Carga.
CDC	: Centro de Despacho y Control.
CNE	: Comisión Nacional de Energía.
DIS	: Departamento de Integridad del Sistema.
DOP	: Departamento de Operaciones.
EAF	: Estudio de Análisis de Falla.
EIST	: Estudio de Integridad del Sistema de Transmisión.
ERNC	: Energía Renovable No Convencional.
ERST	: Estudio de Restricciones del Sistema de Transmisión.
FMM	: Fuerza magnetomotriz.
GPS	: Global Position System.
IEC	: International Electrotechnical Commission.
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IRIG-B	: Inter Range Instrumentation group time code format B.
MEL	: Minera Escondida Ltda.
NT de SyCS	: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.
NTP	: Network Time Protocol.
N/A	: No Aplica.
PDC	: Phasor Data Concentrator.
PDCE	: Plan de Defensa contra Contingencia Extrema.
PES	: Puesta en Servicio
PMU	: Phasor Measurement Unit.
PRS	: Plan de recuperación del Sistema.
ROCOF	: Rate of change of frequency.
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition.
SI	: Sistema Interconectado.
SIC	: Sistema Interconectado Central.
SING	: Sistema Interconectado del Norte Grande.
SM	: Sistema de Monitoreo.
S/E	: Subestación.



TC : Transformador de Corriente.
TP : Transformador de Potencial.
TVE : Total Vector Error.
UPS : Uninterruptible Power Supply.
UTC : Coordinated Universal Time.
WAM : Wide Area Measurement.



1. INTRODUCCIÓN

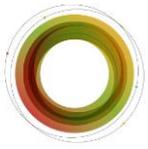
Los sistemas eléctricos están cambiando fuertemente, y con ello la forma bajo la cual han sido operados durante los últimos años.

La progresiva incorporación de generación no convencional del tipo variable y distribuida, los requerimientos de control dinámico, y una demanda en constante aumento que no va a la par con la expansión de los sistemas eléctricos, han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías y recursos que permitan explotar al máximo la infraestructura eléctrica existente, optimizar su uso y flexibilizar la operación de la red de manera que la progresiva incorporación de diversas fuentes de energía, así como la expansión e interconexión entre sistemas de potencia de gran envergadura, se realice de la forma más eficiente y segura que permita el estado del arte en estas materias.

En particular, la introducción de nuevas tecnologías así como los aspectos asociados a la automatización de las redes, a las posibilidades de control asociadas, y a la certeza en cuanto a los límites de seguridad posibles en su comportamiento dinámico, son inherentes al objetivo de contar con un sistema eléctrico inteligente y resiliente, con capacidad de reacción y análisis en tiempo real, dentro de la escalas de tiempo de sub-segundos, donde se puedan monitorear comportamientos tanto seguros como inseguros de los sistemas, y tomar acciones oportunas al respecto.

En este contexto, el CDEC-SING desde el año 2014 y con el propósito de potenciar la operación del sistema utilizando plataformas tecnológicas de vanguardia, mantiene en operación su “módulo de medición fasorial” en adelante Red WAM (por su sigla en inglés *Wide Area Measurement*), para la supervisión dinámica del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Este estudio tiene como objetivo definir las acciones que deberán ejecutarse para cumplir las medidas de expansión y actualización de la Red WAM del CDEC-SING, en conformidad con el Art. 63 y Art. 64 del Anexo Técnico Sistema de Monitoreo (SM), en adelante, Anexo Técnico, el que constituye una parte integrante de la NT de SyCS vigente.



2. ALCANCE

Con el propósito de cumplir el objetivo del estudio, el alcance definido para éste es el siguiente:

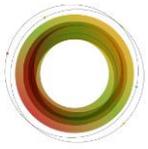
- Descripción general de la condición actual de la Red WAM del CDEC-SING.
- Verificación de la Red WAM existente, respecto del cumplimiento de los requerimientos que establece el Anexo Técnico.
- Presentar el criterio de selección de las nuevas instalaciones que deberán integrarse a la Red WAM, en el periodo 2016 – 2017.
- Identificar las instalaciones que deberán ser intervenidas a raíz de los resultados de este estudio, indicando el argumento técnico que sustenta el requerimiento.
- Establecer los requisitos que deben cumplir las instalaciones de los coordinados y las medidas que deben ser adoptadas para cumplir con el objetivo del estudio.
- Identificar las acciones que deberá realizar CDEC-SING para actualizar la Red WAM, dado el escenario de expansión que se presenta en este estudio.
- Proponer las instalaciones candidatas para integrar la Red WAM dentro del periodo 2017 - 2018, las que serán evaluadas en la próxima edición de este estudio, cuya publicación está programada para Julio de 2017.



3. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de este informe se ha utilizado la siguiente documentación técnica:

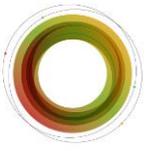
- Estudio de Integridad de Instalaciones del Sistema de Transmisión 2015 (EIST – 2015), disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Inicio > Informes y Estudios > Estudios CDEC.
- Estudio de Restricciones del Sistema de Transmisión (ERST), disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Inicio > Informes y Estudios > Estudios CDEC.
- Estudio para Plan de Recuperación del Servicio (PRS), disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Inicio > Informes y Estudios > Estudios CDEC.
- Estudio para Plan de Defensa Contra Contingencia Extrema (PDCE), disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Inicio > Informes y Estudios > Estudios CDEC.
- Política de Operación Zona Tocopilla, disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Datos del SING > Datos de Operación > Políticas de Operación.
- Plan de Obras del Sistema de Transmisión Troncal (STT) del SING 2014-2015, contenido en el Informe “Plan de Expansión del Sistema de Transmisión Troncal. Periodo 2014-2015”, Resolución Exenta N° 96, marzo de 2015.
- Registros históricos de EAF disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Informes y Estudios > Norma Técnica > Estudios de Falla y DMC > Estudios e Informes de Falla > Estudios para Análisis de Falla.
- Base de Datos en formato DigSilent Power Factory, construida para el EIST-2105, versión disponible en el sitio web del CDEC-SING, menú Inicio > Informes y Estudios > Informes y Estudios CDEC-SING > Estudio de Integridad de Instalaciones del Sistema de Transmisión > Anexos V2.
- Boletín Semanal (mayo de 2016) emitido por este CDEC y disponible en el sitio web del CDEC-SING.
- Diagrama Unilineal del SING, marzo de 2016, disponible en el sitio web del CDEC-SING.
- Guidelines for sittings phasor measurement units, North America Synchrophasor Initiative. Junio 2011.



4. MARCO NORMATIVO

Para la realización del presente estudio, se ha considerado tanto la normativa nacional vigente, como también estándares internacionales relacionados, entre los que destacan:

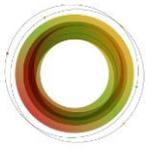
- IEC 60044-1, Ed. 1.2 2003 : Instrument Transformers, Part 1: Current Transformers.
- IEC 60044-2, Ed. 1.2 2003 : Instrument Transformers, Part 2: Inductive voltage transformers.
- IEEE C37.118-2005 : IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.
- IEEE C37.118.1-2011 : IEEE Standard for Synchrophasor Measurement for Power Systems.
- IEEE C37.118.2-2011 : IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.
- IEEE C37.118.1a-2014 : IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. Amendment 1: Modification of select performance requirements.
- IEEE C57.13, 1993 : IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers.
- Anexo Técnico SM, 2015 : Anexo Técnico del Sistema de Monitoreo.
- NT de SyCS, 2016 : Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, versión 2016.



5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El presente estudio se desarrolla considerando el siguiente marco de trabajo:

- Recopilación y revisión de la información técnica relacionada con la arquitectura y hardware de la Red WAM existente, identificando sus características, propiedades y funcionalidades actuales.
- Identificar el nivel de cumplimiento actual de la Red WAM, conforme con los requerimientos que declara el Anexo Técnico.
- Presentar un plan de expansión, definido en función de las necesidades técnicas de CDEC-SING, identificando las actividades de actualización que serán requeridas para la Red WAM.
- Definir los requerimientos mínimos y el programa de trabajo para la implementación de las medidas de expansión y actualización de la Red WAM.



6. DESARROLLO DEL ESTUDIO

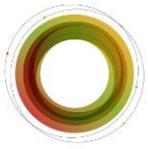
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DE LA RED WAM

6.1.1 *Contexto*

Con el propósito de conocer y evaluar el comportamiento dinámico y las respuestas transitorias del SING que no fuesen observables por el SCADA, nace a fines del año 2012 un proyecto Piloto WAM de CDEC-SING.

Para ese entonces, y dada la ausencia de un marco normativo, CDEC-SING estableció requerimientos mínimos para la adquisición de señales, protocolos, sistemas de comunicaciones, entre otros, con los cuales se habilitaron cuatro (4) puntos de medida en instalaciones de TRANSELEC, E-CL, MEL y AES GENER.

El año 2015, la Red WAM se expande, incorporando tres (3) nuevos puntos de medida: uno (1) en Minera Collahuasi y dos (2) en AES GENER. Estos últimos, con el objetivo de monitorear las transferencias de energía y fenómenos oscilatorios entre el SING y el SADI a través de la Línea 1x345kV Andes - Salta, conforme a lo establecido en el Decreto de Exportación de Energía Eléctrica desde el SING hacia el SADI, publicado en junio de 2015.



6.1.2 Descripción general

Como se muestra en la Figura 1, la Red WAM actual presenta una arquitectura centralizada, constituida por un (1) equipo PDC ubicado en S/E Crucero y siete (7) equipos PMU; de los cuales seis (6) se encuentran localizados en instalaciones del SING y uno (1) en el Sistema Eléctrico Argentino SADI. La descripción técnica del hardware se presenta en la sección 6.1.3.

Los enlaces de comunicaciones utilizados para la transmitir los datos fasoriales entre los equipos PMU y el servidor PDC son de propiedad de las empresas coordinadas, pudiendo ser de tipo particular o comercial. Sin perjuicio de lo anterior, el protocolo para la transferencia de datos fasoriales corresponde al estándar IEEE C37-118.

Para efectos de compartir los datos fasoriales alojados en el servidor PDC, dejándolos disponibles en el frontal del sistema SCADA bajo estándar DNP3, como también para efectuar la interrogación remota del servidor PDC desde Santiago, se encuentra en uso la red administrativa de CDEC-SING.

