



**ESTUDIOS
ELECTRICOS**

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Statkraft
Chile
Parque Eólico Los Cerrillos
Informe Final - Control de Tensión



CÓDIGO DE PROYECTO EE-2024-086
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2024-1929
REVISIÓN A

18 dic. 24



Este documento **EE-EN-2024-1929-RA** fue preparado para Statkraft por el Grupo Estudios Eléctricos.

Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

Ing. Claudio Celman
Sub-Gerente Dpto. Ensayos
claudio.celman@estudios-electricos.com

Ing. Andrés Capalbo
Sub-Gerente Dpto. Ensayos
andres.capalbo@estudios-electricos.com

Ing. Pablo Rifrani
Gerente Dpto. Ensayos
pablo.rifrani@estudios-electricos.com

Informe realizado en colaboración con todas las empresas del grupo: **Estudios Eléctricos S.A., Estudios Eléctricos Chile, Estudios Eléctricos Colombia y Electrical Studies Corp.**

Este documento contiene 71 páginas y ha sido guardado por última vez el 18/12/2024 por César Colignon; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	18.12.2024	Para presentar.	MP	CiC	AC

Todas las firmas digitales pueden ser validadas y autenticadas a través de la web de Estudios Eléctricos; <http://www.estudios-electricos.com/certificados>.



CONTENIDO

1	RESUMEN EJECUTIVO	5
2	INTRODUCCIÓN	6
	2.1 Descripción de los participantes	6
	2.2 Nomenclatura.....	7
3	REQUERIMIENTO NORMATIVO	8
	3.1 Control de tensión	8
	3.1.1 Definición.....	8
	3.1.2 Requerimientos asociados a la prestación	8
4	CONTEXTO DE LOS ENSAYOS.....	10
	4.1 Procedimiento de pruebas.....	10
	4.2 Uso de registros de ensayos previos	10
	4.3 Instrumental primario utilizado para la adquisición de datos.....	11
	4.4 Registro complementario de señales con equipos de planta.....	13
	4.5 Metodología general de los ensayos	13
5	VERIFICACIÓN DEL CONTROL DE TENSIÓN / POTENCIA REACTIVA DEL PARQUE	15
	5.1 Ensayos a nivel aerogenerador	15
	5.1.1 Respuesta dinámica del control local de potencia reactiva	16
	5.2 Ensayos a nivel planta.....	20
	5.2.1 Respuesta dinámica del control de potencia reactiva del PPC	21
	5.2.2 Respuesta dinámica del control de factor de potencia del PPC.....	25
	5.2.3 Respuesta dinámica del control de tensión del PPC.....	29
	5.3 Análisis.....	33
	5.3.1 Pruebas a nivel aerogenerador	33
	5.3.2 Pruebas a nivel planta.....	33
6	VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA PQ TEÓRICO MÁXIMO	34
	6.1 Puntos operativos alcanzados.....	35
	6.1.1 Análisis	40
	6.2 Curvas de capacidad	41
	6.2.1 Diagrama PQ de la central	42
	6.2.2 Resumen de valores a informar	45
	6.2.3 Ensayos de Curva PQ para tensión en POI 1.0 pu.....	46



	6.2.4 Ensayos de Curva PQ para tensión en POI 1.05 pu	47
7	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	48
8	ANEXOS	49
	8.1 Verificación de curvas de capacidad en diferentes niveles de tensión	49
	8.1.1 Verificación curva PQ @ 1.05 p.u.	49
	8.1.2 Verificación curva PQ @ 1.00 p.u.	52
	8.2 Medidas complementarias	55
	8.3 Información del PPC	59
	8.4 Protección de los aerogeneradores.....	60
	8.5 Antecedentes del transformador principal	61
	8.6 Antecedentes de los transformadores de bloque.....	62
	8.7 Antecedentes de los transformadores auxiliares	62
	8.8 Diagrama unilineal.....	63
	8.9 Homologación de ensayos.....	64
	8.10 Archivos adjuntos entregados	64
	8.11 Acta de pruebas SSCC	67
	8.12 Certificado de calibración del equipamiento utilizado.....	70



1 RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento resume los resultados del proceso de Verificación de Servicios Complementarios (SSCC) de **Control de Tensión** del **Parque Eólico Los Cerrillos**, Número Único de Proyecto (NUP) 994.

El informe muestra los ensayos y análisis realizados con el objeto de dar cumplimiento a las exigencias establecidas en la Norma Técnica de Servicios Complementarios vigente, siguiendo los lineamientos estipulados en las "Guías de Verificación de Servicios Complementarios" expedida por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

La verificación del SSCC de CT se complementa con el informe de curvas PQ teóricas máximas del parque emitido en la etapa de análisis preliminar previo al desarrollo del procedimiento de ensayos, según el documento "*EE-EN-2024-0934-RA_Procedimiento_Ensayos_SSCC_PE_Los_Cerrillos*".

Previamente se llevaron adelante pruebas en el contexto del proceso de "*Validación de Modelos Dinámicos*" (VMD) y de "*Parámetros Operacionales*" (Pmax, MT y PPyD). Debido a que varias de las pruebas realizadas durante los procesos mencionados resultan similares a las pruebas solicitadas en la Norma Técnica de Servicios Complementarios vigente, es que se propuso reutilizar dichos ensayos para de esta manera optimizar la cantidad de ensayos y agilizar el proceso de "*Verificación de Servicios Complementarios*".

El enfoque propuesto fue presentando en el documento "*EE-MI-2024-1746-RA_Minuta_Ensayos_SSCC_homologable*" y aprobado por el Coordinador Eléctrico Nacional. Dicho informe detalla el conjunto de ensayos previamente realizados que resultan homologables en el proceso de "*Verificación de Servicios Complementarios*". La aprobación de dicho documento por el CEN se encuentra adjunta en el anexo 8.9.

Se verifica el correcto desempeño dinámico de la instalación para la prestación del Servicio Complementario de Control de tensión.

Se verifican correctamente los valores máximos de inyección y absorción de reactivos de la instalación en todo el rango de potencia activa. Sin embargo, hubo restricciones del sistema de transmisión para modificar la tensión del punto de interconexión.



2 INTRODUCCIÓN

El Parque Eólico Los Cerrillos, ubicado en la comuna de Litueche, región de O'higgins, se compone de ocho (8) aerogeneradores, marca Nordex modelo N163 TS148 de 5.9 MVA de potencia aparente nominal cada uno, totalizando una potencia instalada de 47.2 MVA.

Cada uno de los aerogeneradores de 5.9 MVA de capacidad nominal y de 750 V de tensión nominal, cuentan con su respectivo transformador de bloque de 6.35 MVA de capacidad nominal y de relación de transformación 0.75 kV / 23 kV ($\pm 4 \times 2.5\%$), el cual permite la interconexión de los aerogeneradores con la barra de 23 kV de la subestación Cardonal.

La red colectora del parque está compuesta por dos (2) circuitos alimentadores en 23 kV. Considerando con cuatro (4) aerogeneradores por circuito con sus respectivos transformadores de bloque. La potencia capturada por los circuitos alimentadores es evacuada hacia la barra de 23 kV de la S/E Cardonal 110 kV por un transformador de poder de relación 23 kV / (110 kV $\pm 10 \times 1.25\%$) y 100/133 MVA (ONAN/ONAF) de potencia aparente nominal, el cual corresponde al punto de interconexión del parque.

El parque cuenta con un control conjunto de planta de marca Nordex. Cuenta con los modos de control de tensión, potencia reactiva, factor de potencia, potencia activa y regulación de frecuencia.

2.1 Descripción de los participantes

Empresa	Personal	Cargo
Estudios Eléctricos	Marcelo Calviz	Experto Técnico
Statkraft	Marcelo Santibañez	Ingeniero Eléctrico Senior O&M
Statkraft	Jaime Muñoz	Operador sala de control

Tabla 2.1 – Personal participante

Las pruebas se llevaron a cabo entre los días 20 al 23 de noviembre de 2024.



2.2 Nomenclatura

Tag	Descripción
ETERM	Tensión en bornes del aerogenerador
ITERM	Corriente en bornes del aerogenerador
PELEC	Potencia eléctrica activa en bornes del aerogenerador
QELEC	Potencia eléctrica reactiva en bornes del aerogenerador
UBUS	Tensión en el punto de interconexión
PBUS	Potencia eléctrica activa en el punto de interconexión
QBUS	Potencia eléctrica reactiva en el punto de interconexión
FREC	Frecuencia eléctrica
POI	Punto de interconexión (de sus siglas en inglés "Point Of Interconnection")
SS/AA	Servicios Auxiliares
PPC	Control conjunto de planta (de sus siglas en inglés "Power Plant Controller")
AT	Nivel de alta tensión (110 kV)
MT	Nivel de media tensión (23 kV)
BT	Nivel de baja tensión (0.75 kV)
CEN	Coordinador Eléctrico Nacional
EE	Estudios Eléctricos
CT	Control de tensión
TC	Transformador de corriente
TP	Transformador de potencial
Pmax	Potencia activa neta máxima en el POI
Pmin	Potencia activa neta correspondiente al mínimo técnico en el POI
P1_{WTG}	Despacho del aerogenerador al 10% de la potencia máxima disponible a la hora de los ensayos
P2_{WTG}	Despacho del aerogenerador al 50% de la potencia máxima disponible a la hora de los ensayos
P3_{WTG}	Despacho del aerogenerador al 90% de la potencia máxima disponible a la hora de los ensayos
P1_{PPC}	Despacho de la central a mínimo técnico (Pmin)
P2_{PPC}	Despacho de la central a $(P5+2*P1) / 3$
P3_{PPC}	Despacho de la central a $(P5+P1) / 2$
P4_{PPC}	Despacho de la central a $(2*P5+P1) / 3$
P5_{PPC}	Despacho de la central a potencia máxima (Pmax)
NTSSCC	Norma Técnica de Servicios Complementarios

Tabla 2.2 - Nomenclatura empleada



3 REQUERIMIENTO NORMATIVO

3.1 Control de tensión

El objetivo de esta sección es citar los requerimientos mínimos que debe cumplir cada una de las instalaciones interconectadas al SEN para verificar las capacidades de prestar el servicio de control de tensión según la Norma Técnica de Servicios Complementarios (NTSSCC), y el Anexo Técnico "Verificación de Instalaciones para la Prestación de SSCC".

3.1.1 Definición

Este servicio corresponde a acciones de control que permiten mantener la tensión de operación de las barras del sistema eléctrico en una banda predeterminada, dentro de los niveles admisibles establecidos en la normativa vigente. La naturaleza de la prestación de este servicio se considera local.

3.1.2 Requerimientos asociados a la prestación

Dependiendo de la naturaleza del equipamiento/unidad que preste este servicio complementario se distinguen diferentes tipos de requerimientos:

a) Parques eólicos y fotovoltaicos

- **Control estático:** Esta prestación corresponde a la entrega de una cantidad fija de potencia reactiva, de acuerdo con una consigna previamente establecida por el Centro de Despacho y Control, y dentro de las capacidades establecidas por la curva PQ de cada instalación. En los casos que esta acción sea requerida en ausencia del recurso primario, el costo asociado al consumo de energía incurrido será compensado en el proceso de remuneraciones de los SSCC.
- **Control dinámico:** Esta prestación corresponde a la actuación del regulador de tensión de un parque eólico o solar sobre sus equipos de generación o sobre equipos de suministro de potencia reactiva, para contribuir a mantener la tensión de operación en los niveles admisibles establecidos en la NTSyCS, tanto en régimen permanente como ante contingencias, de acuerdo con la consigna de tensión previamente establecida por el Coordinador y conforme a lo establecido en los artículos 3-8 y 3-9 de la NTSyCS vigente. Este tipo de control se diferenciará en uno de tipo rápido y otro lento, diferenciándose en cuanto a su tiempo de respuesta, que en el primer caso no podrá ser superior a 1 segundo, mientras que para el lento no podrá exceder los 20 segundos. Será el Coordinador por medio del quién definirá si se requiere que alguna instalación preste este tipo de servicio. En los casos que esta acción sea requerida en ausencia del recurso primario, el costo asociado al consumo de energía incurrido será compensado en el proceso de remuneraciones de los SSCC.



Los parques eólicos/fotovoltaicos deberán operar de forma estable y permanente, entregando o absorbiendo reactivos, de acuerdo con los límites establecidos en sus diagramas PQ, considerando las exigencias descritas en la NTSyCS. En el caso de los parques eólicos y fotovoltaicos, esto podrá ser realizado mediante un control por consigna de tensión sobre la barra de inyección al Sistema.

Los parques eólicos y fotovoltaicos de potencia nominal total igual o mayor a 50 [MW] deberán tener un sistema de control que permita recibir una señal proveniente de un control conjunto de potencia reactiva/tensión, cuya función sea controlar la tensión en barras de alta tensión del parque a un valor ajustado por el operador, según el artículo 3-13 de la NTSyCS.

Este servicio podría ser prestado por otras instalaciones, en la medida que cumplan con los requisitos y exigencias técnicas definidos por el Coordinador.