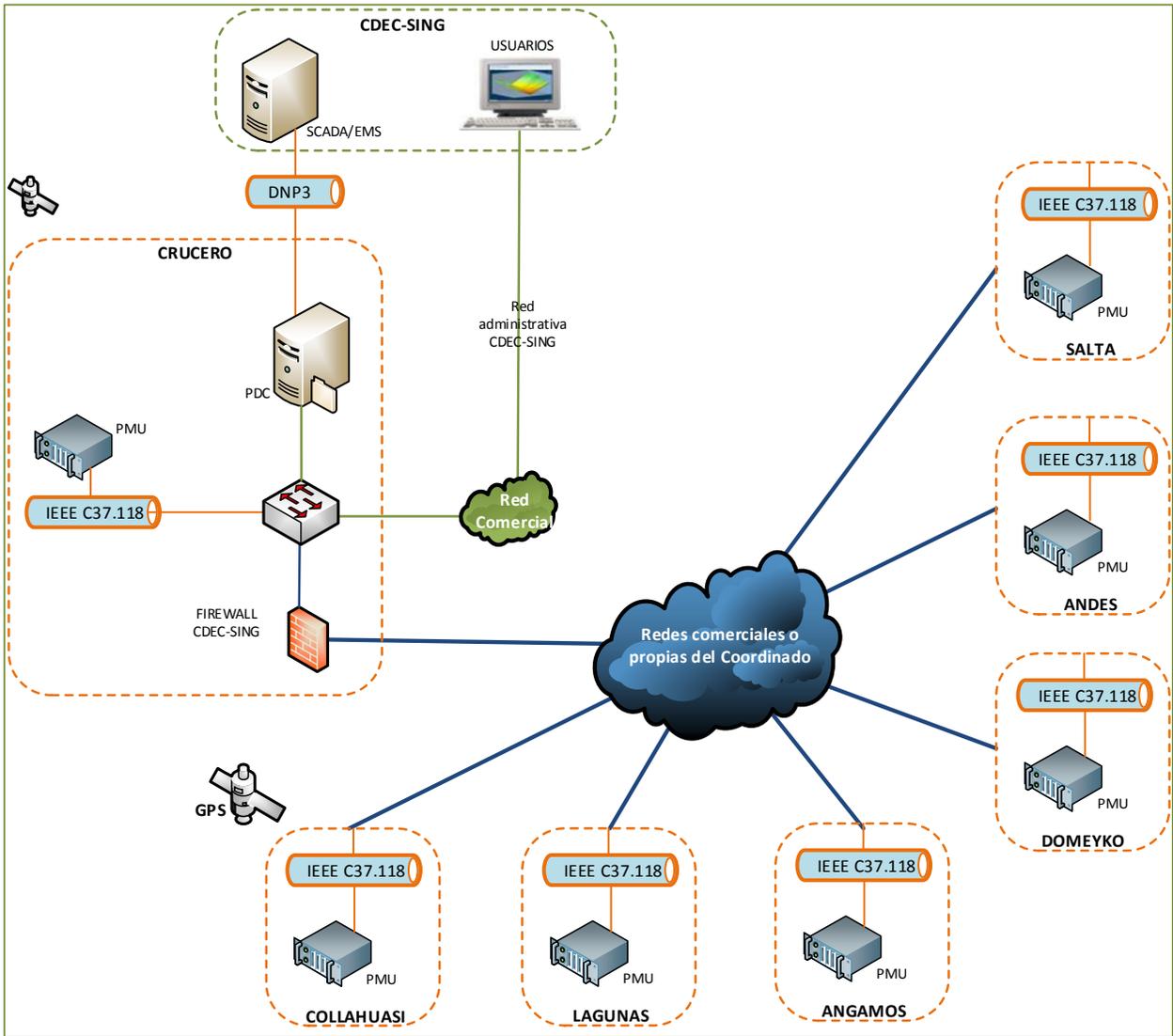


Figura 1. Arquitectura centralizada – Red WAM.

Los puntos de medida que conforman la Red WAM se encuentran distribuidos en diferentes subestaciones del SING, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Localización geográfica de los equipos PMU.



En la Tabla 1a. se presentan las instalaciones que actualmente participan de la Red WAM, identificando para éstas los fenómenos que, de acuerdo a los estudios y análisis de CDEC-SING, son de interés en la operación del SING. Lo anterior no necesariamente implica que, mediante el software computacional, en adelante plataforma de monitoreo (WAProtector), hayan sido monitoreados la totalidad de dichos fenómenos, no obstante, la herramienta escogida para implementación en el SING, así lo permite.

Por otro lado, estos puntos de medida han sido utilizados para complementar los análisis de diversos eventos de falla ocurridos durante el 2014 hasta la fecha, destacando los indicados en la Tabla 1b.



Tabla 1a. Fenómenos a monitorear por la Red WAM.

S/E	Instalaciones del Sistema de transmisión >200kV	Tipo de Barra		Fenómenos de Interés								
		Retiro	Inyección	OP	IE	ET	RF	Estabilidad de pequeña señal			Sobrecargas	
								Local	Inter-planta	Inter-área		
Lagunas 220kV	Barra Lagunas 220kV - BP1						✓					
Crucero 220kV	Barra Crucero 220kV - BP1						✓					
Collahuasi 220kV	Collahuasi 220kV - L1 Línea Lagunas - Collahuasi: Circuito N°1	✓					✓					✓
Andes 345kV	Andes 345kV- Línea Salta - Andes.			✓	✓		✓				✓	
Salta 345kV	Salta 345kV- Línea Salta - Andes.			✓	✓		✓				✓	
Angamos 220kV	Barra Angamos 220kV BP1	✓	✓									
	Barra Angamos 220kV BP2	✓	✓									
	Angamos 220kV - J5 Línea Angamos - Laberinto. Circuito N°2		✓	✓			✓				✓	
Domeyko 220kV	Domeyko 220kV - J6 Línea Domeyko - Laguna Seca	✓				✓	✓					

Donde:

OP : Oscilación de Potencia.

IE : Isla Eléctrica.

ET : Estabilidad de tensión.

RF : Respuesta en frecuencia.



Tabla 1b. Eventos de falla relevantes para los que se han utilizado los registros WAM en análisis post-contingencia.

N° Evento	Fecha	Equipo fallado	Frecuencia [Hz]	Desconexión de generación [MW]	Desconexión de consumo [MW]
3525	12-03-2014	ANG1	48,71	263	270,0
3531	01-04-2014	ELIQSA	51,23	0	228,0
3544	11-04-2014	Línea 220 kV Encuentro-Sierra Gorda Circuito N°2	50,81	0	155,0
3611	02-07-2014	Apagón del SING	50,53	0	0,0
3777	28-02-2015	U16	48,80	240	114,0
4106	29-04-2016	Cochrane	48,79	271	146,7
4158*	14-06-2016	Cochrane	50,00	200	0,0

Nota: (*) Evento de falla ocurrido en un escenario de interconexión SING-SADI.

6.1.3 Descripción del Hardware

La información técnica relacionada con las características técnicas generales del equipamiento que conforma la Red WAM se presenta en la Tabla 2 y Tabla 3.

▪ Equipos PMU

Los equipos PMU que conforman la Red WAM presentan las características que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Características Técnicas del equipo PMU.

Ítem	Descripción
Clase*	M
Tasa de muestreo	50 muestras/s
Receptor Satelital GPS	Antena GPS
Estándar de sincrofasores	IEEE C37.118
Sincronización (precisión)	UTC \pm 1 μ S
Interfaz de comunicación	Ethernet (RJ45) 10Base T (IEEE 802.3I)
Canales análogos de entrada	Tensión y corriente

Nota: (*) Definición según estándar IEEE C37.118.

▪ Servidor PDC

El servidor PDC utilizado por la Red WAM de CDEC-SING, presenta las características que se mencionan en la Tabla 3.



Tabla 3. Características Técnicas del servidor PDC.

Cantidad	Ítem	Descripción
1	Servidor	HP ProLiant DL380p Gen8
1	Sistema Operativo	WinSvrStd 2012R2 SNGL OPL NL 2Proc
6	Discos duros	HP 1TB SAS HDD
-	Arreglo de discos	RAID 5

6.1.4 Software de Monitoreo en tiempo real

El monitoreo en tiempo real es realizado mediante el software WAProtector del fabricante ELPROS. La Figura 3 muestra el despliegue gráfico que actualmente está siendo utilizado por el Centro de Despacho y Control (CDC), y es accesible desde las estaciones de trabajo de los ingenieros pertenecientes a los diversos departamentos técnicos de CDEC-SING.

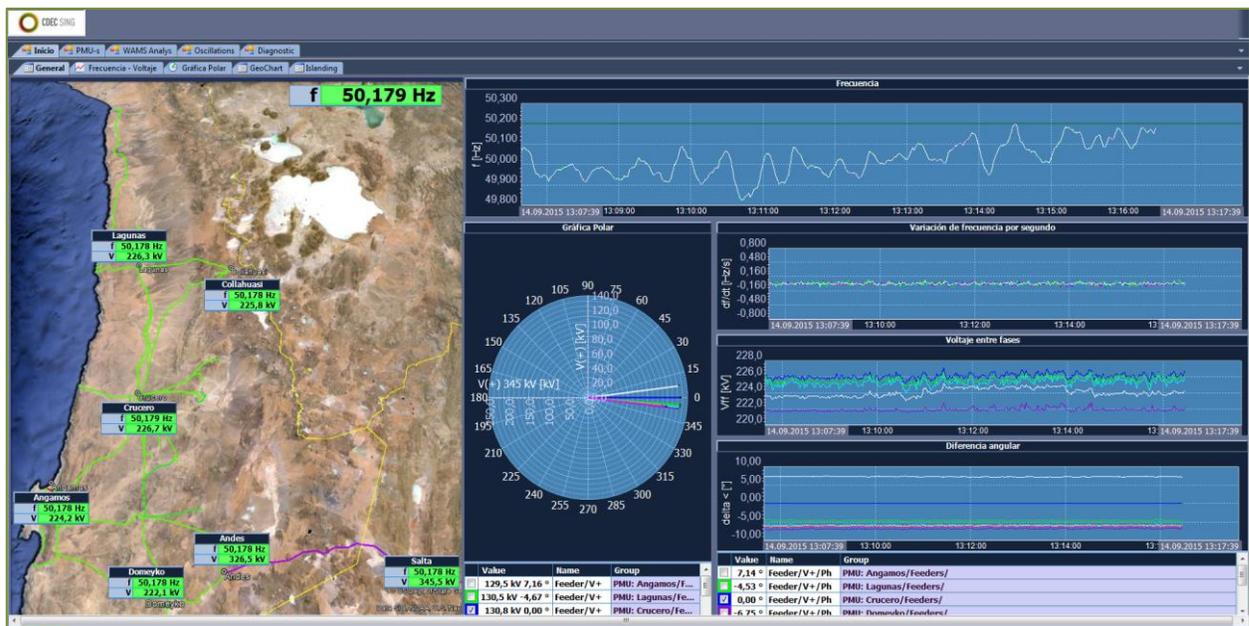


Figura 3. Visualización gráfica de la Red WAM actual.

6.2 EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO NORMATIVO DE LA RED WAM ACTUAL

A continuación, se realiza una evaluación del nivel de cumplimiento de la Red WAM en su condición actual, considerando los requerimientos normativos que declara el *Título VI Módulo de medición fasorial* del Anexo Técnico.

Los resultados obtenidos de esta fase de verificación, se presentan en la Tabla 4. Adicionalmente, considerando estos resultados, en la Figura 4 se presentan el nivel porcentual de cumplimiento normativo.



Tabla 4. Cuadro de resultados de la verificación de cumplimiento normativo de la Red WAM.