4 CONTEXTO DE LOS ENSAYOS

4.1 Procedimiento de pruebas

El procedimiento de pruebas se informa en el documento técnico **“EE-EN-2024-0934-RA_Procedimiento_Ensayos_SSCC_PE_Los_Cerrillos”**, el cual fue elaborado por Estudios Eléctricos S.A. y aprobado por el Coordinador Eléctrico Nacional.

4.2 Uso de registros de ensayos previos

Tal como se comentó en la sección 1 para la verificación de SSCC de Control de Tensión se homologó un conjunto de ensayos realizados en el proceso de entrada de operación. Dichos ensayos se describen en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2.

Prueba	Homologable para SSCC	Acción
Ensayos dinámicos en 3 estados de carga	Homologable	Utilizar registro de proceso VMD

Tabla 4.1 – Detalle de pruebas a nivel de aerogeneradores

Prueba	Homologable para SSCC	Acción
Pruebas dinámicas de control de potencia reactiva en 3 estados de carga	Homologable	Utilizar registro de proceso VMD
Pruebas dinámicas de control de factor de potencia en 3 estados de carga		
Pruebas dinámicas de control de tensión en 3 estados de carga		

Tabla 4.2 – Detalle de pruebas a nivel planta

Por ende, los ensayos mostrados en los capítulos 5.1 y 5.2 corresponden a los registros utilizados en el proceso de entrada de operación, en específico en el documento **“EE-EN-2024-0751-RB_Informe_Validación_PE_Los_Cerrillos”** correspondiente al informe de validación de modelos del parque.



Los ensayos homologables corresponden a:

- Pruebas dinámicas a nivel aerogenerador de:
 - Control de potencia reactiva
- Pruebas dinámicas a nivel PPC de:
 - Control de potencia reactiva
 - Control de factor de potencia
 - Control de tensión

4.3 Instrumental primario utilizado para la adquisición de datos

Para realizar los ensayos se utilizó un equipo de adquisición de datos (propiedad de EE). Sus principales características se presentan en la Tabla 4.3.

Denominación	Marca / Modelo	N° serie	Certificado de calibración
Analizador de calidad de energía	Janitza / UMG512 Pro	4201 - 5361	Ver Anexo 8.12

Tabla 4.3 – Característica de los equipos de adquisición

Cabe destacar que la adquisición de datos para los ensayos a nivel aerogenerador son llevados a cabo en otra instancia, tal como se indica en la sección 4.2, por lo que no se realiza la conexión de los equipos de adquisición a nivel aerogenerador.

Las señales registradas en el punto de interconexión son las siguientes:

- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Corriente
- Tensión
- Frecuencia eléctrica

Para la medición de las variables eléctricas a nivel planta, al equipo se conectan las tres tensiones (fases A, B y C) y el neutro, junto con las tres corrientes (fases A, B y C) y sus respectivos retornos en el punto de red de alta tensión, a saber, en la S/E Cardonal. En la Figura 4.1 se remarca el punto de conexión utilizado para la medición de las señales. En el anexo 8.8 se muestra el diagrama unilineal completo.



La conexión de las corrientes es tomada desde el TC del paño 52 HT1 – 110kV, relacionado al devanado secundario del transformador de medición TCHT1 de relación 1000/1 A, mostrado en el recuadro azul. A su vez, la conexión de las tensiones corresponde al devanado secundario del transformador de medición TPH1 de relación 110/0.115 kV, mostrado en el recuadro verde.

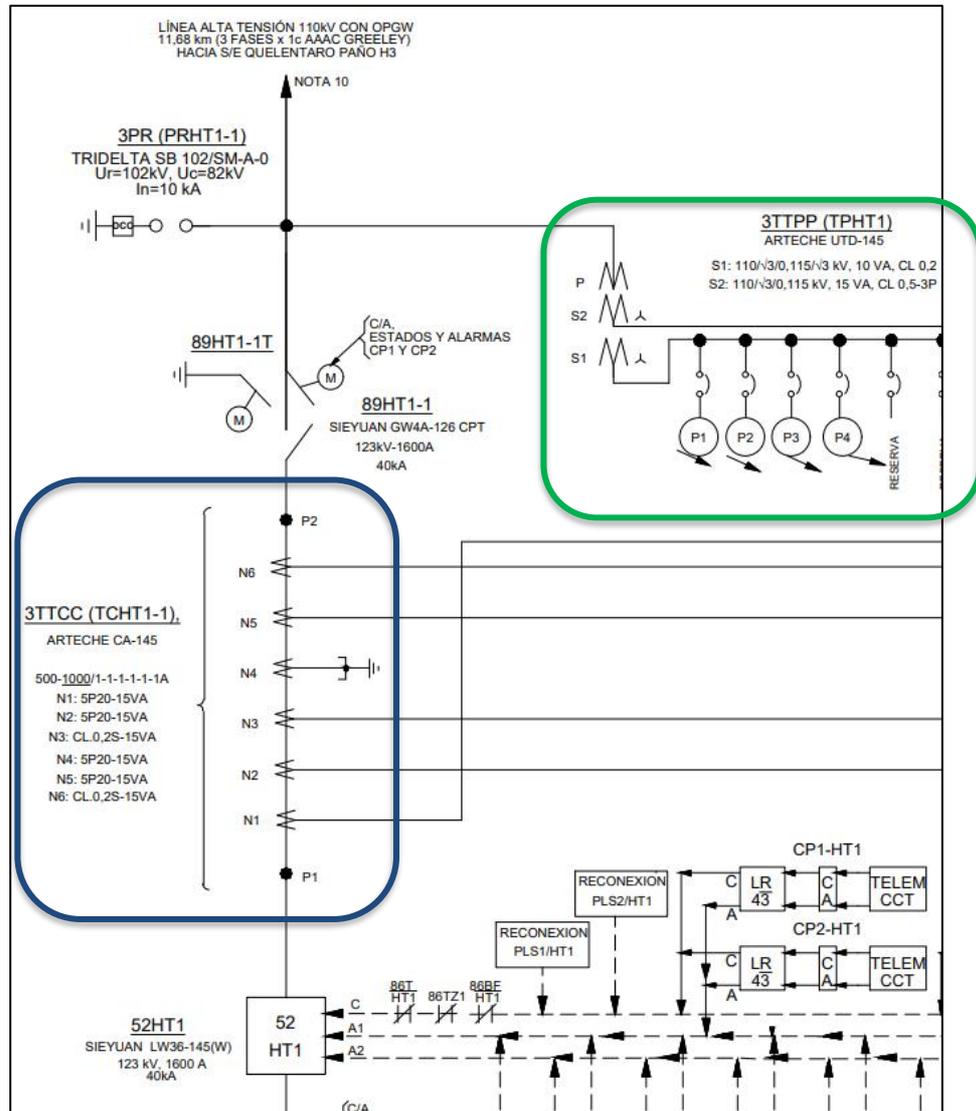


Figura 4.1 – Puntos de conexión a nivel planta en la S/E Cardonal



4.4 Registro complementario de señales con equipos de planta

Adicionalmente, se registran señales de interés con el sistema de adquisición de planta, el cual posee una tasa de muestreo de 40 ms para el respaldo de las principales variables eléctricas en el punto de interconexión y la velocidad de viento media de la planta durante los ensayos.

Las señales registradas fueron:

- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Tensión
- Corriente
- Frecuencia eléctrica
- Velocidad del viento

4.5 Metodología general de los ensayos

Para realizar los ensayos correspondientes al control de tensión a nivel aerogenerador, se realizan escalones en la referencia del lazo de control que implementa el control local de los aerogeneradores.

Para realizar los ensayos correspondientes al control de tensión a nivel de planta, se realizan escalones en las referencias de los distintos lazos de control que implementa el control conjunto de planta. Lo anterior se logra mediante la interfaz de control del propio controlador de planta.

En la Figura 4.2 se observan el HMI del operador en donde es posible seleccionar los modos de control que posee la planta, el recuadro **rojo** enmarca la sección que permite ajustar la consigna de cada uno de los modos de control en función del modo elegido por el operador.

En el contexto de la verificación del SSCC de CT los modos de control evaluados son:

- A nivel aerogenerador:
 - Control de potencia reactiva
- A nivel PPC:
 - Control de potencia reactiva
 - Control de factor de potencia
 - Control de tensión

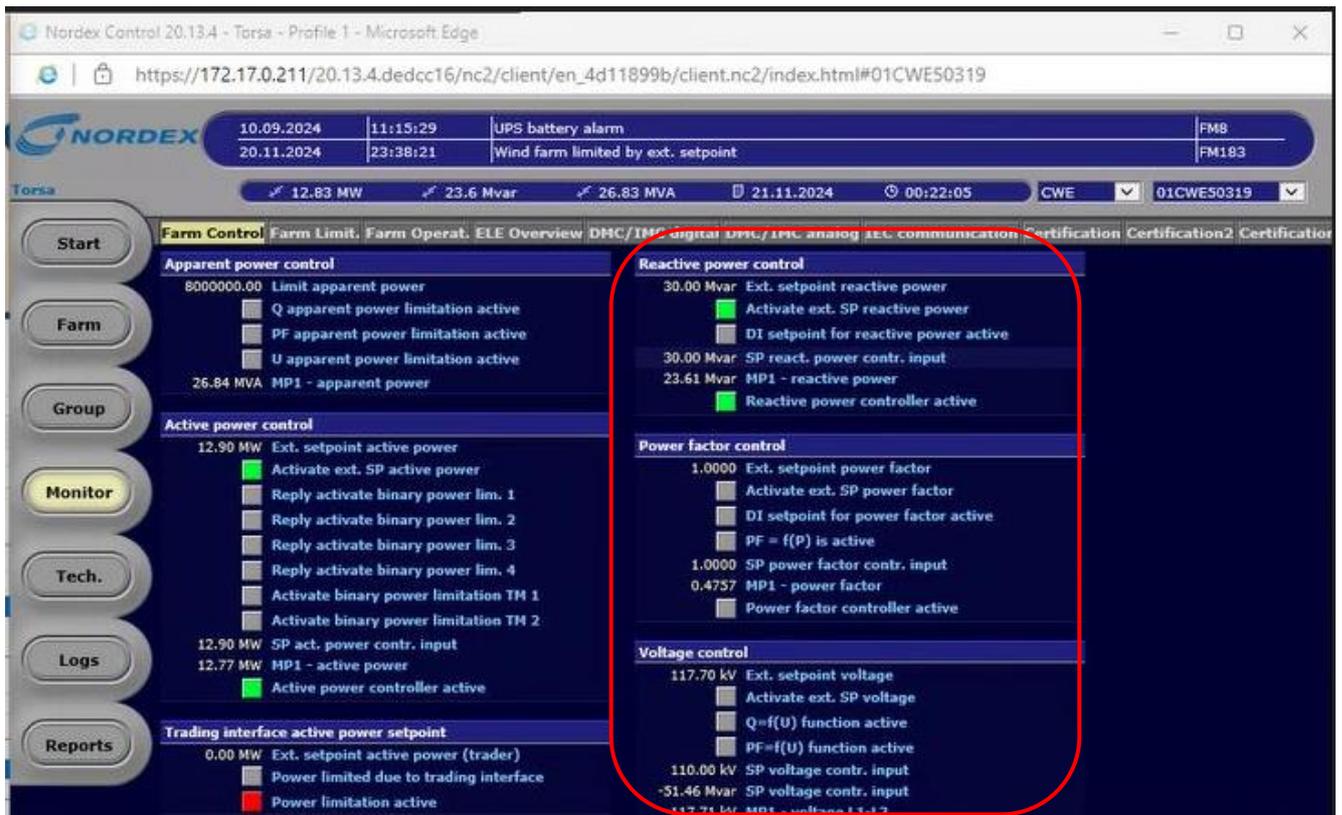


Figura 4.2 – HMI del control conjunto de planta para modos de control reactivo, factor de potencia y tensión



5 VERIFICACIÓN DEL CONTROL DE TENSIÓN / POTENCIA REACTIVA DEL PARQUE

En esta sección se presentan los ensayos realizados con el objetivo de evaluar la respuesta dinámica de los elementos incorporados al control de tensión/potencia reactiva del parque y de los aerogeneradores.

Tal como se comentó en la sección 4.2 para la verificación de SSCC de Control de Tensión se homologará un conjunto de ensayos realizados en el proceso de entrada de operación, estos corresponden los ensayos dinámicos realizados en los distintos modos de control tanto a nivel aerogenerador como a nivel planta.

5.1 Ensayos a nivel aerogenerador

Para estos ensayos se selecciona el aerogenerador WTG-G01, el cual corresponde al "aerogenerador más cercano" y el aerogenerador WTG-F04 el cual corresponde al "aerogenerador más lejano" respecto a la subestación elevadora del parque.

Los despachos de potencia activa ensayados fueron determinados en base a la potencia nominal del aerogenerador, es decir, 5.9 MVA. Los despachos se presentan en la Tabla 5.1.

Despachos de Potencia Activa	Valor [MW]
P1 _{WTG}	0.6
P2 _{WTG}	2.9
P3 _{WTG}	5.4

Tabla 5.1 – Despachos de potencia activa de los aerogeneradores – Ensayos dinámicos a nivel aerogeneradores

Los ensayos consisten en pruebas dinámicas de respuesta al escalón a los distintos modos de control implementados por el controlador local de los aerogeneradores. La Tabla 5.2 resumen los ensayos realizados para cada despacho de potencia activa de los aerogeneradores.

Despachos de Potencia Activa	Modos de control ¹
P1 _{WTG}	Q
P2 _{WTG}	Q
P3 _{WTG}	Q

Tabla 5.2 – Distribución de las pruebas según el despacho del aerogenerador

¹ Se destaca que el modo de control de tensión y factor de potencia (V y FP) no se encuentran operativos a nivel aerogenerador.



5.1.1 Respuesta dinámica del control local de potencia reactiva

Con el aerogenerador operando en control local de potencia reactiva, se aplican cambios de tipo escalón en la referencia correspondiente, de amplitud superior al $\pm 10\%$ de su potencia nominal.

Las maniobras se realizan mediante el control local de los aerogeneradores y consiste en un cambio de referencia de ± 0.9 MVAR con una duración de al menos 30 segundos, tal que se permite el establecimiento de las principales magnitudes en bornes del aerogenerador.

Se aprecia una respuesta estable en todos los despachos de potencia activa ensayados.

Aerogenerador WTG-G01 – Despacho P1_{WTG}

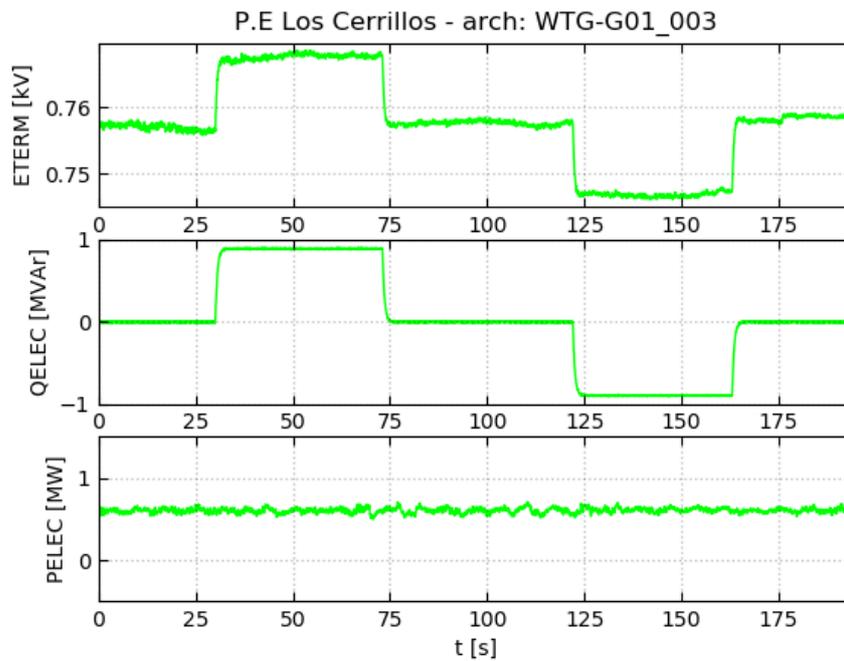


Figura 5.1 – Control de potencia reactiva – Step Q = ± 0.9 MVAR



Aerogenerador WTG-G01 – Despacho P2_{WTG}

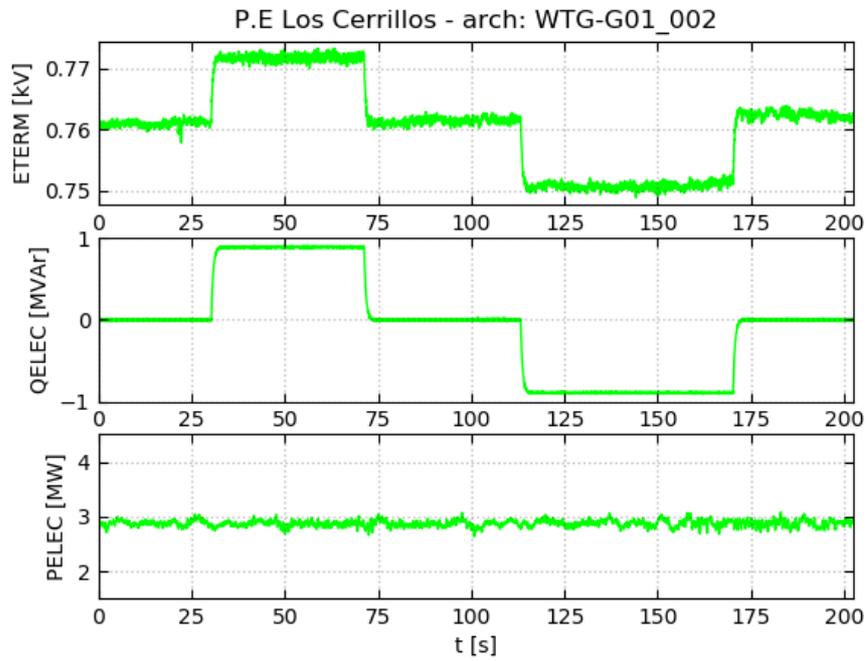


Figura 5.2 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 0.9$ MVar

Aerogenerador WTG-G01 – Despacho P3_{WTG}

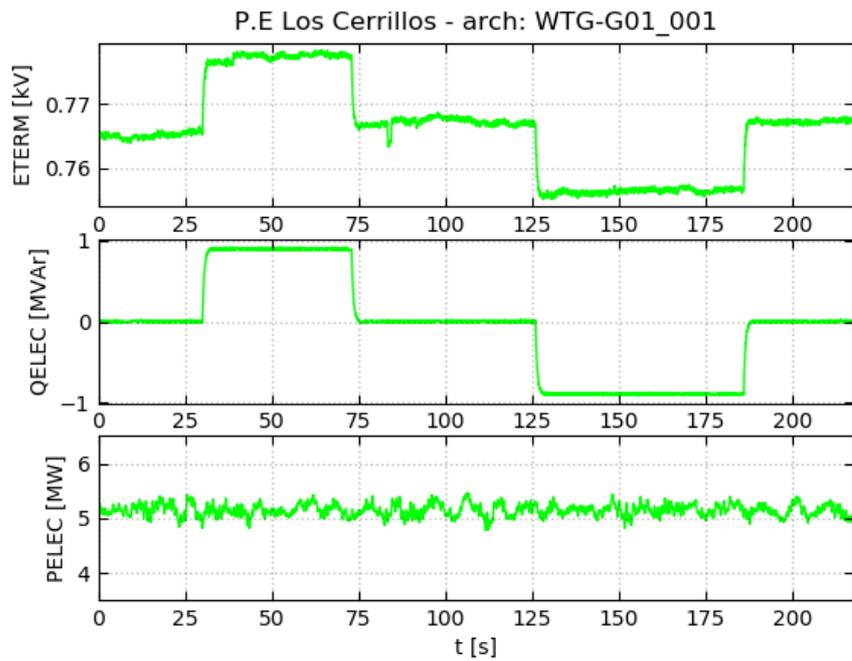


Figura 5.3 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 0.9$ MVar



Aerogenerador WTG-F04 – Despacho P1_{WTG}

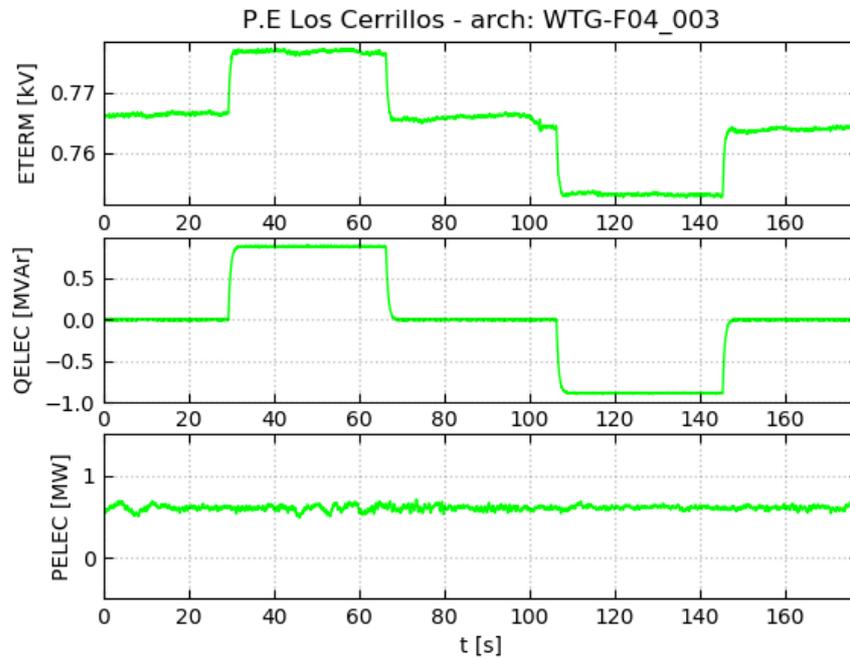


Figura 5.4 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 0.9$ MVAR

Aerogenerador WTG-F04 – Despacho P2_{WTG}

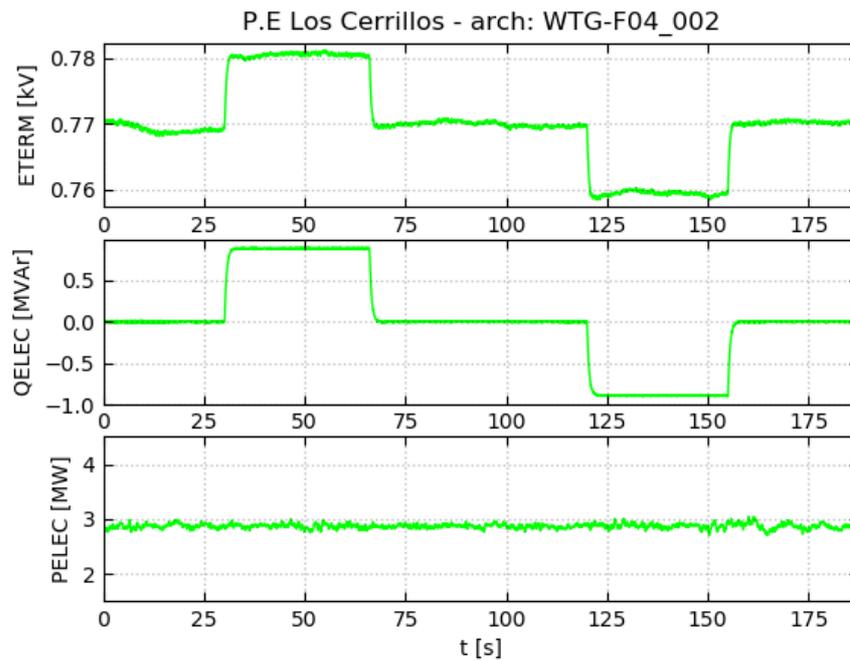


Figura 5.5 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 0.9$ MVAR



Aerogenerador WTG-F04 – Despacho $P3_{WTG}$

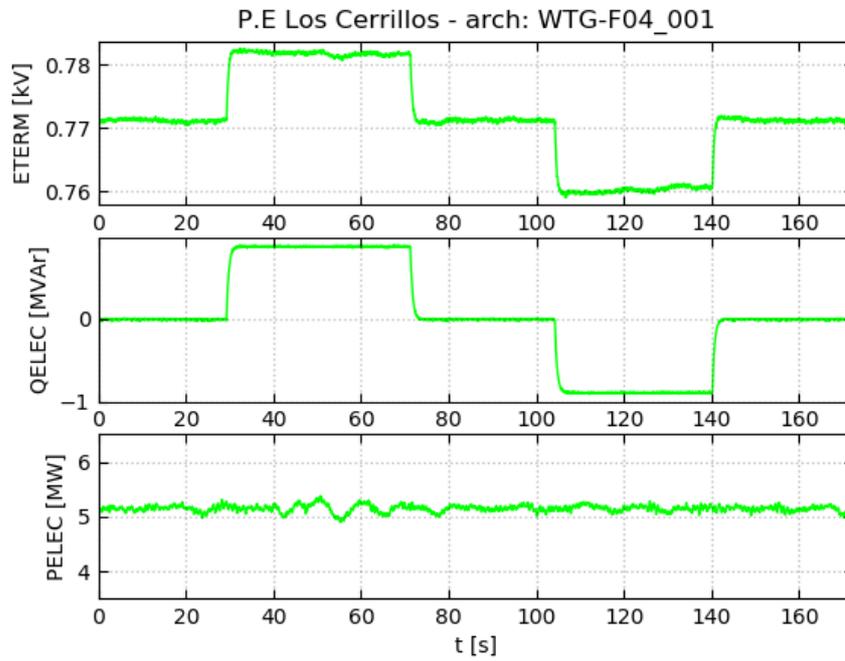


Figura 5.6– Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 0.9$ MVar



5.2 Ensayos a nivel planta

Los despachos de potencia activa son definidos previamente en el proceso de validación de modelos. Dichos despachos se presentan en la Tabla 5.3.

Despachos de Potencia Activa	Valor [MW]
P1 _{PPC}	4.60
P3 _{PPC}	23.00
P5 _{PPC}	38.77

Tabla 5.3 – Despachos de potencia activa del parque – Ensayos dinámicos a nivel planta

Los ensayos consisten en pruebas dinámicas de respuesta al escalón a los distintos modos de control implementados por el control conjunto de planta. La Tabla 5.4 resumen los ensayos realizados para cada despacho de potencia activa del parque.