Artículo N°	Descripción	Cumple requerimiento NT			Observaciones
		Sí	No	Parcial	
29	Descripción general	✓			
30	Escalabilidad	✓			
31	Compatibilidad	✓			
32	Concentración de datos	✓			
33	Respaldo y recuperación de la información			✓	La arquitectura actual no es redundante a nivel de PDC y plataforma de monitoreo.
34	Accesibilidad	✓			
35	Aplicaciones fuera de línea	✓			
36	Aplicaciones en línea	✓			
37	Seguridad	✓			
38	Acceso a señales	✓			
39	Interfaz de comunicaciones	✓			
40	Compatibilidad con señales análogas	✓			
41	Tasa de transferencia y de muestreo de datos	✓			
42	Requerimientos en la medición fasorial	✓			
43	Precisión	✓			
44	Accesibilidad GPS	✓			
45	Adquisición de señales	✓			
46	Clase de Precisión	✓			
47	Estándares para transferencia de datos en la medición fasorial	✓			
48	Requerimientos generales		✓		Los enlaces de comunicaciones no son dedicados y tampoco de uso exclusivo para transmisión de datos fasoriales.
49	Canales de comunicación	✓			
50	Medios de comunicación			✓	No se dispone de información sobre ancho de banda y medios de comunicación utilizados para la transmisión de datos fasoriales
51	Sincronismo de la red de comunicaciones	✓			
52	Requerimientos del equipo concentrador	✓			
53	Características técnicas del equipo concentrador	✓			
54	Organización			✓	La arquitectura actual no es redundante a nivel de PDC, por lo



					que no es posible establecer una organización jerárquica.
55	Modularidad y escalabilidad	✓			
56	Esquema redundante			✓	La arquitectura actual no es redundante a nivel de PDC.
57	Almacenamiento de registros	✓			
58	Almacenamiento de registros de eventos	✓			
59	Estado de Operación de las unidades remotas de operación	✓			
60	Software	✓			
61	Requerimientos en el despliegue de información	✓			
62	Registro de eventos transitorios	✓			

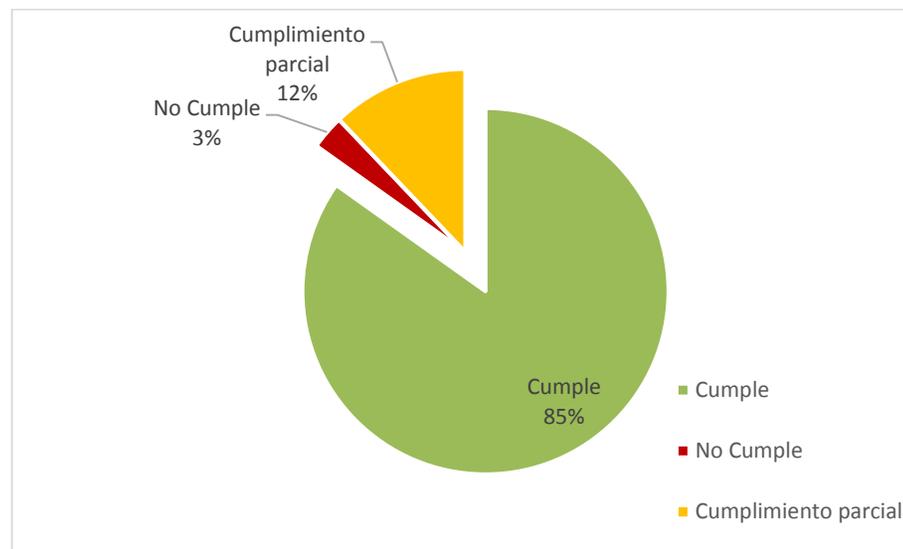


Figura 4. Resultados porcentuales de cumplimiento normativo de la Red WAM.



A continuación, se describe la revisión y evaluación de cumplimiento normativo del Anexo Técnico, en lo que se refiere al módulo de medición fasorial.

▪ *Art. 29 Descripción General*

Los antecedentes y argumentos que verifican el cumplimiento de este artículo, han sido expuestos en el ítem 6.1 de este Estudio.

▪ *Art. 30 Escalabilidad*

La Red WAM fue diseñada bajo una arquitectura centralizada, escalable para 100 equipos PMU y, de ser requerido, 100% integrable a una arquitectura distribuida, inclusive si ella se encontrase conformada por múltiples servidores PDC y dentro de una organización jerárquica zonal/regional.

A la fecha, la Red WAM ha sido objeto de dos procesos de expansión, en los que se consideró la implementación y PES de los equipos PMU localizados en S/E Collahuasi, S/E Andes y S/E Salta, éstas dos (2) últimas conforme con el Decreto de Exportación de julio de 2015. Con lo anterior, ha sido posible verificar la capacidad de escalabilidad del módulo de monitoreo existente, manteniendo la continuidad operacional de la plataforma.

▪ *Art. 31 Compatibilidad*

La arquitectura es compatible con hardware PMU de diferentes fabricantes, en la medida que éstos cumplan con el estándar IEEE C37.118. El mismo requerimiento se aplica para expansiones mediante el intercambio de medidas con otros servidores de datos (PDC).

A la fecha, se tiene confirmación para la correcta integración a la plataforma de monitoreo WAProtector, de equipos PMU de diferentes fabricantes como se muestra en la Tabla 5, no obstante, podrán ser implementados equipos de otros proveedores, siempre que éstos cumplan con los requerimientos técnicos especificados en el Anexo de este estudio.



Tabla 5. Compatibilidad a nivel de protocolo IEEE C37.118 entre diferentes fabricantes.

Modelo	Fabricante
Power Sentinel 1133A	Arbiter System
RES 521	ABB
RES 670	ABB
Micom P847	Alstom
CSS-200	Beijing Sifang Automation Co
TESLA	ERL Phase Power Technologies Ltda
N60	GE
IDMT3	Qualitrol
IDM+	Qualitrol
BEN6000	Qualitrol
SEL-421	SEL
SEL-451	SEL
Simeas R-PMU	Siemens

- *Art. 32 Concentración de datos, Art. 34 Accesibilidad, Art. 52 Requerimientos del equipo concentrador y Art. 53 Características técnicas del equipo concentrador.*

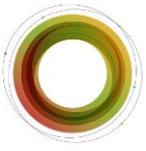
Dada la arquitectura centralizada de la Red WAM, la información obtenida desde los diferentes puntos de medida indicados en la Tabla 1a, son enviados directamente a un único servidor PDC ubicado en S/E Crucero, mediante el protocolo de transferencia de datos fasoriales IEEE C37.118.

Toda la información proveniente de los puntos de medida es recibida, almacenada y procesada en el servidor PDC, quedando disponible para ser monitoreada mediante las aplicaciones del software computacional, en adelante plataforma de monitoreo (WAProtector).

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de capacidad mostrado en la Tabla 11, se concluye que el servidor PDC tiene capacidad suficiente para almacenar durante un periodo de tiempo de 30 días sucesivos, los registros fasoriales provenientes de siete (7) equipos PMU midiendo en formato de punto flotante (*float point*): tres (3) fasores de corriente, tres (3) fasores de tensión, frecuencia y ROCOF, para una tasa de muestreo de 50 muestras/segundo.

- *Art. 33 Respaldo y recuperación de la información y Art. 35 Aplicaciones fuera de línea.*

La condición actual de la Red WAM no considera sistema de respaldo de hardware y software, no obstante, es importante mencionar que la disposición geográfica del servidor PDC favorece la continuidad operacional de la Red WAM frente a fallos severos de los enlaces de comunicaciones entre Santiago y Antofagasta, ya que los registros fasoriales provenientes de los puntos de monitoreo



permanecen siendo recibidos, almacenados y procesados en el concentrador, permitiendo su análisis post-contingencia.

El respaldo de la información fasorial asociada a eventos de falla, es realizada actualmente por CDEC-SING en forma local mediante *triggers* manuales, mientras que almacenamiento de registros fasoriales exportados desde la plataforma de monitoreo, son almacenados en una unidad de disco externo, con capacidad suficiente para estos fines. Estos registros quedan a disposición de los usuarios de CDEC-SING para ser consultados y/o utilizados en aplicaciones fuera de línea, como son: los análisis post-mortem de eventos de fallas, validación de modelos de respuesta transitoria, y oscilaciones de pequeña señal.

Sin perjuicio de lo anterior, en la medida que se defina la estructura de la Red WAM Nacional, podrán ser consideradas las acciones tendientes a proveer de medios de respaldo y de recuperación de información, desde el punto de vista de software y hardware.

En atención a los requerimientos de respaldo, si bien los equipos PMU y el servidor PDC se encuentran alimentados desde las fuentes de alimentación convencionales en VAC o VDC disponibles en las subestaciones involucradas, CDEC-SING con el propósito de resguardar la medición continua de las señales fasoriales frente a pérdidas de alimentación, definió como requerimiento para los Coordinados, la disponibilidad de respaldo de energía mediante bancos de baterías, UPS u otro, con autonomía de a lo menos 8hrs.

▪ *Art. 36 Aplicaciones en línea.*

Para efectos de documentar el cumplimiento de los requerimientos normativos que indica el Art. 36 del Anexo Técnico de SM, relacionado con los índices de latencia para las aplicaciones en línea, se presenta un reporte estadístico obtenido desde la plataforma de monitoreo WAProtector.

El registro se construye en base al monitoreo diario de latencias dentro de ventanas de tiempo para un bloque horario am y otro bloque horario pm, para una muestra de siete (7) semanas.

Los resultados mostrados en la Figura 5 y Figura 6, indican que los índices de latencia medida son del orden de 140ms, lo que permite cumplir con el Art. 36.

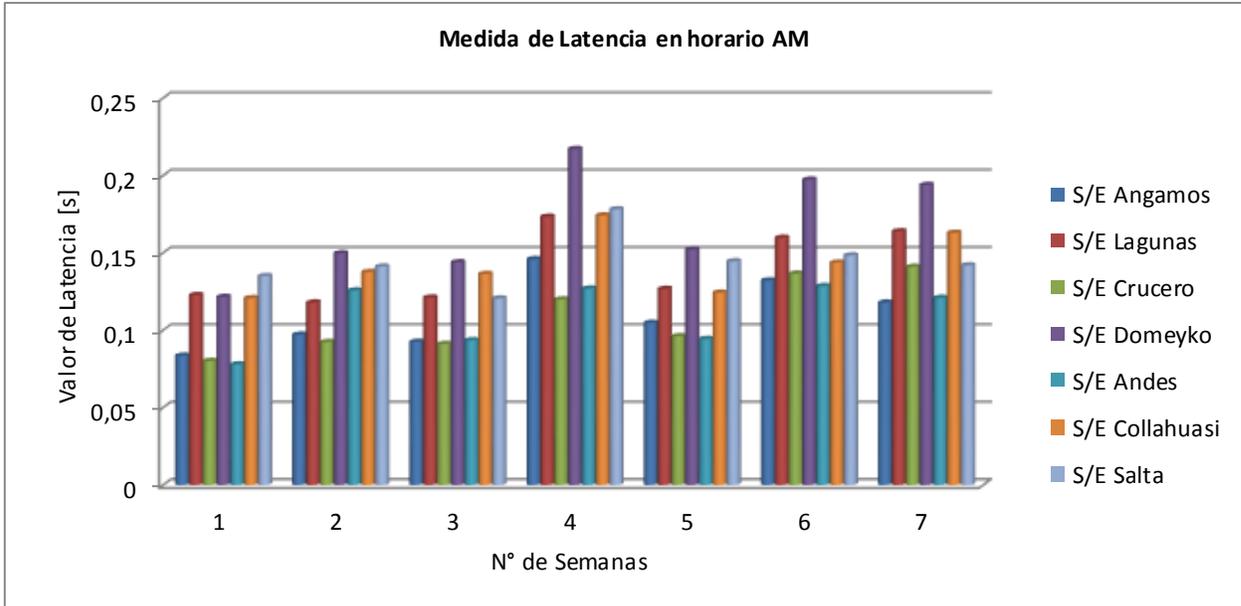


Figura 5. Resultados estadísticos para la medición de latencias – horario AM.