Despachos de Potencia Activa	Modo de control
P1 _{PPC}	Q, $\cos(\varphi)$, V
P3 _{PPC}	Q, $\cos(\varphi)$, V
P5 _{PPC}	Q, $\cos(\varphi)$, V

Tabla 5.4 – Distribución de las pruebas según el despacho del parque



5.2.1 Respuesta dinámica del control de potencia reactiva del PPC

Con el PPC operando en control de potencia reactiva, se aplican cambios de tipo escalón en la referencia correspondiente de amplitud mayor al $\pm 10\%$ de la potencia nominal² del parque, cuya duración es tal que permite el establecimiento de las principales magnitudes en el POI.

Se aplican escalones de ± 5.0 MVAR y el parque presenta una respuesta estable en su modo de control de potencia reactiva en todos los despachos de potencia activa ensayados.

PPC – Despacho P1_{PPC}

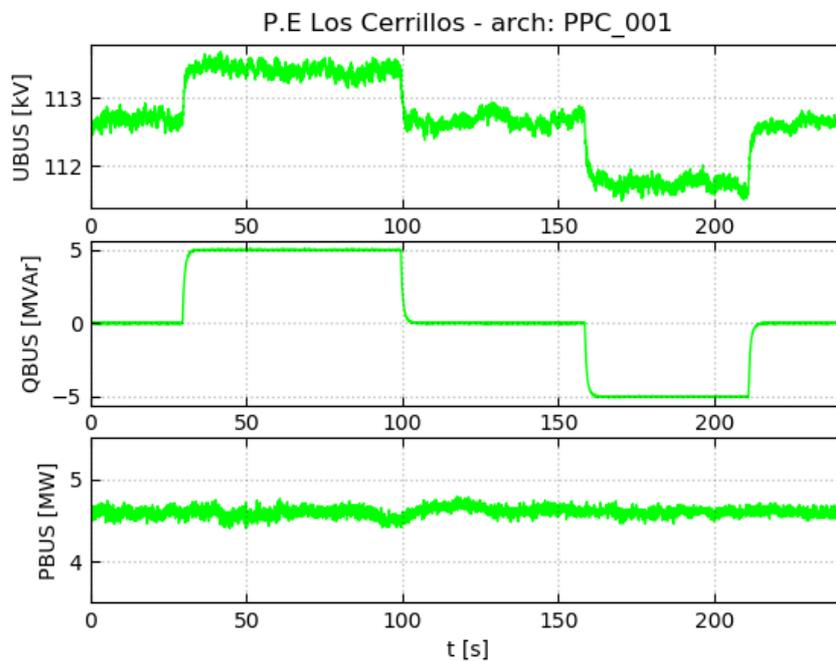


Figura 5.7 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 5.0$ MVAR

² La potencia nominal del parque se considera igual a 47.2 MVA.

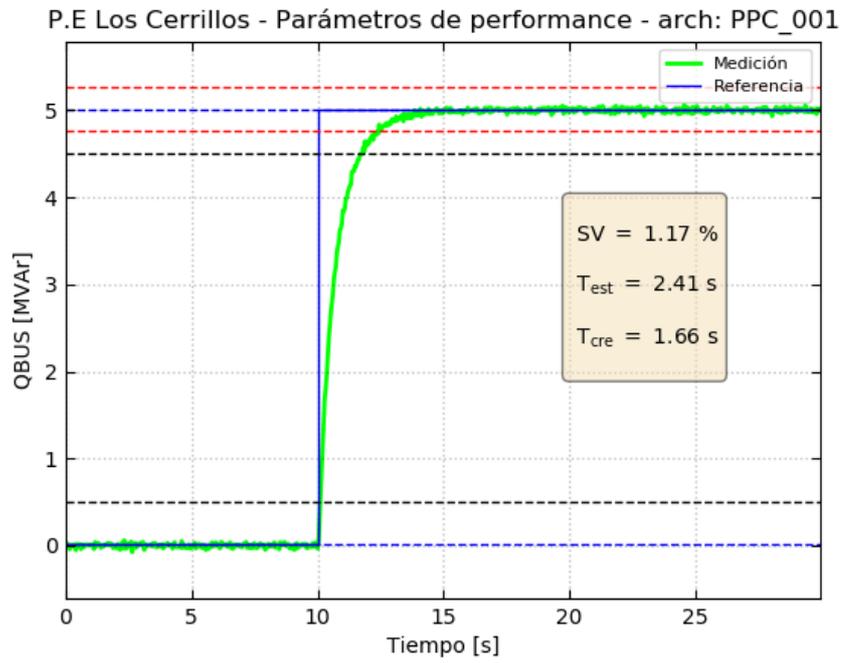


Figura 5.8 – Control de potencia reactiva – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P3_{PPC}

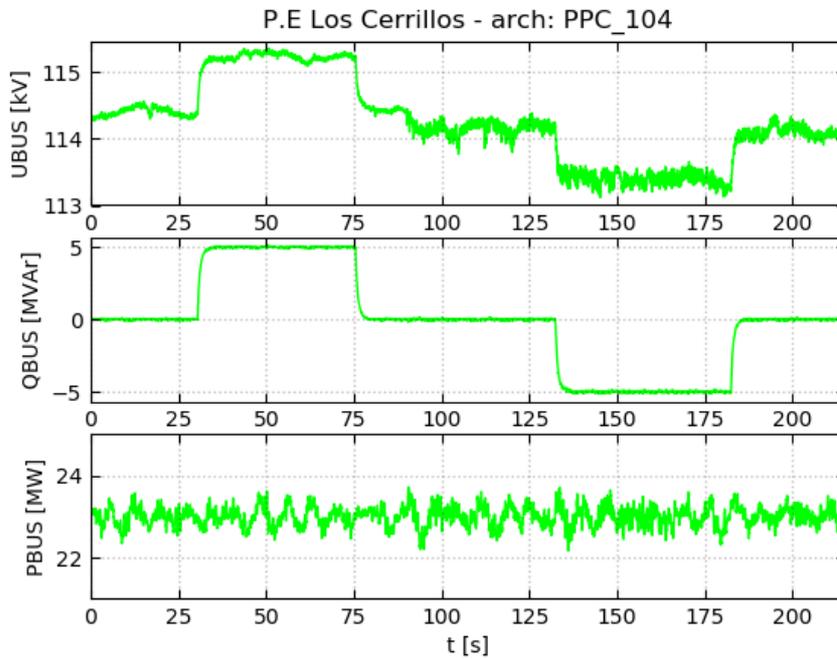


Figura 5.9 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 5.0$ MVar

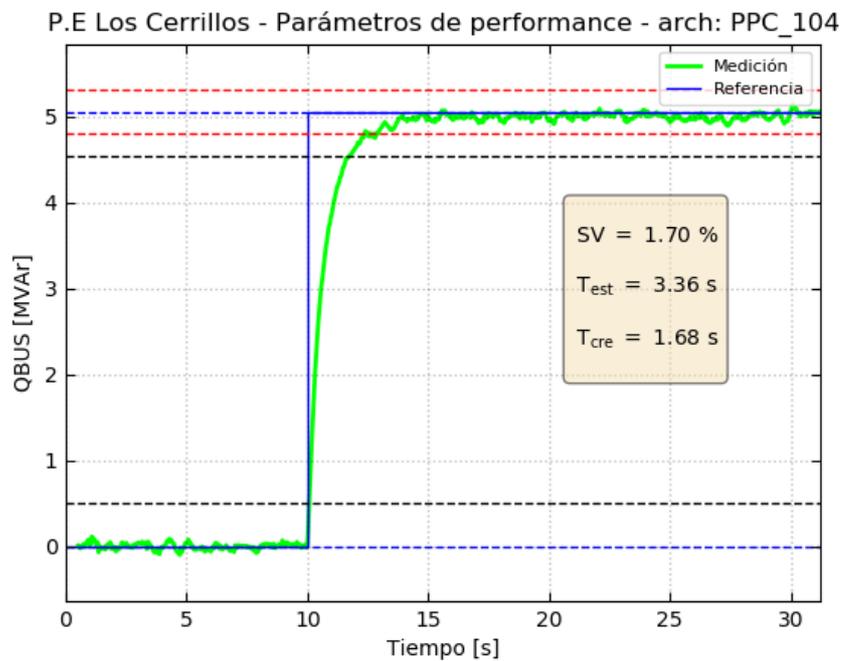


Figura 5.10 – Control de potencia reactiva – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P5_{PPC}

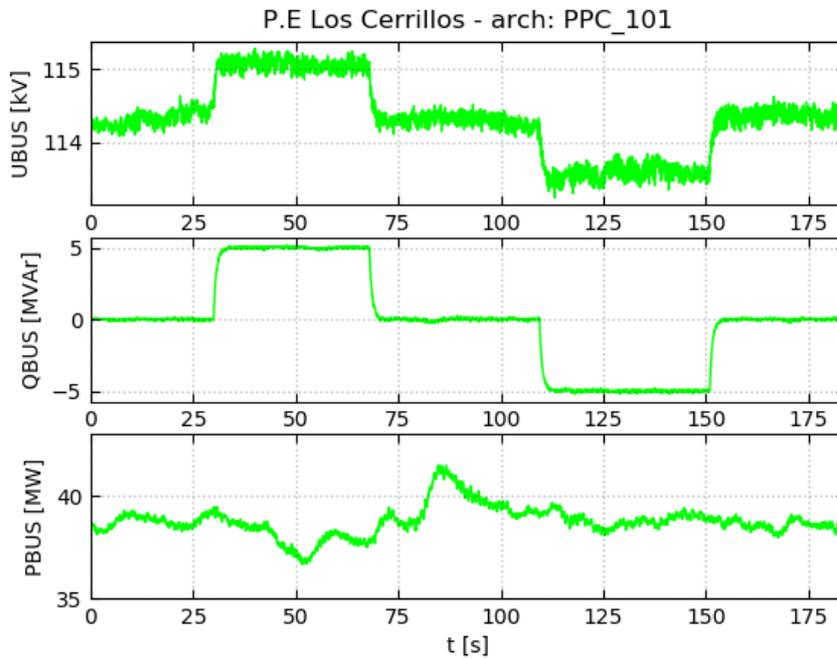


Figura 5.11 – Control de potencia reactiva – Step $Q = \pm 5.0$ MVAR

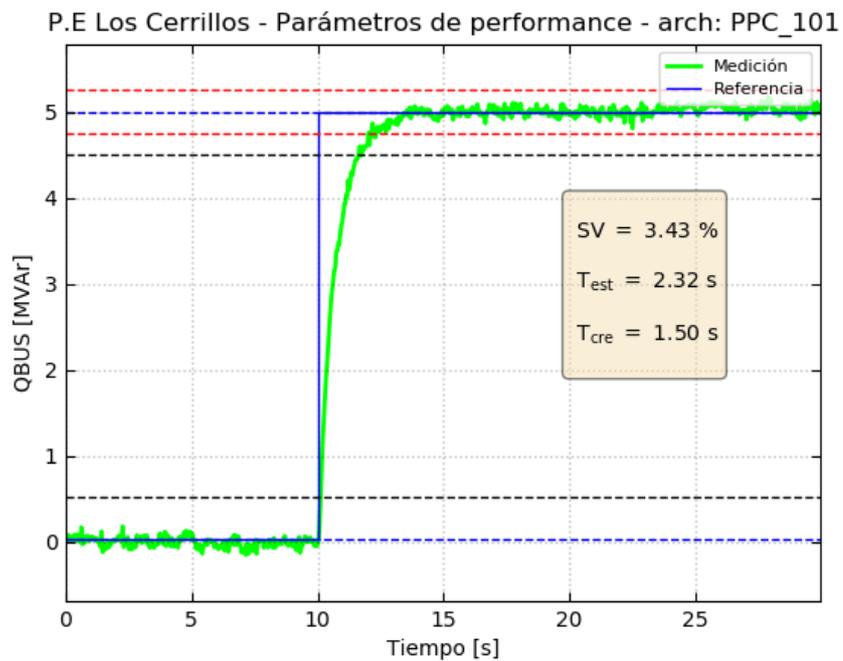


Figura 5.12 – Control de potencia reactiva – Determinación de parámetros de performance



5.2.2 Respuesta dinámica del control de factor de potencia del PPC

Con el PPC operando en control de factor de potencia, se aplican cambios de tipo escalón en la referencia correspondiente de amplitud tal que genere una variación mayor al $\pm 10\%$ de la potencia nominal³ del parque, cuya duración es tal que permite el establecimiento de las principales magnitudes en el POI.

El parque presenta una respuesta estable en su modo de control de factor de potencia en todos los despachos de potencia activa ensayados.

PPC – Despacho P1_{PPC}

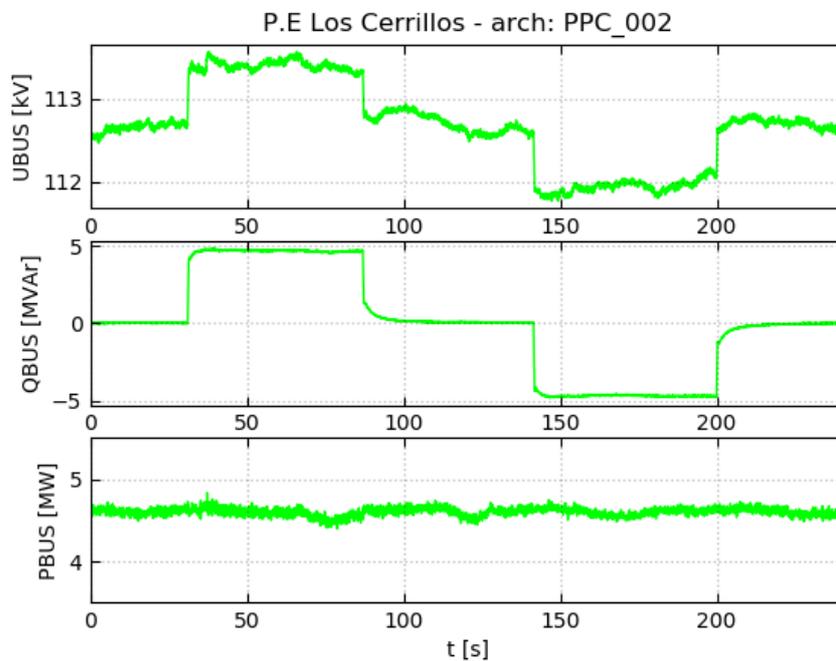


Figura 5.13 – Control de factor de potencia – Step FP = ± 0.69

³ La potencia nominal del parque se considera igual a 47.2 MVA.

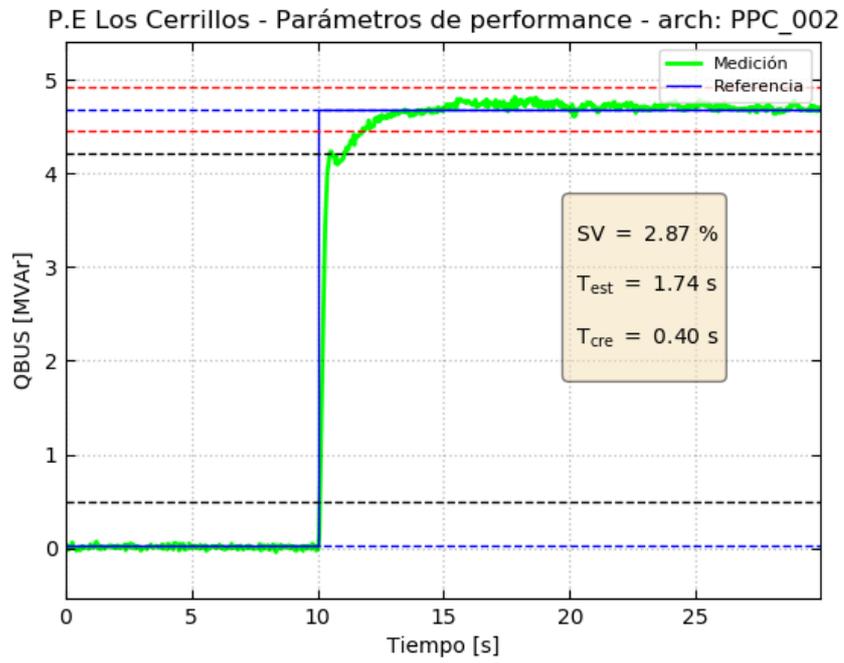


Figura 5.14 – Control de factor de potencia – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P3_{PPC}

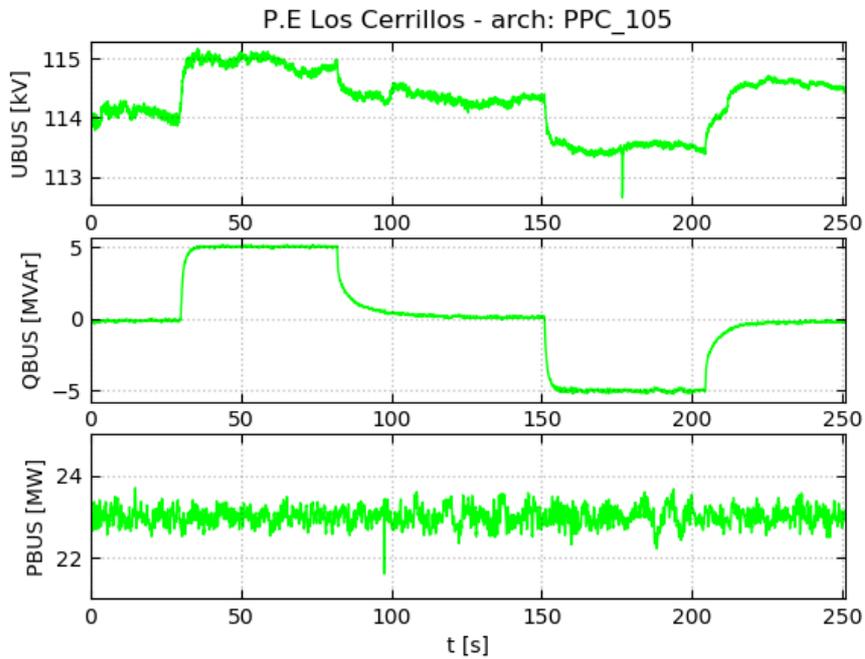


Figura 5.15 – Control de factor de potencia – Step FP = ±0.98

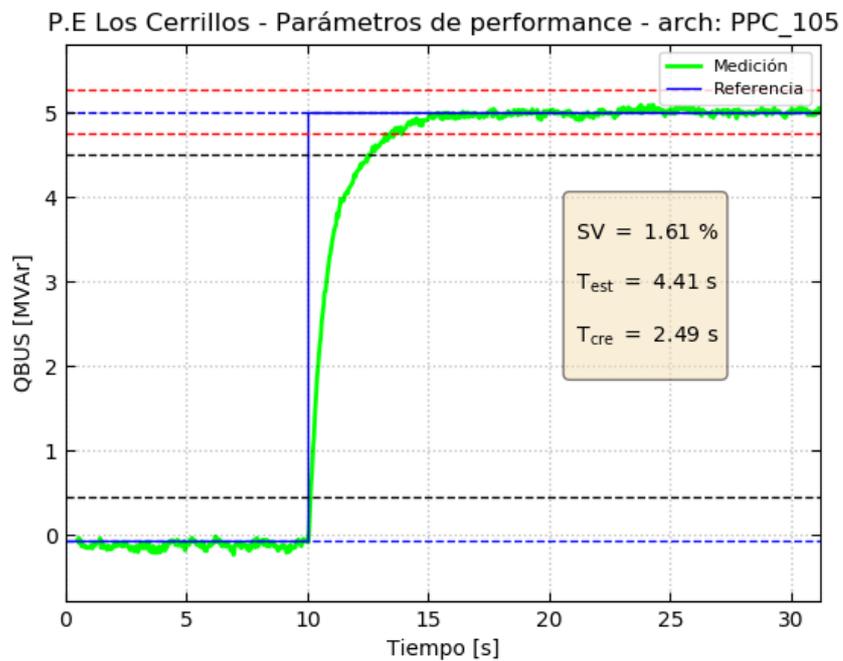


Figura 5.16 – Control de factor de potencia – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P5_{PPC}

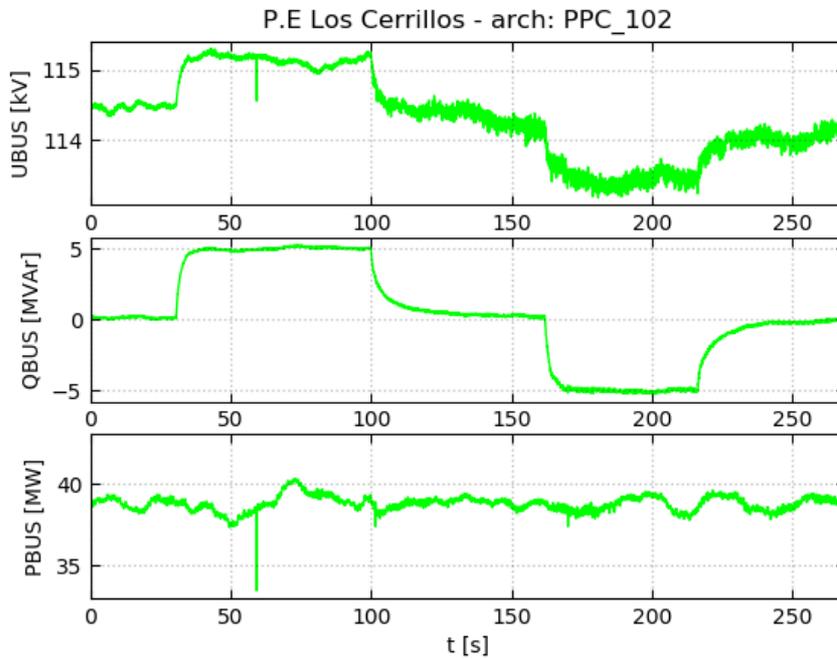


Figura 5.17 – Control de factor de potencia – Step FP = ±0.99

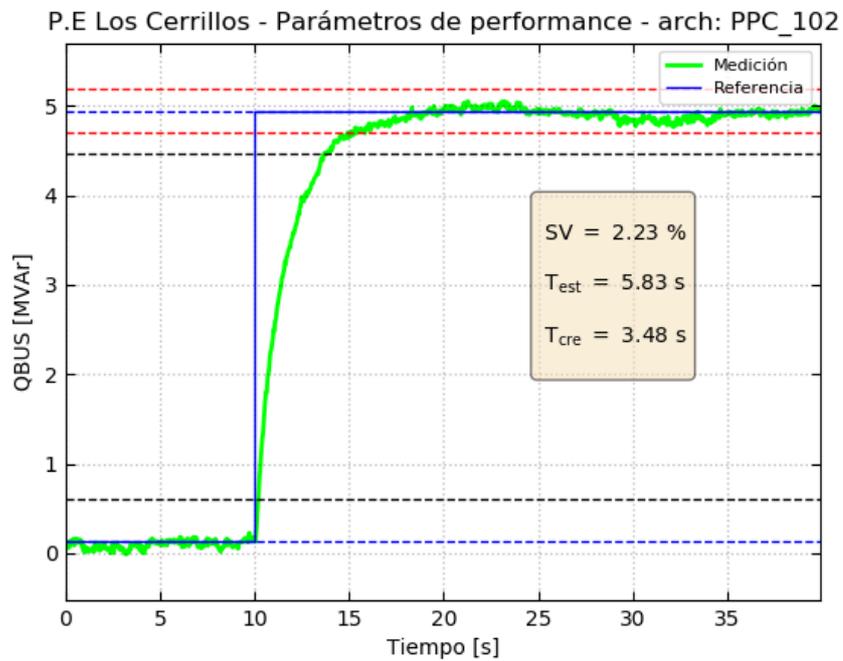


Figura 5.18 – Control de factor de potencia – Determinación de parámetros de performance



5.2.3 Respuesta dinámica del control de tensión del PPC

Con el PPC operando en control de tensión, se aplican cambios de tipo escalón en la referencia correspondiente de amplitud tal que genere una variación mayor al $\pm 10\%$ de la potencia nominal⁴ del parque, cuya duración es tal que permite el establecimiento de las principales magnitudes en el POI.

Se debe considerar que el registro de tensión de la S/E Cardonal presenta oscilaciones, producto de las variaciones naturales del sistema al momento de realizar los ensayos lo que dificulta la medición objetiva de tiempos y la estabilización de la señal dentro de la banda de tolerancia. Frente a esto, los valores presentados en los parámetros de performance de la señal de tensión no son representativos sino más bien referenciales.

El parque presenta una respuesta estable en su modo de control de tensión en todos los despachos de potencia activa ensayados.

PPC – Despacho P1_{PPC}

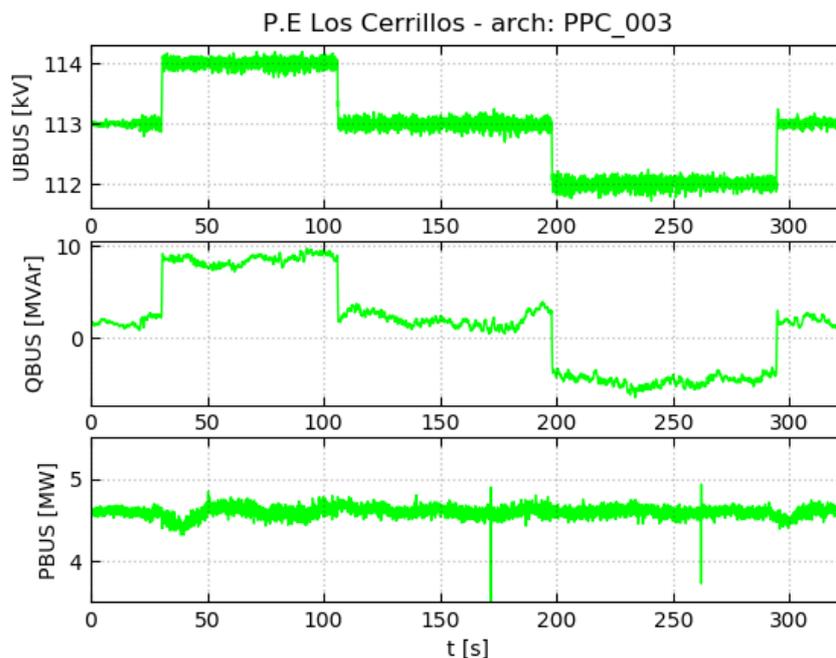


Figura 5.19 – Control de tensión – Step $V = \pm 1.0$ kV

⁴ La potencia nominal del parque se considera igual a 47.2 MVA.