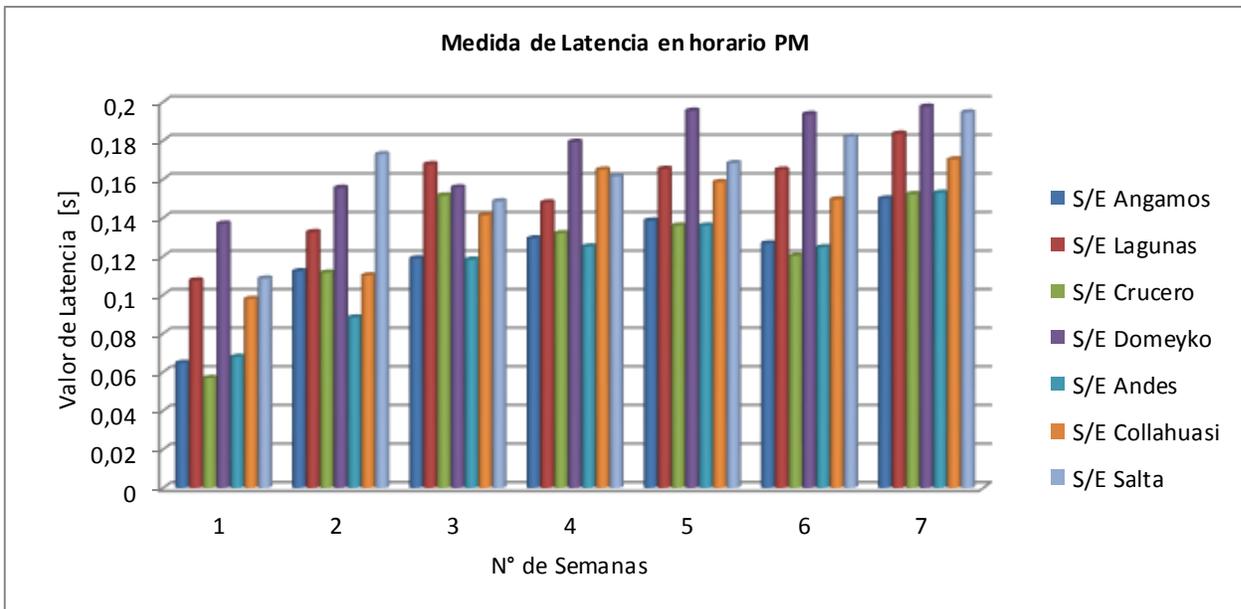
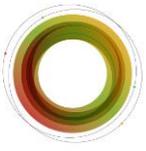


Figura 6. Resultados estadísticos para la medición de latencias – horario PM.

En relación al almacenamiento de información del SI asociada a las aplicaciones en línea, la concentrador de datos está configurado para mantener una base de datos rotativa que permite almacenar 30 días de registros fasoriales continuos, sin desmedro de la capacidad de almacenamiento disponible. Lo anterior, en base a los resultados obtenidos al verificar el cumplimiento normativo del Art. 57 del Anexo Técnico, mostrados en la Tabla 11.



▪ *Art. 37 Seguridad.*

La plataforma permite la integración de nuevos puntos de medida y su respectiva configuración, manteniendo todas sus funcionalidades en tiempo real. Al respecto, durante el año 2015 CDEC-SING administró los procesos de integración de nuevos puntos de medida en S/E Collahuasi 220kV, S/E Andes 345kV y S/E Salta 345kV, los que se realizaron sin interrumpir o alterar la operación normal de la Red WAM (*Hot Swap*).

▪ *Art. 38 Acceso a señales, Art. 45 Adquisición de señales y Art. 46 Clase de precisión.*

El equipamiento hardware que compone la Red WAM, se encuentra físicamente dispuesto en instalaciones de las empresas coordinadas.

En particular, se tiene:

- ✓ La instalación de los equipos PMU en las SS/EE Angamos, Collahuasi, Domeyko, Lagunas, y Andes se realizó en armarios existentes de propiedad de las empresas coordinadas, en cada una de las subestaciones indicadas en la Tabla 1.
- ✓ El punto de medida de S/E Salta se encuentra habilitado en instalaciones pertenecientes al SADI.
- ✓ El concentrador PDC, el reloj GPS utilizado para la sincronización de éste, y la PMU ubicada en S/E Crucero, se encuentran instalados en el armario de propiedad de CDEC-SING, dispuesto en la citada subestación.

Actualmente, la Red WAM se encuentra monitoreando señales de tensión para la totalidad de los puntos de medida que la conforman.

La necesidad de incorporar señales de corriente nace como requerimiento de CDEC-SING, con el propósito de mejorar la observabilidad de ciertos fenómenos del sistema durante la operación del SING y a monitorear las transferencias de potencia del corredor en 345kV Salta- Andes en el escenario de interconexión SING-SADI, respectivamente.

La adquisición de las citadas señales, son obtenidas desde los transformadores de tensión y corriente existentes en las respectivas subestaciones, en conformidad con el Art.45 del Anexo Técnico.

La Tabla 6 muestra las variables monitoreadas por la Red WAM por cada punto de medida.



Tabla 6. Cuadro de señales monitoreadas por la Red WAM.

Punto de medida	Señales monitoreadas
S/E Angamos	Frecuencia, ROCOF, fasores tensión y corriente
S/E Crucero	Frecuencia, ROCOF, fasor tensión
S/E Collahuasi	Frecuencia, ROCOF, fasores tensión y corriente
S/E Domeyko	Frecuencia, ROCOF, fasor tensión
S/E Lagunas	Frecuencia, ROCOF, fasor tensión
S/E Andes*	Frecuencia, ROCOF, fasores tensión y corriente*
S/E Salta*	Frecuencia, ROCOF, fasores tensión y corriente*

Nota: (*) Según Decreto de Exportación, 19 de junio de 2015.

Clase de precisión del equipo PMU

En la Tabla 7, se presentan las bandas de medida de tensión y corriente, definidas por el estándar IEEE C37.118, para las que el equipo PMU clase M o P, cumple con el TVE máximo permitido.

Tabla 7. Requerimientos de precisión para los equipos PMU, según IEEE C37.118-2011.

Magnitud de la señal	Precisión para los equipos PMU		
	Clase M	Clase P	TVE máx. [%]
Corriente	$(10\% \div 200\%)I_{nom}$	$(10\% \div 200\%)I_{nom}$	1
Voltaje	$(10\% \div 120\%)V_{nom}$	$(80\% \div 120\%)V_{nom}$	1

Donde:

I_{nom} : Corriente nominal [A].

V_{nom} : Tensión nominal [V].

TVE : Total Vector Error [%].

Considerando que el propósito de la Red WAM es tener observabilidad transitoria del SING dentro de un amplio rango de las medidas de tensión y corriente, cumpliendo con la precisión requerida por el Anexo Técnico en términos del TVE (1%), el requerimiento de CDEC-SING es que los equipos PMU que se integren al módulo fasorial sean clase M, situación que ya cumplen los equipos actualmente instalados.

Clase de precisión del instrumento de medida TC y TP

La Tabla 8 resume los rangos de operación según el estándar IEC, para los que se garantiza la clase de precisión de los transformadores de medida. Debe tenerse presente que para asegurar la precisión del instrumento también es necesario que la carga conectada al secundario del transformador esté comprendida dentro de la banda de carga nominal indicada en el citado estándar.



Tabla 8. Rangos de medida para TC y TP, según IEC 60044-1 e IEC 60044-2 (ver nota).

Instrumento	Propósito	
	Medida	Protección
TC	$(5\% \div 120\%)I_{nom}$	$(0\% \div 100\%)I_{nom}$
TP	$(80\% \div 120\%)V_{nom}$	$(5\% \div vf)V_{nom}$

Nota: (*) Consultar IEEE C57.13 para los rangos de operación y bandas de burden que garantizan la clase de precisión bajo dicho estándar.

Donde:

I_{nom} : Corriente nominal [A].

V_{nom} : Tensión nominal [V].

vf : Factor de tensión= 1.5 ó 1.9, según definición IEC.

Dado que el nivel de precisión de la medida tiene directa relación con la naturaleza del fenómeno de interés para ser monitoreado, y los fines de análisis que la normativa vigente dispone para la Red WAM, el requerimiento de instalación de equipos PMU es que sea prioritariamente sobre transformadores TP y TC cuya clase de precisión sea de Medida.

▪ *Art. 39 Interfaz de comunicaciones y Art. 40 Compatibilidad con señales análogas.*

La totalidad de los equipos PMU que conforman la Red WAM actual disponen como mínimo de un (1) puerto de comunicaciones para la transmisión de datos fasoriales hacia el servidor PDC.

Los canales análogos de entrada de los equipos PMU son compatibles con las medidas de tensión y corrientes obtenidas desde los secundarios de los transformadores de tensión y corriente.

Las características de la interfaz de comunicaciones y de los canales análogos, puede ser consultada en la Tabla 2.

▪ *Art. 41 Tasa de transferencia y de muestreo de datos, Art. 42 Requerimientos de medición fasorial, Art. 43 Precisión y Art. 44 Accesibilidad GPS.*

La medición de los datos de la Red WAM cumple con el estándar IEEE C37.118, a una frecuencia de muestreo de 50 muestras/segundo. Adicionalmente, mediante un receptor GPS, los equipos PMU sincronizan su medida dentro de 1 μ s de tiempo en UTC.

Los equipos PMU que constituyen la Red WAM están siendo sincronizados vía GPS e IRIG-B, según se muestra en la Tabla 9.



Tabla 9. Estándar de sincronización para cada punto de medida de la Red WAM.

Punto de medida	Estándar de sincronización	Observaciones
S/E Angamos	GPS	Mediante antena externa
S/E Crucero	GPS	Mediante antena externa
S/E Collahuasi	GPS	Mediante antena externa
S/E Domeyko	IRIG-B	Mediante reloj externo
S/E Lagunas	GPS	Mediante antena externa
S/E Andes	GPS	Mediante antena externa
S/E Salta	GPS	Mediante antena externa

Para el servidor PDC, la señal de sincronización proviene de un reloj GPS dedicado, cuyas características se presentan en la Tabla 10. Con el objetivo de asegurar la disponibilidad de una señal de sincronización, se habilitó un reloj GPS de respaldo remoto en las Oficinas de CDEC-SING, el que al igual que el ubicado en S/E Crucero, dispone de un sistema automático de conmutación de la señal de sincronización, entre el reloj GPS principal y el de respaldo, en caso de presentarse una falla de hardware.

Tabla 10. Características del reloj GPS para sincronización del PDC.

Ítem	Descripción
Precisión	$< \pm 500$ ns (típico)
Protocolo - Tiempo	NTP
Protocolo - sincrofasores	IEEE C37.118
Estándar de tiempo	UTC

- *Art. 47 Estándares para transferencia de datos en la medición fasorial, Art. 48 Requerimientos generales, Art. 49 Canales de comunicación y Art. 50 Medios de comunicación.*

Los enlaces de comunicaciones utilizados para transmitir los datos fasoriales desde los puntos de medida hasta el servidor PDC, son de propiedad de las empresas coordinadas, no siendo de uso dedicado y exclusivo para estos fines.

La interrogación remota del servidor PDC desde las Oficinas de CDEC-SING en Santiago, se realiza utilizando la red administrativa comercial, no redundante.

Sin perjuicio de lo anterior, la Red WAM se encuentra operando bajo los protocolos de transmisión de datos que indica el Art. 47 del Anexo técnico, esto es:

- ✓ Para la transmisión de datos fasoriales entre los equipos PMU y el servidor PDC: IEEE C37-118.
- ✓ Para la transmisión de datos fasoriales entre el servidor PDC y el sistema SCADA de CDEC-SING: DNP3.



▪ *Art. 51 Sincronismo de la red de comunicaciones.*

Considerando la información mostrada en la Tabla 9 y Tabla 10 de este estudio, todas las medidas provenientes de las subestaciones que participan de la Red WAM, así como el servidor PDC, se encuentran sincronizadas mediante red GPS, protocolo IRIG-B y NTP, según corresponda.

▪ *Art. 54 Organización y Art 56 Esquema redundante*

La Red WAM presenta redundancia en términos de capacidad de almacenamiento interno del servidor PDC y de dispositivos externos utilizados como repositorio de eventos del SI capturados desde la plataforma de monitoreo.

El diseño de una arquitectura redundante desde el punto de vista de concentradores (centralizados o específicos) como la organización jerárquica de éstos, será atendida al momento de establecer la arquitectura de Red WAM Nacional, y su potencial interacción a nivel regional.