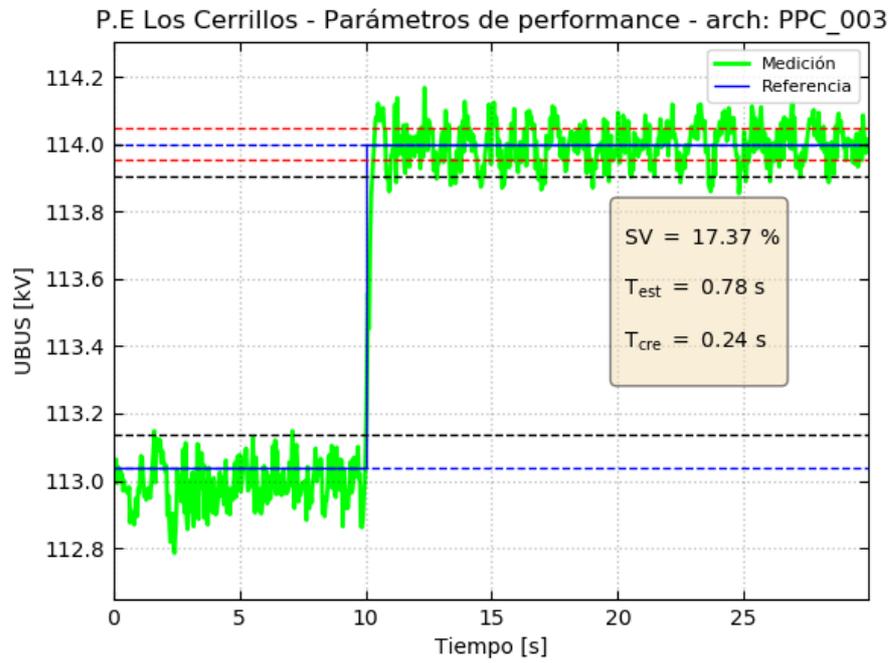


Figura 5.20 – Control de tensión – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P3_{PPC}

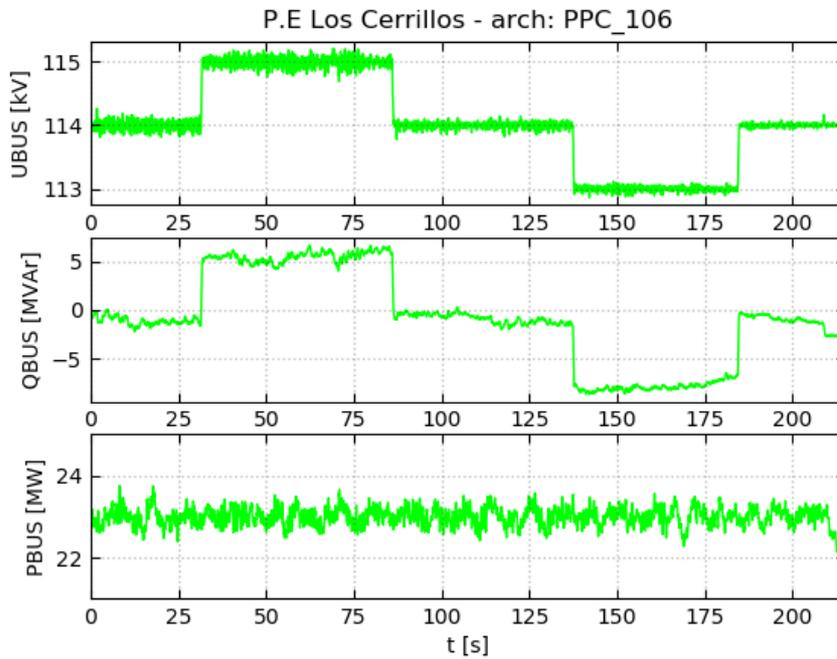


Figura 5.21 – Control de tensión – Step $V = \pm 1.0$ kV

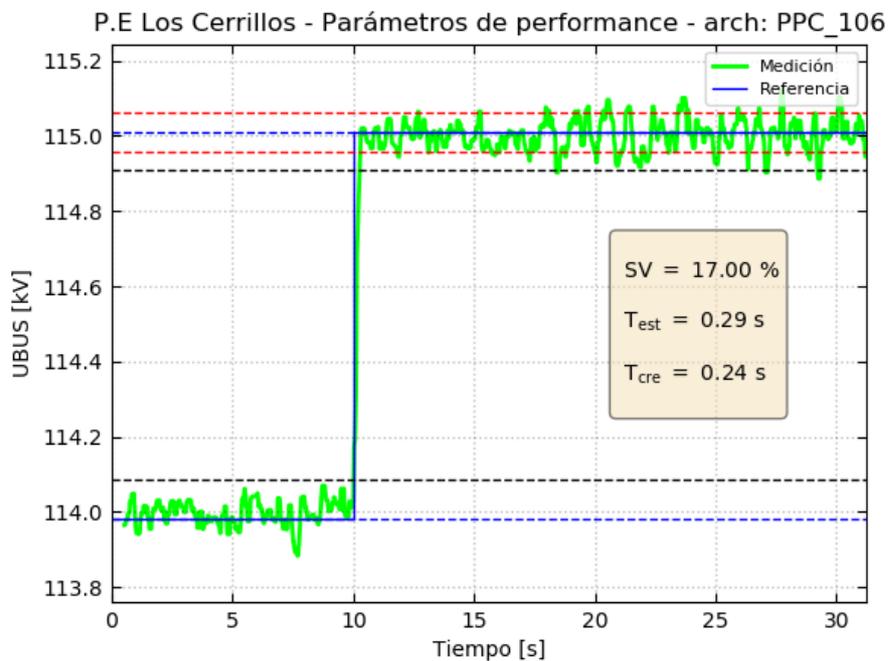


Figura 5.22 – Control de tensión – Determinación de parámetros de performance



PPC – Despacho P5_{PPC}

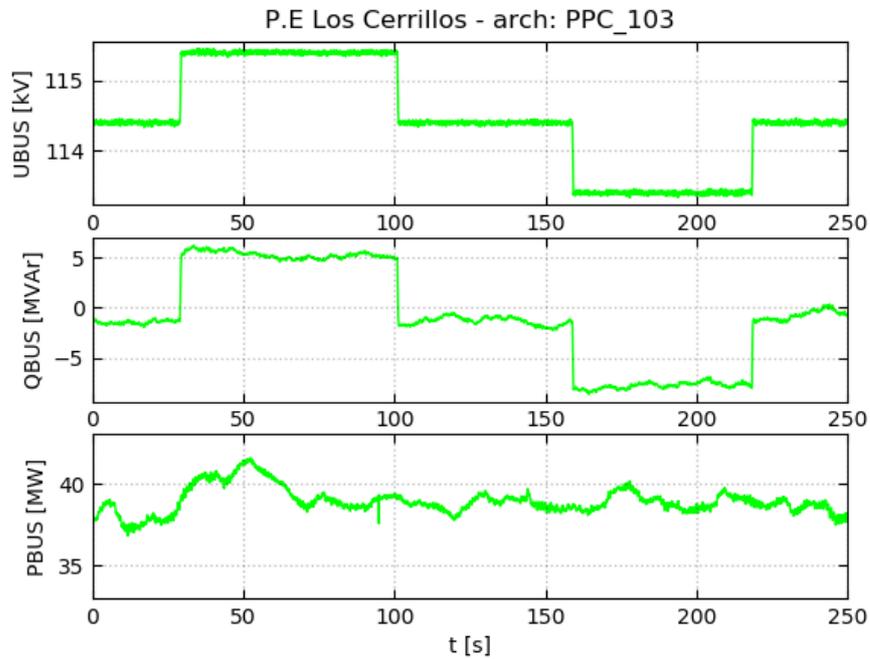


Figura 5.23 – Control de tensión – Step $V = \pm 1.0$ kV

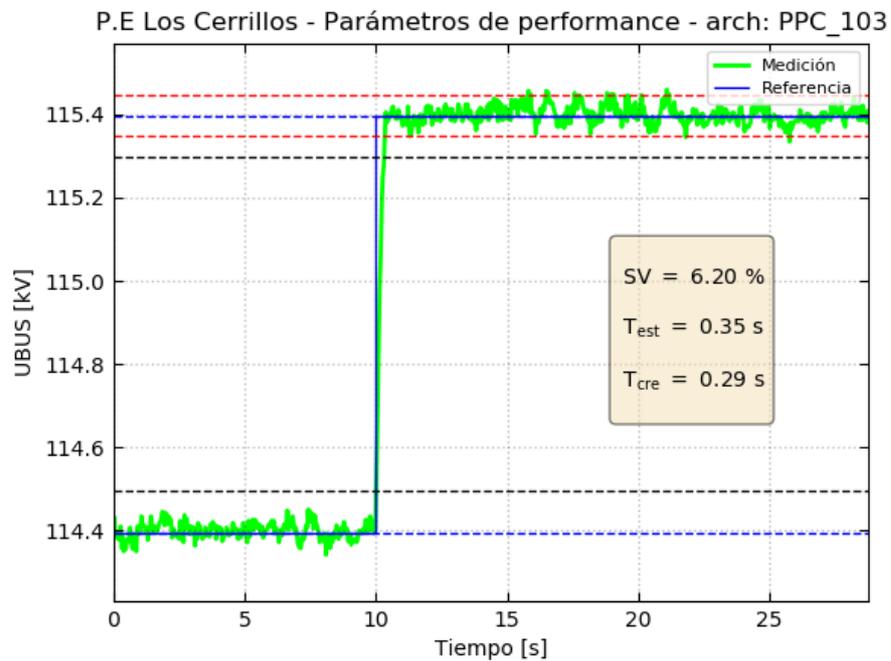


Figura 5.24 – Control de tensión – Determinación de parámetros de performance



5.3 Análisis

Se presenta, a modo de resumen, un análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas dinámicas llevadas a cabo en los elementos incorporados al control de tensión/potencia reactiva del parque y de los aerogeneradores del Parque Eólico Los Cerrillos.

5.3.1 Pruebas a nivel aerogenerador

A partir de las pruebas dinámicas a nivel aerogenerador (ver apartado 5.1), se observa que la respuesta temporal de los lazos de regulación de potencia reactiva una respuesta estable y adecuada respetando las consignas impuestas. Adicionalmente, los diferentes modos de control cuentan con una acción integral en sus lazos principales, por lo cual, el error estacionario resulta nulo.

5.3.2 Pruebas a nivel planta

A partir de las pruebas dinámicas al PPC (ver apartado 5.2), se observa que la respuesta temporal de los lazos de control de potencia reactiva, factor de potencia y de tensión, tienen una respuesta rápida y estable. Adicionalmente, los diferentes modos de control cuentan con una acción integral en sus lazos principales, por lo cual, el error estacionario resulta nulo.



6 VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA PQ TEÓRICO MÁXIMO

En esta sección se presentan los ensayos realizados con el objetivo de comparar la capacidad real del parque con la informada en el documento técnico ***“EE-EN-2024-0912-RA_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_PE_Los_Cerrillos”*** donde se han desarrollado las curvas de capacidad PQ teóricas máximas.

Los ensayos se realizan con el parque sincronizado al SEN y en cuatro despachos de potencia activa entre el mínimo técnico y la potencia máxima disponible de la central. La potencia máxima disponible durante los ensayos del diagrama PQ resultó ser de 39.90 MW.

Los ensayos consisten en pruebas estáticas, donde se intenta consignar la tensión objetivo en el punto de interconexión del parque mediante la colaboración del CEN, para ajustar la tensión en la barra S/E Cardonal 110 kV de manera tal de lograr ajustar la inyección/absorción de potencia reactiva del parque, en concordancia con lo presentado en el procedimiento de ensayos: ***“EE-EN-2024-0934-RA_Procedimiento_Ensayos_SSCC_PE_Los_Cerrillos”***.

Durante el desarrollo de las pruebas no fue posible por parte del despacho, ajustar la tensión en el punto de interconexión de la instalación.



6.1 Puntos operativos alcanzados

Para los puntos objetivos alcanzados (P, Q, V) se han registrado las principales magnitudes durante al menos 15 minutos para el estado de carga P5_{PPC} y al menos 5 minutos para los demás estados de carga, esto con el fin de comprobar la estabilidad en cada uno.

Con el objetivo de identificar cada punto operativo a alcanzar en cada nivel de tensión, se utiliza la nomenclatura y correlación presentada en la Tabla 6.1, la cual surge de la interpretación de la Figura 6.1. Es importante mencionar que el estado de carga P5_{CT} fue considerado como la potencia máxima según el recurso disponible durante los días de ensayos.

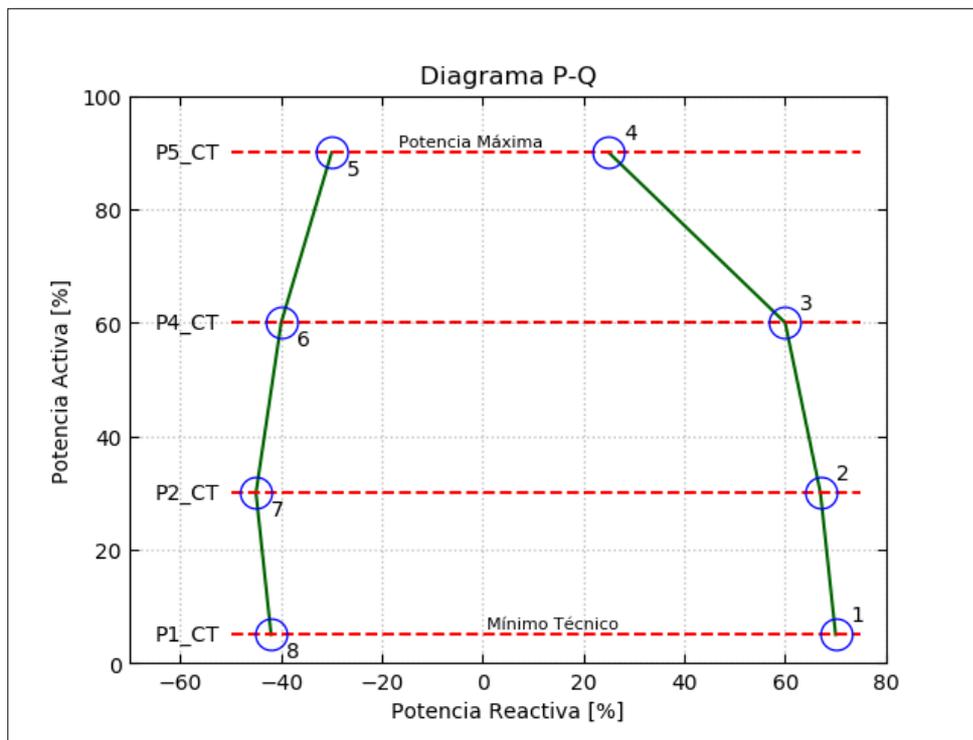


Figura 6.1 – Puntos PQ referenciales a verificar en régimen estacionario para los 5 niveles de tensión

Despacho de Potencia Activa	Valor [MW]
P1_CT	3.70
P2_CT	12.91
P4_CT	31.28
P5_CT	39.90

Tabla 6.1 – Distribución de los puntos a verificar según el despacho de potencia activa



Las mediciones realizadas para los distintos niveles de tensión y diferentes puntos de despacho de potencia activa son presentadas en los siguientes anexos:

- Anexo 8.1.1: Verificación curva PQ @ 1.05 pu.
- Anexo 8.1.2: Verificación curva PQ @ 1.00 pu.

A modo de resumen, en la Tabla 6.2 y Tabla 6.3 se presenta un detalle donde se contrastan los puntos operativos objetivo (P, Q, V) con los puntos alcanzados durante los ensayos.

Cabe mencionar que en el procedimiento de ensayos se anticipó que los niveles de tensión 0.9 p.u. y 1.1 p.u., no serían alcanzados debido a que exceden los límites de tensión de servicio para el Estado Normal del Sistema.

Durante los ensayos se logra verificar la inyección de reactivos en una tensión aproximada de 1.07 p.u., que permite evaluar el nivel de 1.05p.u. de tensión. En tanto, para la condición de absorción de reactivos se verifica en una tensión aproximada de entre 1.01 p.u. y 1.02 p.u., que permite evaluar el nivel de tensión de 1.00 p.u. de tensión.



Subexcitación								
Objetivo			Alcanzado			Origen de la limitación	Resultado prueba	Valida Curva PQ
UBUS [p.u.]	PBUS [MW]	QBUS [MVA _r]	UBUS [p.u.]	PBUS [MW]	QBUS [MVA _r]			
0.90	3.70	-21.25	-	-	-	Descartado por exceder el nivel de tensión normal del Sistema.	No Alcanzable	N/A
	12.91	-25.49	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	-28.55	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	-22.46	-	-	-		No Alcanzable	N/A
0.95	3.70	-12.14	-	-	-	Comentario ⁵	No Alcanzable	N/A
	12.91	-14.97	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	-18.47	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	-16.38	-	-	-		No Alcanzable	N/A
1.00	3.70	-15.22	1.01	3.71	-25.51	Se alcanza el valor máximo de absorción por parte de los aerogeneradores	Alcanzado subiendo la tensión a 1.02 y 1.01 pu	SI (Q _{OBJ} @1.02pu/3.71MW=-25.51 MVA _r)
	12.91	-18.90	1.01	12.87	-26.03			SI (Q _{OBJ} @1.02pu/12.87MW=-26.03 MVA _r)
	31.28	-22.42	1.01	32.00	-30.03			SI (Q _{OBJ} @1.02pu/32.00MW=-30.03 MVA _r)
	39.90	-18.66	1.02	40.00	-32.32			SI (Q _{OBJ} @1.02pu/40.00MW=-32.32 MVA _r)
1.05	3.70	-15.60	-	-	-	Comentario ⁵	No Alcanzable	N/A
	12.91	-19.38	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	-22.90	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	-18.94	-	-	-		No Alcanzable	N/A
1.10	3.70	-18.70	-	-	-	Descartado por exceder el nivel de tensión normal del Sistema.	No Alcanzable	N/A
	12.91	-22.95	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	-26.48	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	-21.00	-	-	-		No Alcanzable	N/A

Tabla 6.2 - Resumen de puntos operativos alcanzados – Zona de subexcitación

⁵ No se alcanza el punto objetivo aun cuando se han ultimado todas las instancias posibles. Se pidió colaboración al centro de despacho, este no pudo seguir ajustando la tensión de la barra por condiciones desfavorables del Sistema.



Sobrexcitación								
Objetivo			Alcanzado			Origen de la limitación	Resultado prueba	Valida Curva PQ
UBUS [p.u.]	PBUS [MW]	QBUS [MVA _r]	UBUS [p.u.]	PBUS [MW]	QBUS [MVA _r]			
0.90	3.70	22.34	-	-	-	Descartado por exceder el nivel de tensión normal del Sistema.	No Alcanzable	N/A
	12.91	22.90	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	20.59	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	14.45	-	-	-		No Alcanzable	N/A
0.95	3.70	21.92	-	-	-	Comentario ⁶	No Alcanzable	N/A
	12.91	23.14	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	20.94	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	14.96	-	-	-		No Alcanzable	N/A
1.00	3.70	20.43	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	12.91	22.37	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	20.04	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	14.61	-	-	-		No Alcanzable	N/A
1.05	3.70	20.38	1.07	3.69	24.11	Se alcanza el valor máximo de inyección por parte de los aerogeneradores	Alcanzado subiendo la tensión a 1.07 pu	SI (Q _{OBJ} @1.07pu/3.69MW=24.11 MVA _r)
	12.91	22.33	1.07	12.82	23.57			SI (Q _{OBJ} @1.07pu/12.82MW=23.57 MVA _r)
	31.28	20.01	1.07	29.76	20.89			SI (Q _{OBJ} @1.07pu/29.76MW=20.89 MVA _r)
	39.90	14.57	1.07	40.01	17.72			SI (Q _{OBJ} @1.07pu/40.01MW=17.72 MVA _r)
1.10	3.70	20.32	-	-	-	Descartado por exceder el nivel de tensión normal del Sistema.	No Alcanzable	N/A
	12.91	22.30	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	31.28	19.97	-	-	-		No Alcanzable	N/A
	39.90	14.53	-	-	-		No Alcanzable	N/A

Tabla 6.3 - Resumen de puntos operativos alcanzados – Zona de sobrexcitación

⁶ No se alcanza el punto objetivo aun cuando se han ultimado todas las instancias posibles. Se pidió colaboración al centro de despacho, este no pudo seguir ajustando la tensión de la barra por condiciones desfavorables del Sistema.



Donde:

- **Alcanzado:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que pudieron ser verificados.
- **Verificado aumentando/disminuyendo la tensión del parque:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser alcanzados a la tensión objetivo en el POI como consecuencia del flujo de carga. Se pudo alcanzar el valor de reactivo objetivo a una tensión superior/inferior en la secuencia según corresponda. No se prevé ninguna restricción por parte del parque.
- **No alcanzado:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser verificados debido a una restricción operativa del parque. (ej. ajuste protecciones de los aerogeneradores).
- **No alcanzable:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser verificados para el nivel de tensión en la barra planteada. Lo anterior como consecuencia del flujo de carga y de las restricciones operativas impuestas por el SEN el día de las pruebas sobre la barra a la cual se conecta al parque.



6.1.1 Análisis

A partir de la Tabla 6.2 y Tabla 6.3 se observa que existen puntos objetivos que no son alcanzados de acuerdo con las exigencias de la guía de verificación, debido a que no se puede llevar la tensión del sistema por fuera del rango de operación normal.

Las pruebas fueron llevadas a cabo por medio de cambios en la consigna de tensión del parque, verificando en cada nivel de carga, todos los niveles de tensión que permitieran los aerogeneradores, pudiendo validar únicamente los casos para una tensión de 1.0 p.u., 1.05 p.u. y 1.10 p.u. Esto debido principalmente a condiciones desfavorables del Sistema que, aun cuando despacho intentó mejorar las condiciones, no se obtuvo buenos resultados.

Despacho potencia activa	Subexcitación				
	Tensión 0.9 p.u.	Tensión 0.95 p.u.	Tensión 1.0 p.u.	Tensión 1.05 p.u.	Tensión 1.1 p.u.
P1_CT = 3.70 MW	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.02 pu	No alcanzable	No alcanzable
P2_CT = 12.91 MW	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.01 pu	No alcanzable	No alcanzable
P4_CT = 31.28 MW	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.01 pu	No alcanzable	No alcanzable
P5_CT = 39.90 MW	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.01 pu	No alcanzable	No alcanzable

Tabla 6.4 - Resumen de condición final de cada punto operativo – Zona de subexcitación

Despacho potencia activa	Sobrexcitación				
	Tensión 0.9 p.u.	Tensión 0.95 p.u.	Tensión 1.0 p.u.	Tensión 1.05 p.u.	Tensión 1.1 p.u.
P1_CT = 3.70 MW	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.07 pu	No alcanzable
P2_CT = 12.91 MW	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.07 pu	No alcanzable
P4_CT = 31.28 MW	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.07 pu	No alcanzable
P5_CT = 39.90 MW	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión a 1.07 pu	No alcanzable

Tabla 6.5 - Resumen de condición final de cada punto operativo – Zona de sobrexcitación



6.2 Curvas de capacidad

Las curvas de capacidad del parque han sido calculadas en el informe PQ teórico máximo *“EE-EN-2024-0912-RA_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_PE_Los_Cerrillos”*.

A continuación, se presentan las curvas de capacidad definidas para cada nivel de tensión operable en el Parque Eólico Los Cerrillos.

Se muestran las siguientes curvas:

- Potencia reactiva máxima inyectada (trazo violeta segmentado).
- Potencia reactiva máxima absorbida (trazo rojo segmentado).
- Potencia máxima (trazo negro continuo).
- Mínimo técnico (trazo naranja continuo).
- Curva PQ normativa para centrales renovables según NTS&CS (trazo azul continuo).