▪ *Art. 55 Modularidad y escalabilidad*

El servidor PDC, en su condición actual y arquitectura centralizada, dispone de capacidad de almacenamiento suficiente para recibir, almacenar y procesar la información proveniente de los puntos de medida existentes y de los que se integren en el marco del Plan de Expansión de la Red WAM que se menciona en la sección 7 de este estudio. Lo anterior, puede verificarse mediante la proyección de demanda de capacidad mostrada en la Tabla 11 y Tabla 12, en las que se observa que con la capacidad actual del PDC presentada en la Tabla 3, es posible responder a los requerimientos de expansión por sobre la cantidad de PMU existentes, inclusive.

Los resultados presentados, han sido obtenidos considerando la medición de: tres (3) fasores de corriente, tres (3) fasores de tensión, frecuencia y ROCOF.

Tabla 11. Demanda de capacidad de almacenamiento para el PDC, considerando el requerimiento del Art.57.

N° de PMU	10	20	30	40	50	60
Capacidad del PDC [GB]*	93,31	186,62	279,93	373,24	466,55	559,86

Nota: (*) Capacidad requerida para almacenar registros fasoriales sucesivos, para un periodo de 30 días.



Tabla 12. Demanda de capacidad de almacenamiento para el PDC, considerando el requerimiento del Art.58.

N° de PMU	10	20	30	40	50	60
Capacidad del PDC [GB]*	1,78	3,57	5,35	7,14	8,92	10,70

Nota: (*) Capacidad requerida para almacenar registros de eventos por un periodo de 2 años.

Para efectos de compatibilidad entre hardware PDC de diferentes fabricantes, ello dependerá básicamente de que la transmisión de datos fasoriales se realice bajo el estándar IEEE C37.118.

▪ *Art. 57 Almacenamiento de registros.*

Para efectos de verificar que el servidor PDC cumple con los requerimientos mínimos de capacidad de almacenamiento que indica el Art. 57 del Anexo Técnico, se presenta a continuación el resultado de la evaluación realizada considerando la condición actual de la Red WAM del CDEC-SING, esto es, que se encuentra conformada por siete (7) equipos PMU midiendo tres (3) fasores de corriente, tres (3) fasores de tensión, frecuencia y ROCOF.

Tabla 13. Requerimientos de capacidad del servidor PDC considerando la condición actual de la Red WAM, para un periodo de 30 días.

	Cantidad de PMU						
	1	2	3	4	5	6	7
Datos [GB/mes]*	9,33	18,66	27,99	37,32	46,66	55,99	65,32

Nota: (*) Según Art. 57 Anexo Técnico.

Con lo anteriormente expuesto, se concluye que la capacidad del servidor PDC permite dar cumplimiento al Art. 57 del Anexo Técnico.

▪ *Art. 58 Almacenamiento de registros de eventos.*

Asimismo, la Tabla 14 presenta los resultados obtenidos al determinar la capacidad de almacenamiento que debiese proveer el servidor PDC en el escenario de que éste cumpliera la función de repositorio histórico de eventos de falla y oscilaciones del SI por un periodo de 2 años, para una red conformada por los siete (7) equipos PMU midiendo tres (3) fasores de corriente, tres (3) fasores de tensión, frecuencia y ROCOF.

Los resultados han sido obtenidos considerando como información de referencia el promedio de EAF realizados por CDEC-SING entre el año 2013 y el año 2015, una ventana de almacenamiento por evento de 5 minutos, y un factor de seguridad de un 10% para ambos.



En base a lo anterior, se obtienen los resultados mostrados la Tabla 14, en la que se observa que para la Red WAM actual, se requieren del orden de 1.3GB de capacidad disponibles en el PDC para el almacenamiento de los registros que solicita el Anexo Técnico. Si se consideran las características actuales del equipo PDC mostradas en la Tabla 3 de este estudio, se concluye que existe espacio en disco suficiente para cumplir con el requerimiento normativo del Art. 58

Tabla 14. Requerimientos de capacidad del servidor PDC considerando la condición actual de la Red WAM, para un periodo de 2 años.

N° de PMU	1	2	3	4	5	6	7
Capacidad PDC [GB]*	0,18	0,36	0,54	0,71	0,89	1,07	1,25

Nota: (*) Según Art. 58 Anexo Técnico.

- *Art. 59 Estado de Operación de las unidades remotas de operación, Art. 60 Software y Art. 61 Requerimientos en el despliegue de información*

La Red WAM dispone de un software de análisis y configuración, en adelante, plataforma de monitoreo, que permite mediante un módulo de diagnóstico, verificar y visualizar el estatus de conexión de las unidades PMU, obtener las medidas de latencia en línea, contabilizar las pérdidas de comunicación y de datos corruptos.

Actualmente, CDEC-SING monitorea el estado de conexión de un equipo PMU, en forma visual utilizando el citado despliegue, el que se muestra en la Figura 7.

PMU Client	Connection status	Client Driver Statuses	Connection dropped	Data latency	Data Lost Counter	Data Corruption Counter
PMU: Angamos	Connected	Connected	2	0,122 s	0	0
PMU: Lagunas	Connected	Connected	0	0,162 s	0	0
PMU: Crucero	Connected	Connected	0	0,129 s	0	0
PMU: Dorneyko	Connected	Connected	0	0,182 s	0	0
PMU: Andes	Connected	Connected	0	0,122 s	0	0
PMU: Collahuasi	Connected	Connected	0	0,122 s	0	0
PMU: Salta	Connected	Connected	0	0,162 s	104	0

Figura 7. Verificación de cumplimiento normativo Art. 59.

Asimismo, la plataforma de monitoreo permite para cada punto de medida, verificar y visualizar las siguientes variables mediante gráficas polares y en función del tiempo, según corresponda:

- ✓ Valores de tensión y corriente.
- ✓ Valores de potencia activa y reactiva.
- ✓ Frecuencia y ROCOF.
- ✓ Diferencia angular (respecto de un punto de referencia).
- ✓ Componentes simétricas.



La Figura 8 corresponde a uno (1) de los despliegues gráficos desarrollados en la plataforma de monitoreo, en la que se identifica la medida de frecuencia y la amplitud de tensiones y corrientes en cantidades de secuencia.



Figura 8. Verificación de cumplimiento normativo Art. 60.

En cumplimiento con el Art. 61, el despliegue gráfico de la plataforma de monitoreo de la Red WAM, ha sido diseñada de manera de dejar a disposición de los usuarios CDEC-SING la mayor cantidad de información relativa a la operación del SING.

La pantalla de inicio de la plataforma de monitoreo, mostrada en la Figura 9, proporciona una visualización general del sistema a través del despliegue de las variables medidas de tensión [V], corriente [A], desfase angular [°] y ROCOF [Hz/s], en cantidades instantáneas y en función del tiempo.

Adicionalmente, se encuentran habilitados despliegues gráficos que permiten visualizar separadamente la información de tensión [V], corriente [A], ángulo [°], y componentes simétricas (secuencia positiva, negativa y cero) para cada equipo PMU existente en el módulo de medición fasorial. Las medidas de potencia activa [MW] y potencia reactiva [MVar], se encuentran disponibles sólo para las SS/EE que han habilitado las medidas de corriente.

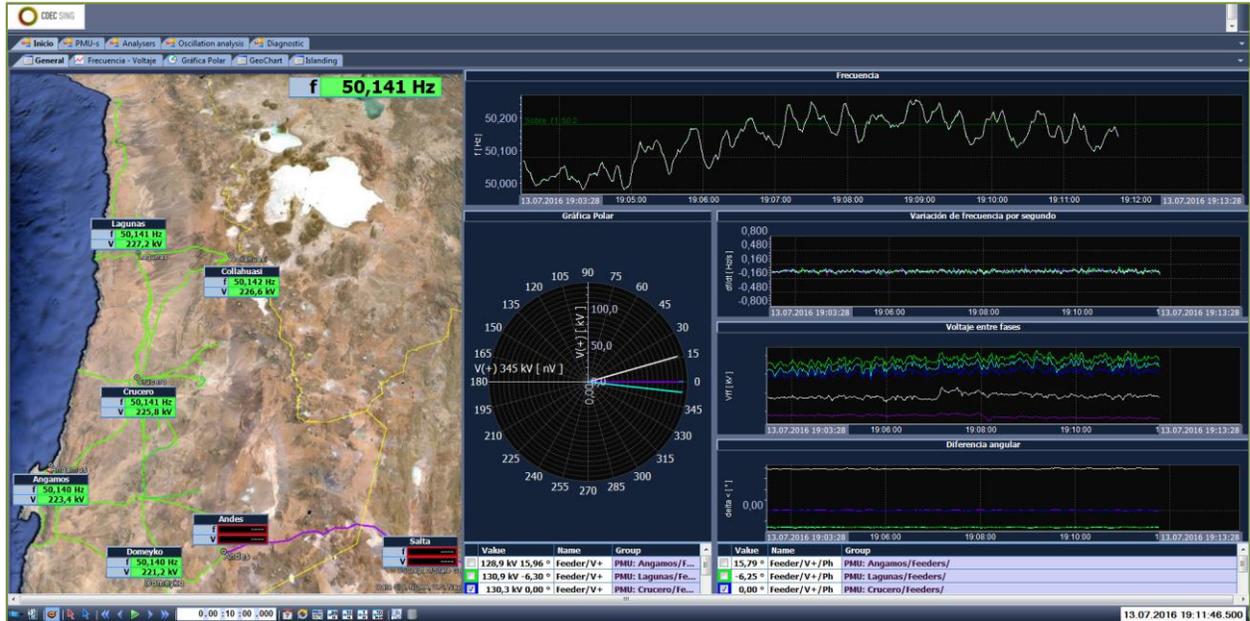
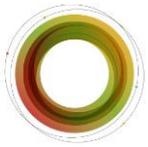


Figura 9. Verificación de cumplimiento normativo Art. 61.

Además, el despliegue vigente dispone de:

- ✓ Un conjunto de *pestañas* ubicadas en el extremo superior izquierdo, que permiten acceder a diferentes visualizaciones gráficas y aplicaciones disponibles, entre las que se identifican: Detectores de oscilación (*Oscillations Detectors – OD*), Detectores de isla eléctrica (*Islanding*), entre otros.
- ✓ Las herramientas en el extremo inferior izquierdo, las que permiten consultar la base de datos fasoriales históricos almacenados en una resolución de 50 muestras/seg, para una ventana de interés desde los últimos 10 minutos de registros hasta los 30 días de almacenamiento rotativo.
- ✓ La capacidad de exportar datos fasoriales a un archivo en formato texto (.CSV), para un periodo de tiempo definido por el usuario (ver Figura 10).

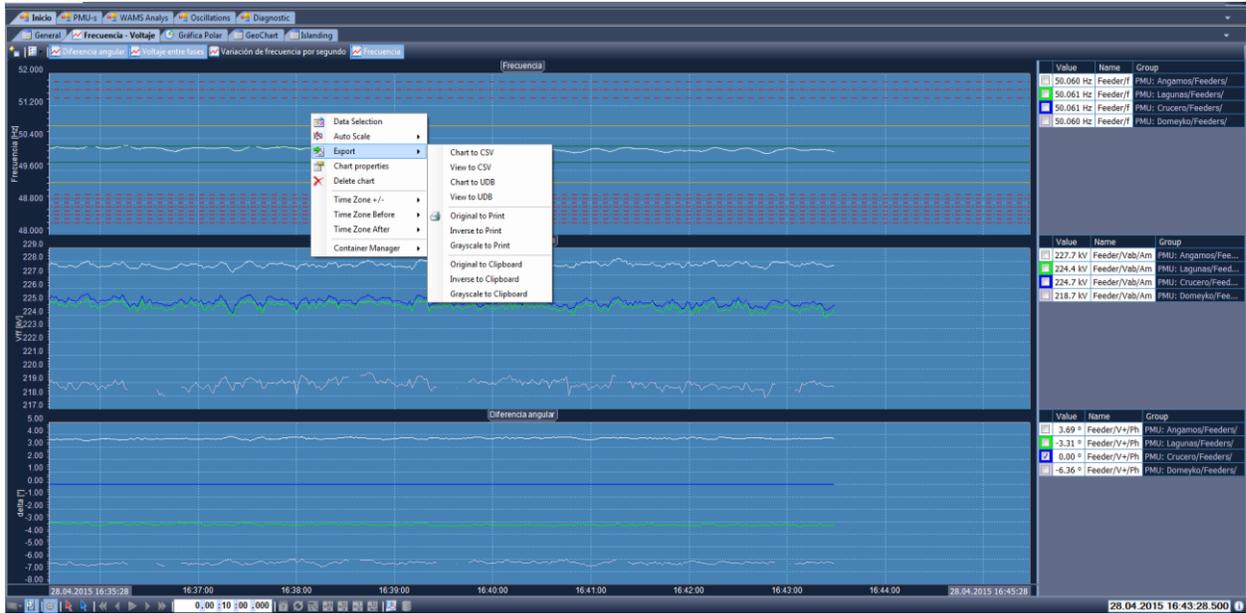


Figura 10. Verificación de cumplimiento normativo Art. 61.

■ **Art. 62 Registros de eventos transitorios**

La plataforma de monitoreo está habilitada para proporcionar toda información relativa a eventos de falla y oscilaciones que se presente en el SI.

Las aplicaciones que actualmente se encuentran disponibles, para monitoreo en tiempo real de los puntos de medida existentes, son las mostradas en la Tabla 15.



Tabla 15. Aplicaciones disponibles en la plataforma de monitoreo.

Puntos de medida	Monitoreo en tiempo real													Aplicaciones				
	medidas instantáneas					medidas en función del tiempo								LD	ID	OD	SC	CVSD
	V	I	f	$\Delta\theta$	CS	V	I	f	$\Delta\theta$	ROCOF	MW	MVar	CS					
S/E Lagunas 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
S/E Crucero 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
S/E Collahuasi 220kV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
S/E Andes 345kV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
S/E Salta 345kV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
S/E Angamos 220kV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
S/E Domeyko 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		

Donde:

CS : Componentes simétricas.

LD : Detector de nivel (Level Detector).

ID : Detector de isla eléctrica (Islanding Detector).

OD : Detector de oscilaciones (Oscillation Detector).

SC : Verificación de sincronismo (Synchrocheck).

CVSD : Detector de estabilidad de tensión (Corridor Voltage Stability Detector).



7. PLAN DE EXPANSIÓN DE LA RED WAM

7.1 ESCENARIO TOPOLÓGICO

El análisis de la expansión de la Red WAM ha sido desarrollado partiendo de la base que las nuevas instalaciones deberán ser integradas al módulo de monitoreo del CDEC-SING dentro de plazos acotados, establecidos en el Art. 64 del Anexo Técnico. Por este motivo es que la condición topológica de interés para este estudio, considera las instalaciones existentes del SING y las nuevas instalaciones cuyas fechas de puesta en servicio han sido informadas por la CNE mediante Resolución Exenta N°526 de julio de 2016. Estas últimas obras se indican en la Tabla 16 que se muestra a continuación:

Tabla 16. Cuadro resumen con las nuevas instalaciones que se interconectan al SING en el periodo 2016-2017.

Nombre	mes	año	Potencia [MW]
Bolero etapa I	julio	2016	42
Kelar	julio	2016	517
Bolero etapa II	julio	2016	42
Finis Terrae II	julio	2016	69
Bolero Etapa III	agosto	2016	21
Sierra Gorda	agosto	2016	112
Cochrane unidad 2	octubre	2016	236
PV Cerro Dominador	octubre	2016	100
Uribe Solar	octubre	2016	50
Bolero Etapa IV	octubre	2016	41
Blue Sky 1	octubre	2016	34
Blue Sky 2	octubre	2016	51,6
Cerro Pabellón	diciembre	2016	48
Arica Solar 1 Etapa 1 y II	Enero	2017	40
Quillagua I	marzo	2017	23
Planta solar Pular	junio	2017	28,9
Planta solar Paruma	junio	2017	21,4
Planta solar Lascar Etapa I y II	junio	2017	64,6
CSP Cerro Dominador	junio	2017	110
Huatacondo	septiembre	2017	98
Usya	octubre	2017	25
Quillagua II	octubre	2017	27



7.2 SELECCIÓN DE INSTALACIONES

La propuesta de nuevas instalaciones que se integrarán a la Red WAM dentro del periodo 2016 – 2017, han sido seleccionadas en base a una matriz de evaluación, la que fue construida considerando la totalidad de las instalaciones existentes en el SING (conforme con el escenario topológico mostrado en la sección 7.1), los distintos fenómenos eléctricos que afectan al SING y algunas situaciones particulares que han sido advertidas durante la operación del sistema que, por representar una condición de vulnerabilidad, son de interés para ser monitoreados mediante la Red WAM.

Los fenómenos de interés han sido identificados a partir de los estudios y análisis desarrollados por las direcciones técnicas de CDEC-SING, entre los que se tienen:

- Oscilaciones de potencia.
- Formación de islas eléctricas.
- Estabilidad de tensión.
- Respuesta en frecuencia.
- Estabilidad de pequeña señal (local, inter-planta, inter-área).
- Sobrecargas del sistema de transmisión.
- Integración con el Estimador de Estado SCADA.

Los requerimientos que nacen de situaciones particulares, están asociados a la experiencia recogida por CDEC-SING en la operación del sistema como también de eventos ocurridos en éste que han sido de interés para someterlos a análisis.

La Tabla 17 presenta la matriz de evaluación, identificando en ella las instalaciones seleccionadas y los fenómenos o situaciones particulares que podrán ser monitoreados a través de la plataforma de monitoreo y que además facilitarán/mejorarán las maniobras operacionales y proveerán de una mejorada observabilidad del sistema dadas las limitaciones de muestreo que presenta el SCADA.

Es importante mencionar que las barras y paños de línea indicados, fueron preseleccionados dentro del universo de instalaciones en 220kV del SING, considerando como criterio general las prácticas internacionales de sistemas donde estas plataformas se encuentran operativas desde hace más de 10 años, y en particular, que permitieran monitorear fenómenos eléctricos identificados en estudios internos, análisis post-mortem realizados por CDEC-SING, o una situación/experiencia operacional que evidenciara la necesidad de instalar y habilitar nuevos puntos de medida en el SING.



Tabla 17. Matriz de evaluación utilizada para identificar las instalaciones candidatas a formar parte del Plan de Expansión de la Red WAM.

S/E	Instalaciones seleccionadas	Tipo de Barra		Fenómenos de Interés							Otro	
		Retiro	Inyección	OP	IE	ET	RF	Est. pequeña señal				Sobrecargas
								Local	Inter-planta	Inter-área		
Andes	Barra Andes 345kV	✓			✓		✓					✓
Atacama	Barra Atacama 220kV BP1	✓	✓	✓	✓	✓	✓					
	Barra Atacama 220kV BP2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Tarapacá	Barra Tarapacá 220kV - BP1	✓	✓	✓	✓	✓	✓					
Tocopilla	Barra Tocopilla 220kV BP1		✓	✓	✓	✓	✓				✓	
	Barra Tocopilla 220kV BP2		✓	✓	✓	✓	✓				✓	
Domeyko	Línea 220kV Domeyko – Puri	N/A	N/A				✓					

Donde:

OP : Oscilación de Potencia.

IE : Isla Eléctrica.

ET : Estabilidad de tensión.

RF : Respuesta en frecuencia.

Otro : Situaciones particulares advertidas durante la operación del SING.



En base a los resultados de la evaluación, las instalaciones seleccionadas para incorporar nuevos puntos de medida, o bien habilitar señales adicionales en equipos PMU existentes, se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Instalaciones que forman parte del Plan de Expansión de la Red WAM

S/E	Requerimiento	Departamento de CDEC-SING que posee el requerimiento
Andes 345kV	Instalación de un (1) equipo PMU con medida de tensión de barra en 345kV.	CDC - DIS
Atacama 220kV	Instalación de un (1) equipo PMU con medida de tensión de barra en 220kV.	CDC – DOp
Tarapacá 220kV	Instalación de un (1) equipo PMU con medida de tensión de barra en 220kV.	CDC – DOp
Tocopilla 220kV	Instalación de un (1) equipo PMU con medida de tensión de barra en 220kV.	CDC – DIS - DOp
Domeyko 220kV	Instalación de un (1) equipo PMU con medida de tensión y corriente proveniente del Paño de Línea 220kV Domeyko – Puri.	CDC – DIS - DOp
	Habilitar en el equipo PMU existente en la S/E, la medida de corriente proveniente del Paño de Línea 220kV Domeyko – Laguna Seca	DIS

De acuerdo con lo indicado con el Art. 64 del Anexo Técnico, las empresas coordinadas deberán instalar e implementar bajo su responsabilidad, los equipos en los puntos de medida indicados en la Tabla 18, cumpliendo los requerimientos técnicos mínimos que se citan en el Anexo de este estudio.

7.3 JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO PARA LOS PUNTOS DE MEDIDA

A continuación, se presentan las justificaciones técnicas que sustenta los requerimientos citados en la Tabla 18.

7.3.1 S/E Andes

Actualmente, como se mencionó en la sección 6.1 de este estudio, la Red WAM permite monitorear las transferencias de potencia a través del enlace entre Chile y Argentina mediante dos (2) equipos PMU instalados en ambos extremos del paño de Línea 1x345kV Andes-Salta, y para los que se han incorporado los fasores de tensión y corriente provenientes de los TP y TC del citado paño. Bajo este escenario, y considerando un proceso de interconexión SING-SADI, sólo será posible monitorear mediante la Red WAM la diferencia de frecuencia -de forma aproximada- entre el SING y el SADI, pero no así las medidas de diferencia de tensión (ΔV) y de diferencia angular ($\Delta \theta$) que influyen en el proceso mismo.



Adicionalmente, y al momento de la sincronización de ambos sistemas, se ha presentado una perturbación de potencia, de magnitud variable para cada proceso, cuyo máximo nivel ha superado los 90MW de transferencia SING-SIC, en un instante de corto tiempo. Esto conlleva al aumento del ángulo de torque de cada generador del SING, es decir la posición angular de la FMM del estator respecto de la FMM del rotor, lo que disminuye la inercia natural del sistema producto del requerimiento de energía cinética rotórica que genera la perturbación.

En la Figura 11 se presenta un registro de la magnitud alcanzada por la perturbación de potencia (90MW) durante uno de los procesos de sincronización SING-SADI y en la Figura 12 la pérdida de la inercia natural del sistema producto del requerimiento de energía cinética de la perturbación en comento.

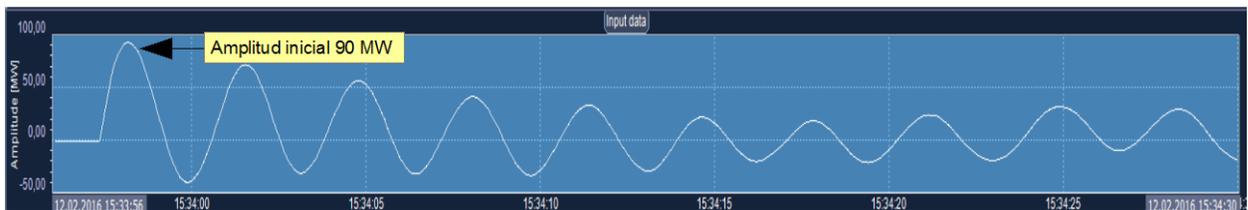


Figura 11. Magnitud de la perturbación de potencia en el instante de la interconexión SING-SADI.

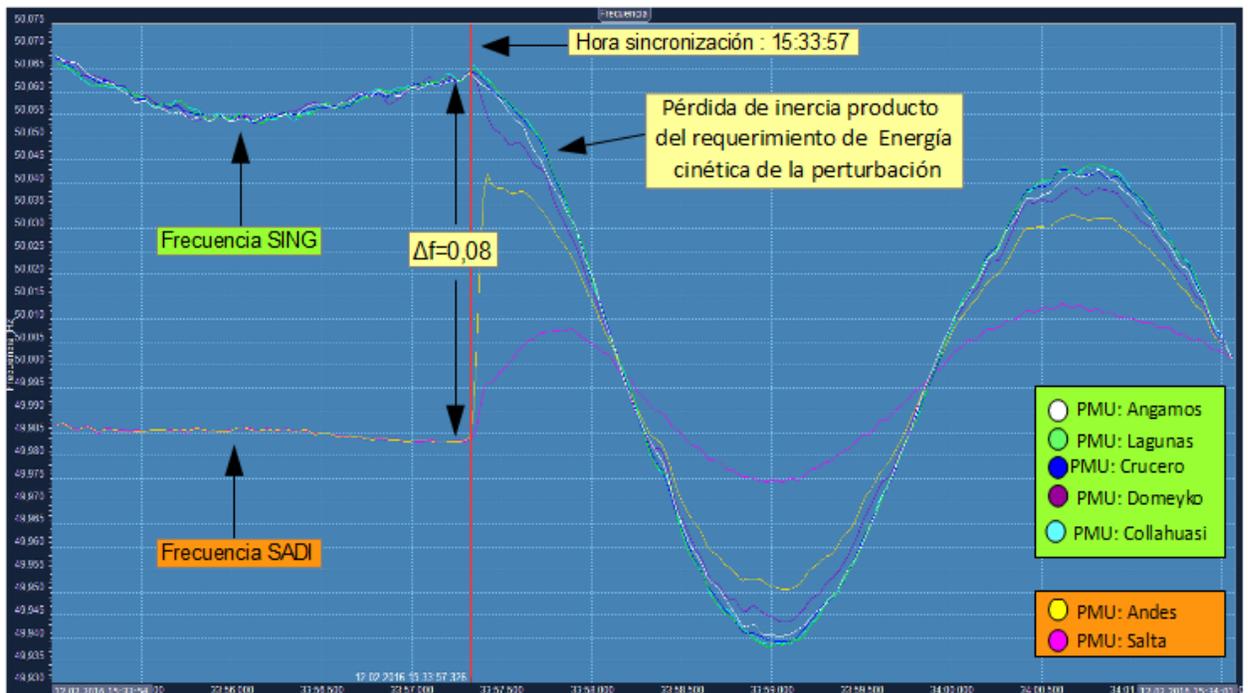


Figura 12. Pérdida de inercia en el instante de la interconexión SING-SADI.



En resumen, los beneficios que se obtendrán al instalar un equipo PMU en la barra de S/E Andes 345kV, desde el punto de vista de la seguridad operacional, son los siguientes:

- ✓ Observabilidad de todas variables que influyen en el proceso de interconexión SING-SADI.
- ✓ Posibilidad de verificar y validar las condiciones de operación del sincronizador de S/E Andes, e introducir modificaciones al mismo, de ser necesarias.
- ✓ Efectuar la interconexión SING-SADI en un entorno de perturbaciones de potencia de reducida magnitud, con el propósito de disminuir la excursión del ángulo de torque de cada generador del SING.

7.3.2 S/E Atacama

La necesidad de instalar e implementar un equipo PMU con medidas de tensión de barra de S/E Atacama, nace de las dificultades que ha experimentado el CDC y DOP al sincronizar la Línea 220kV Atacama – Esmeralda y la Línea 220kV Atacama – Domeyko, en situaciones de operación normal y al ejecutar el PRS, lo que conlleva a:

- ✓ Sobrecargar el transformador de Capricornio o Mejillones (Evento de Falla N° 4020, acontecido el 24-12-2015).
- ✓ Problemas de tensión en zona Sur Cordillera.

Adicionalmente, se advierten problemas para cerrar el JS de S/E Atacama, lo que limita la generación máxima de los ciclos combinados de la Central Gas Atacama (GAG).

Finalmente, con la habilitación de este punto de medida será posible monitorear los fenómenos oscilatorios advertidos en el ERST cuando se presenta una falla en la Línea 2x220kV Atacama – Encuentra en un escenario de mantenimiento de su circuito paralelo.

7.3.3 S/E Tarapacá

La necesidad de instalar e implementar un equipo PMU en S/E Tarapacá con la medida de tensión de barra, nace a raíz de las siguientes dificultades detectadas por el CDC y DOP relacionadas con:

- ✓ La sincronización de islas eléctricas (Zona Tarapacá - Lagunas).
- ✓ Las unidades indisponibles de partida rápida de la zona no están siendo reparadas por ENGIE.
- ✓ Se prevén futuros problemas de tensión dada la penetración de proyectos ERNC en la zona.

Las citadas situaciones revisten una condición de riesgo para:



- ✓ El abastecimiento de consumos regulados, ante falla en la Línea 220kV Tarapacá – Cóndores, o durante la ejecución del PRS.
- ✓ Levantar el sistema eléctrico, por indisponibilidad de unidades de partida rápida y no poder sincronizar con generación desde Crucero – Lagunas.

7.3.4 S/E Tocopilla

La necesidad de instalar un punto de medida en S/E Tocopilla, atiende a requerimientos de observabilidad de la ocurrencia de islas eléctricas frente a fallas de gran magnitud. Esto permitirá mejorar el monitoreo de la zona Tocopilla, la que se ha desacoplado del SING en casos de fallas extremas, como las que han ya han ocurrido con anterioridad en el SING (por ejemplo, el Evento de Falla N°2788, junio de 2011).

A su vez, el Plan de Defensa contra Contingencias Extremas (PDCE) vigente, identifica a la falla de Severidad 6 de la Línea 2x220kV Central Tocopilla-Crucero, como contingencia extrema, por lo que esta localización permite, previo a su implementación, disponer de un monitoreo en tiempo real del comportamiento transitorio de la zona, y utilizar estos nuevos datos fasoriales, para revisar y complementar la modelación transitoria del sistema, verificando con mayor precisión la respuesta esperada del citado plan.

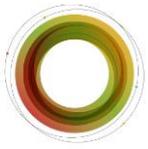
Adicionalmente, se espera una alta penetración de ERNC en la zona, por lo que resulta relevante disponer de una adecuada observabilidad de las variaciones de frecuencia o tensión rápidas que se produzcan por la variabilidad de la generación renovable.

En síntesis, este nuevo punto permitirá:

- ✓ Monitorear la zona Tocopilla, la cual se ha comportado como isla en eventos de gran magnitud ocurridos en el SING.
- ✓ Disponer de datos fasoriales para validación de modelos del comportamiento transitorio del sistema, y utilizarlos en el desarrollo del PDCE.

7.3.5 S/E Domeyko

Actualmente, el equipo PMU ubicado en S/E Domeyko se encuentra alambrado con la señal de tensión proveniente del TP del paño de línea 220kV Domeyko – Laguna Seca. En esta condición, al presentarse un evento de falla sobre dicha línea se perderá la observabilidad que se tiene de los problemas de estabilidad de tensión y de compensación de reactivos de la zona sur cordillera.



Con motivo de lo expuesto, se requiere la instalación de un nuevo equipo PMU en S/E Domeyko, para el que se deberán habilitar las señales de tensión y corriente provenientes del paño de línea 220kV Domeyko – Puri, lo que permitirá:

- ✓ Asegurar redundancia de la medida, principalmente frente a una condición de falla que afecte al paño de línea donde se encuentra instalado el equipo existente.
- ✓ Ampliar la observabilidad de la zona sur cordillera.
- ✓ Monitorear los problemas de estabilidad de la zona.

Como una medida complementaria, se requiere que MEL habilite en el equipo PMU existente en S/E Domeyko, la señal de corriente proveniente del TC del paño de línea 220kV Domeyko – Laguna Seca, y con ello, obtener la medición indirecta del nivel de tensión de S/E 220kV Laguna Seca.



8. ACTUALIZACIONES

8.1 INFORMACIÓN TÉCNICA

CDEC-SING realizará para todos los puntos de medida que se encuentran actualmente operativos, un levantamiento de las condiciones de instalación y operación de los equipos PMU y de sus respectivos sistemas de comunicaciones, con lo que se podrán identificar las medidas de mejora que sean requeridas para asegurar el funcionamiento óptimo de la Red WAM.

8.2 NUEVOS PUNTOS DE MEDIDA

De acuerdo con el Plan de Expansión indicado en la sección 7, CDEC-SING deberá realizar la integración de los nuevos puntos de medida, dentro de la plataforma de monitoreo fasorial WAProtector, por lo que deberán considerarse acciones de configuración y parametrización de la citada plataforma.

Asimismo, en los casos de habilitación de señales en equipos PMU existentes, deberá verificar la correcta integración de nuevas medidas.

8.3 HARDWARE

Con motivo de la integración de los cinco (5) nuevos equipos PMU, se estima que el servidor PDC deberá disponer de capacidad de almacenamiento para dar cumplimiento al Art. 57 y Art. 58 del Anexo Técnico, de a lo menos los valores mostrados en la Tabla 19.

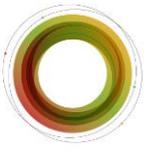
Tabla 19. Requerimientos de capacidad del PDC.

N° de PMU	12
Capacidad del PDC [GB]: Según Art. 57 del Anexo Técnico	111,96
Capacidad del PDC [GB]: Según Art. 58 del Anexo Técnico	2,14

Considerando las características técnicas del servidor PDC de la Red WAM mostradas en la Tabla 3, no se advierte la necesidad de intervenir el servidor PDC para ampliar su capacidad, o efectuar medidas de reemplazo o actualización de equipamiento.

8.4 SISTEMAS DE COMUNICACIONES

CDEC-SING realizará las gestiones tendientes a proveer de redundancia al enlace de comunicaciones que actualmente se utiliza para la interrogación remota del servidor PDC ubicado en S/E Crucero.



8.5 DESPLIEGUES GRÁFICOS Y APLICACIONES

En virtud de la integración de los cinco (5) nuevos puntos de medida, CDEC-SING deberá realizar la actualización del despliegue gráfico existente, y la configuración y parametrización del software fasorial, para permitir el monitoreo de las variables provenientes de dichas instalaciones.

Dentro de las aplicaciones que CDEC-SING habilitará en la plataforma de monitoreo, se consideran los requerimientos del Art. 61 del Anexo Técnico SM, los que son mostrados en la Tabla 20.



Tabla 20. Configuración de aplicaciones en la plataforma de monitoreo para los nuevos puntos de medida.

Puntos de medida	Monitoreo en tiempo real													Aplicaciones				
	medidas instantáneas					medidas en función del tiempo								LD	ID	OD	SC	CVSD
	V	I	f	$\Delta\theta$	CS	V	I	f	$\Delta\theta$	ROCOF	MW	MVar	CS					
S/E Andes 345kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
S/E Atacama 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
S/E Tarapacá 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
S/E Tocopilla 220kV	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
S/E Domeyko 220kV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Donde:

CS : Componentes simétricas.

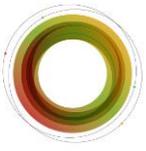
LD : Detector de nivel (Level Detector).

ID : Detector de isla eléctrica (Islanding Detector).

OD : Detector de oscilaciones (Oscillation Detector).

SC : Verificación de sincronismo (Synchrocheck).

CVSD : Detector de estabilidad de tensión (Corridor Voltage Stability Detector).



9. PROGRAMA DE TRABAJO

Los plazos de ejecución de las actividades requeridas para dar cumplimiento al plan de expansión y a las actualizaciones indicadas en la sección 7 y 8 de este estudio, respectivamente, serán definidos entre CDEC-SING y las empresas coordinadas, conforme lo indica el Art. 64 del Anexo Técnico.



10. PLAN DE EXPANSIÓN 2017 - 2018

10.1 INSTALACIONES POR EVALUAR

Dado que el periodo de implementación para llevar a cabo las acciones de expansión y/o actualización de la Red WAM está acotado a los plazos que indica el Art. 64 del Anexo Técnico, el estudio se desarrolló considerando una condición topológica de corto plazo para SING, de manera de asegurar que los resultados obtenidos y las medidas que deberán ser adoptadas para cumplir con los requerimientos normativos, se lleven a cabo en forma exitosa dentro del periodo reglamentario.

Con motivo de lo expuesto, se decidió postergar la integración de instalaciones existentes del SING, como también de las asociadas a la "Interconexión SING - SIC", estas últimas declaradas en el Plan de Expansión 2014-2015, emitido en marzo de 2015 a través de la Resolución Exenta N° 96.

Sin perjuicio de lo anterior, se presentan las instalaciones de interés que, en primera instancia, serán incluidas para ser evaluadas en la edición 2017 de éste estudio.

▪ Instalaciones existentes

- ✓ S/E Kapatur 220kV.
- ✓ S/E Tocopilla 110kV.
- ✓ S/E A 110kV.

La habilitación de nuevos puntos de medida en estas instalaciones, permitirían monitorear problemas de estabilidad de tensión y/o sobrecargas en la zona de S/E Kapatur y la ocurrencia de oscilaciones de potencia y la formación de la isla eléctrica natural que se produce entre la zona de Tocopilla 220kV y 110kV

▪ Instalaciones futuras

- ✓ S/E Los Changos 500/220kV
- ✓ S/E Nueva Cardones 500/220kV
- ✓ Línea 2x500kV Los Changos-Cumbres
- ✓ Línea 2x500kV Cumbres-Nueva Cardones
- ✓ Línea 2x220kV Los Changos-Kapatur
- ✓ 2 Autotransformadores 750 MVA 500/220kV en S/E Los Changos.

Los nuevos puntos de medida asociados a estas instalaciones, permitirían supervisar el comportamiento dinámico de la red en 500kV y los potenciales fenómenos oscilatorios inter-área que se presenten entre el SING y el SIC.



Los antecedentes que justifiquen la integración al módulo de medición fasorial de nuevos puntos de medida asociado a las instalaciones existentes del SING como a las futuras obras de interconexión antes mencionadas, y los requerimientos particulares que deberán cumplir para ello, serán evaluados y presentados en la versión 2017 de este estudio.

10.2 ANÁLISIS PROPUESTO

En el marco del desarrollo de la edición 2017 de este estudio, se prevé la necesidad de realizar un análisis de zonificación bajo arquitectura distribuida, que apunte a la definición de zonas de monitoreo.

A modo de referencia, en la Figura 13 se presenta una propuesta de zonificación la que considera:

- Una zona Red WAM Norte, conformada por instalaciones que actualmente pertenecen al SING y al SIC norte.
- Una zona Red WAM Centro – Sur.
- Una zona Red WAM Sur.

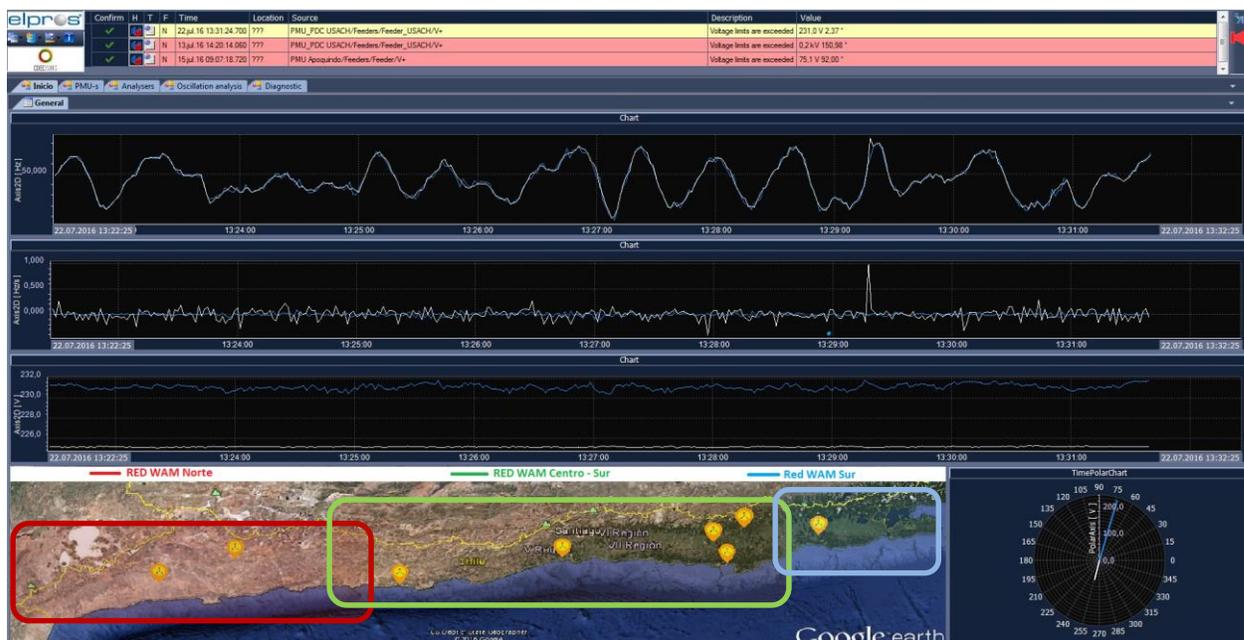


Figura 13. Proyección: Red WAM Nacional.

Esta visualización, representa la observabilidad nacional esperada del sistema interconectado, desde el punto de vista de un monitoreo nacional, bajo una arquitectura distribuida compuesta por:

1. Un (1) equipo servidor Súper-PDC centralizado, cuya función base sería:
 - ✓ Monitoreo geográfico del estado del Sistema Interconectado Nacional.



- ✓ Visualización de fenómenos transitorios inter-área.
 - ✓ Análisis de propagación de perturbaciones de gran magnitud.
2. Tres (3) equipos servidores PDC zonales, con capacidad de proceso completo y almacenamiento de datos de medidas a nivel zonal, cuyas funciones básicas serán:
- ✓ Monitoreo de eventos transitorios zonales.
 - ✓ Evaluación del desempeño del control de frecuencia y tensión zonal.
 - ✓ Registro de eventos de falla zonales.

El número de equipos servidores PDC que considere la arquitectura distribuida, es referencial.

El desarrollo de este análisis, deberá realizarse en conjunto con la implantación de la Red WAM a realizarse en el Sistema Interconectado Central (SIC).

FIN DEL ESTUDIO



11. ANEXO

11.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE IMPLEMENTACIÓN

11.1.1 Hardware

Los equipos PMU que se integren a la Red WAM, deberán cumplir a lo menos con las siguientes características:

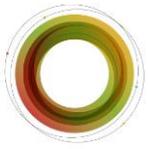
- Clase de precisión : IEEE C37.118 M-Class
- Tasa de muestreo : 50 muestras/segundo.
- Interfaz de comunicaciones : A lo menos un (1) puerto Ethernet (10 Base T para IEEE 802.3I) para su conexión con el servidor PDC correspondiente.
- Protocolo de sincrofasores : IEEE C37.118-2005 o IEEE C37.118-2011.
- Entradas tensión/corriente : Análogas y compatibles con las señales análogas de tensión y corrientes que serán medidas.
- Receptor GPS : Integrado en el equipo o suministrado en forma independiente. Es requisito que, en caso de sincronización mediante reloj externo, el equipo PMU pueda ser sincronizado a través de un puerto IRIG-B.
- Precisión de la sincronización : Dentro de $1\mu\text{s}$ de precisión, considerando una base de tiempo sincronizada mediante GPS.
- Estándar de sincronización : UTC $\pm 1\mu\text{s}$, con posibilidad de ser convertido a hora local.
- Compatibilidad : A nivel de protocolos de comunicaciones (ver ítem 6.2, verificación del Art 31 del Anexo Técnico).

11.1.2 Adquisición de señales y clase de precisión de los transformadores de medida

El equipo PMU deberá estar habilitado con las medidas de tensión y/o corriente, las que deberán ser obtenidas prioritariamente desde los circuitos de TP y TC con clase de precisión de medida.

11.1.3 Alimentación eléctrica

La unidad PMU y los equipos asociados al sistema de comunicaciones, deberán encontrarse alimentados desde la red segura de energía eléctrica de la subestación, de modo que ante cualquier falla que



ocasiona la pérdida de energía convencional se garantice la continuidad de la medición, por a lo menos 8 horas.

11.1.4 Alambrado de las señales de tensión

Con el propósito de que las medidas de tensión provenientes de los TP de barra sean redundantes, el Coordinado deberá implementar una solución conmutadora que permita integrar ambas señales de tensión y que opere bajo la lógica donde la no detección de la medida de voltaje en una de las barras, el dispositivo enlace automáticamente la medida de tensión proveniente de una segunda barra.

El diseño de la lógica de conmutación deberá ser presentado a CDEC-SING para su aprobación, previo a ser implementado.

11.1.5 Sistema de comunicaciones

Las empresas coordinadas deberán habilitar un sistema de comunicaciones destinados a la transmisión de datos fasoriales entre el punto de medida y el servidor PDC ubicado en S/E Crucero, conforme lo indica el Art. 47 del Anexo Técnico.

El ancho de banda mínimo que deberá encontrarse disponible para estos fines será de 128kb/s, no obstante, este valor tendrá que evaluarse en función de la cantidad de datos fasoriales que serán transmitidos. El cálculo de ancho de banda requerido, será de responsabilidad del Coordinado, y deberá ser presentado a CDEC-SING junto con la documentación relacionada que se indica en el ítem 11.1.6.

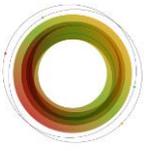
Conforme lo indica el Art. 47, el estándar para la transmisión de datos fasoriales entre los equipos PMU y el servidor PDC será IEEE C37-118.

11.1.6 Documentación.

Las empresas coordinadas cuyas instalaciones actualmente participan de la Red WAM, y de igual forma para los futuros Coordinados que deberán habilitar nuevos puntos de medida, es requerimiento de CDEC-SING presentar toda la documentación técnica relacionada con el proyecto de instalación y puesta en servicio (PES) del equipo PMU y de sus sistemas relacionados como son: sistemas de comunicaciones y alimentación eléctrica u otros.

En particular, los proyectos de instalación e implementación y/o habilitación, requieren la entrega de la siguiente información:

- ✓ Plano Layout de disposición en sala y armario.



- ✓ Plano de conexión de señales de tensión y corriente, identificando su procedencia (TP y TC, de barra o paño de línea, según corresponda).
- ✓ En caso de que la señal de sincronización para el equipo PMU provenga de un equipo externo, deberá entregarse la documentación técnica de éste (marca, modelo y manual del fabricante).
- ✓ Planos de la red de comunicaciones, identificando medios de comunicación y enrutamientos internos/externos.
- ✓ Diagrama unilineal de la red de alimentación eléctrica (convencional y respaldada) para el equipamiento PMU y comunicaciones.
- ✓ Manuales del fabricante.

FIN DEL ANEXO