Además, se muestra una tabla resumen de los valores de curva PQ alcanzados en el formato de archivo Excel requerido por el CEN:



Tensión en POI 1.00 pu

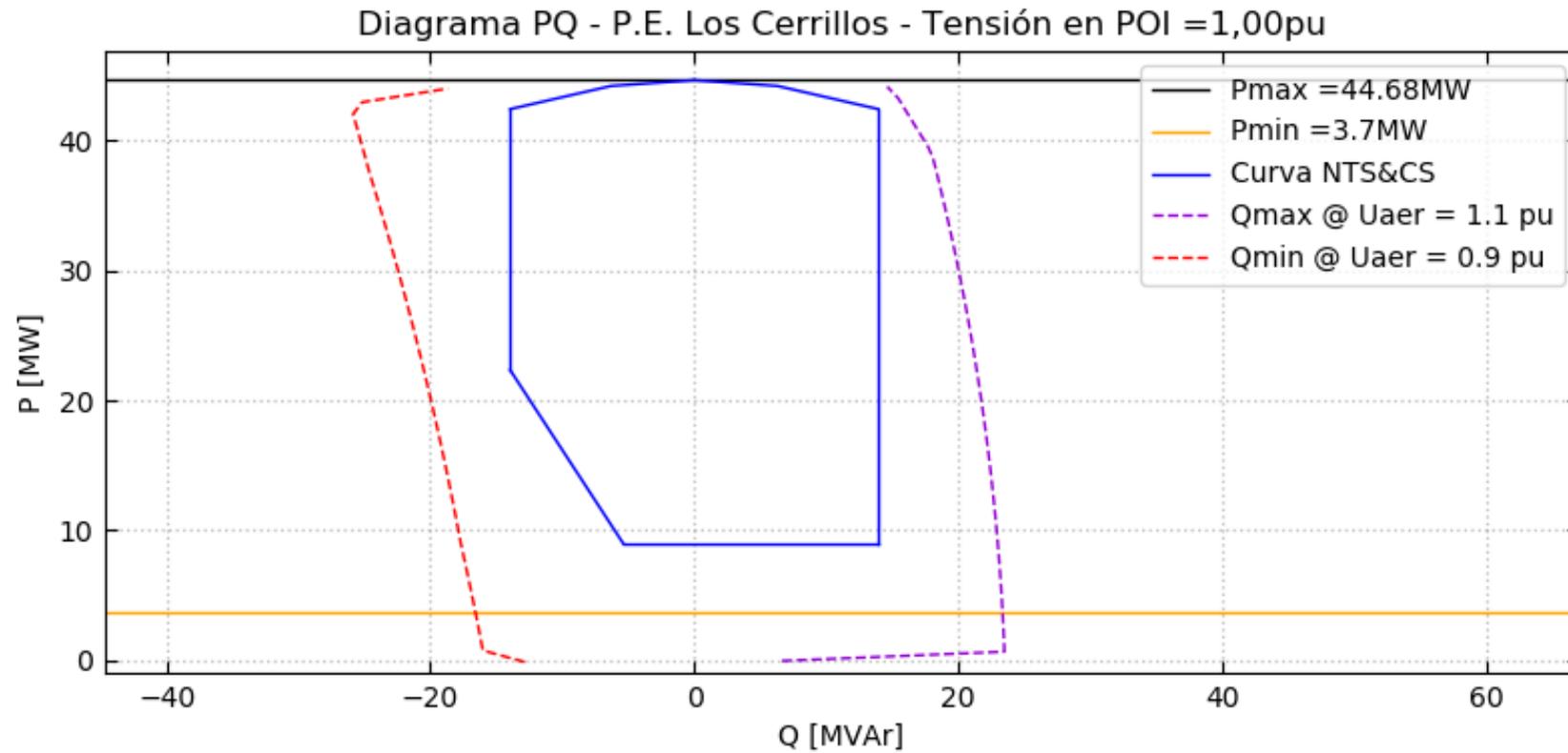


Figura 6.3 – Diagrama PQ teórico – Tensión en POI = 1.00 p.u.



Tensión en POI 1.05 pu

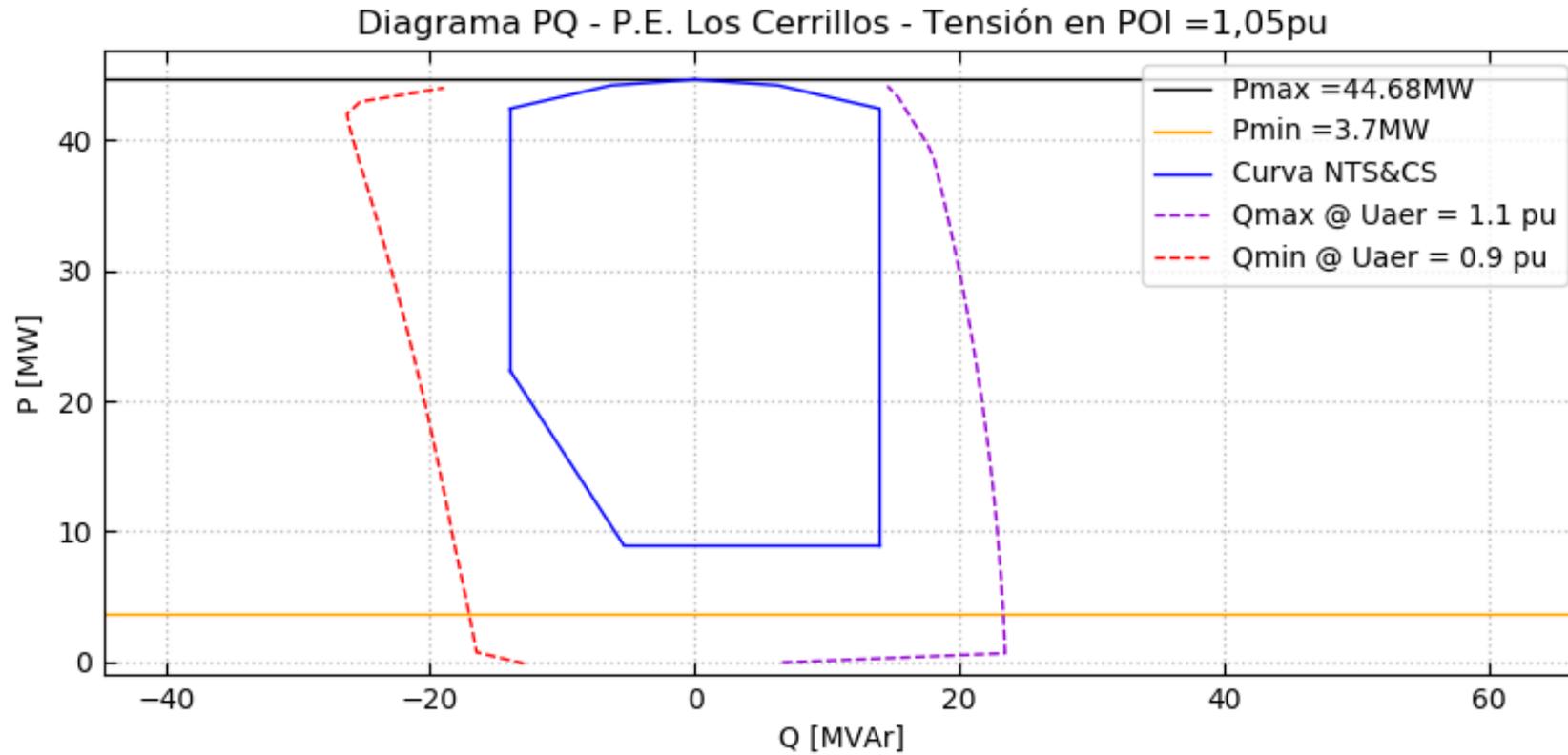


Figura 6.4 - Diagrama PQ teórico - Tensión en POI = 1.05 p.u.



6.2.2 Resumen de valores a informar

A continuación, se muestran las tablas de resumen de los valores PQ ensayados para todos los niveles de tensión en el formato requerido por el CEN ("Guía de Verificación Control de Tensión" – Anexo B – junio 2020) para presentar en la planilla adjunta **"EE-EN-2024-1929-RA-Diagrama_PQ_Final_SSCC_CT_PE_Cerrillos.xlsx"**.

SSCC		Control de Tensión				
Categoría		Control de Tensión				
Subcategoría		Control de Tensión				
Modo(s) de Control		Potencia Reactiva, Factor de Potencia y Tensión				
Central	Tensión [p.u]	Potencia Reactiva [MVar]				
	Potencia [MW]	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
Parque Eólico Los Cerrillos	3.70	No operable	-	-25.51	-	No operable
	12.91		-	-26.03	-	
	31.28		-	-30.03	-	
	39.90		-	-32.32	-	
	39.90	No operable	-	-	24.11	No operable
	31.28		-	-	23.57	
	12.91		-	-	20.89	
	3.70		-	-	17.72	

Tabla 6.6 – Resumen de valores curvas PQ



6.2.3 Ensayos de Curva PQ para tensión en POI 1.0 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo P[MW]	Q obtenida Q [MVA _r]	Vbarra AT [kV]	Error en Q [%]	Origen de la Limitación
		HH:MM (inicio)	HH:MM (fin)	P[MW]	Q [MVA _r]					
1				3.70	20.43					
2				12.91	22.37					
3				31.28	20.04					
4				39.90	14.61					
5	23-11-2024	2:25	2:40	39.90	-18.66	40	-32.32	112.68	73.20	Se alcanza el valor máximo de absorción por parte de los aerogeneradores
6	20-11-2024	22:11	22:16	31.28	-22.42	32	-30.03	111.6	33.94	
7	20-11-2024	22:03	22:08	12.91	-18.90	12.87	-26.03	111.7	37.72	
8	20-11-2024	23:25	23:30	3.70	-15.22	3.71	-25.51	111.8	67.61	

Tabla 6.7 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en POI de 1.0 pu



6.2.4 Ensayos de Curva PQ para tensión en POI 1.05 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo P[MW]	Q obtenida Q [MVA _r]	V _{barra} AT [kV]	Error en Q [%]	Origen de la Limitación
		HH:MM (inicio)	HH:MM (fin)	P[MW]	Q [MVA _r]					
1	20-11-2024	23:54	23:59	3.70	20.38	3.69	24.11	118.3	18.30	Se alcanza el valor máximo de inyección por parte de los aerogeneradores
2	20-11-2024	21:34	21:39	12.91	22.33	12.82	23.57	117.8	5.55	
3	20-11-2024	21:41	21:46	31.28	20.01	29.76	20.89	117.7	4.40	
4	23-11-2024	2:56	3:11	39.90	14.57	40.01	17.72	118.4	21.62	
5				39.90	-18.94					
6				31.28	-22.90					
7				12.91	-19.38					
8				3.70	-15.60					

Tabla 6.8 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en POI de 1.0 pu



7 ANALISIS Y CONCLUSIONES

El **Parque Eólico Los Cerrillos** ha sido sometido al proceso de verificación para la prestación de Servicios Complementarios. El mismo ha sido llevado a cabo bajo los lineamientos establecidos en la Norma Técnica de Servicios Complementarios y el Anexo Técnico, "*Verificación de Instalaciones para la Prestación de SCCC*" vigente.

En lo que respecta al ***SCCC de Control de Tensión*** y en función de los ensayos realizados puede concluirse que:

- Mediante ensayos de respuesta al escalón se comprueba el correcto desempeño dinámico del control local de los aerogeneradores en su modo de control de potencia reactiva. La respuesta registrada es estable y el error en estado estacionario es nulo.
- Mediante ensayos de respuesta al escalón se comprueba el correcto desempeño dinámico del controlador de planta en sus modos de control de potencia reactiva, factor de potencia y tensión. La respuesta registrada es estable y el error en estado estacionario es nulo.
- Se realiza la verificación de máxima inyección y absorción de potencia reactiva del parque en todo el rango de potencia activa. Se toma como referencia el informe de determinación de curvas PQ máxima teórica: "*EE-EN-2024-0912-RA_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_PE_Los_Cerrillos*".
- Debido a restricciones del despacho no fue posible operar en los cinco niveles de tensión en el punto de interconexión de la instalación. Sin embargo, no se evidencian restricciones por parte del parque para operar dentro de las curvas de operación definidas en el capítulo 6.



8 ANEXOS

8.1 Verificación de curvas de capacidad en diferentes niveles de tensión

A continuación, se presentan los registros temporales para cada punto operativo alcanzado (P, Q, V), donde se presentan las siguientes señales:

- Tensión en POI (señal UBUS).
- Potencia reactiva en POI (señal QBUS).
- Potencia activa en POI (señal PBUS).

8.1.1 Verificación curva PQ @ 1.05 p.u.

A continuación, se presentan las mediciones realizadas para los distintos puntos de despacho de potencia activa recorriendo la curva de capacidad de la central correspondiente a 1.05 p.u.



Punto P1_CT-Q1

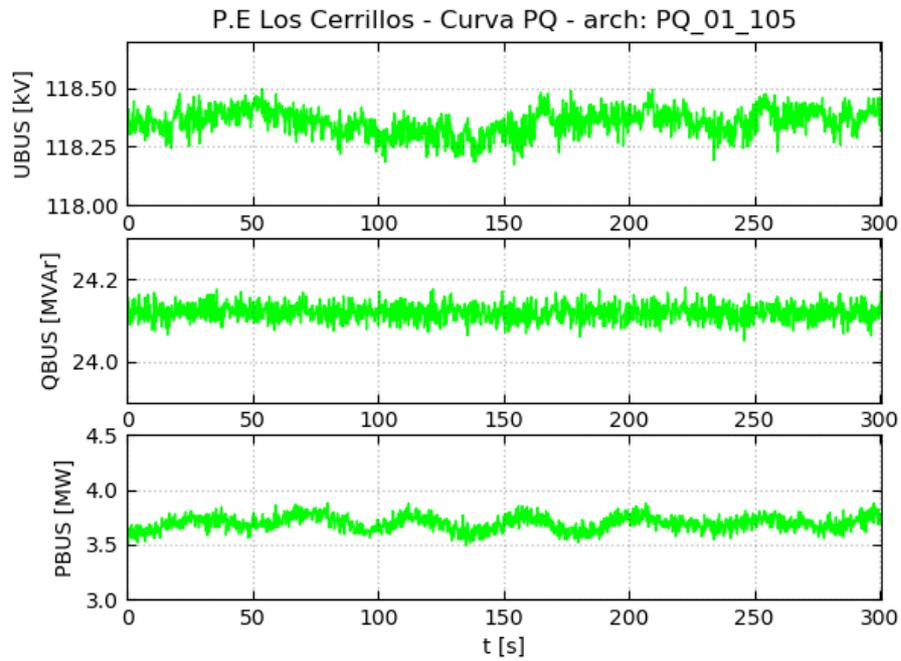


Figura 8.1 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI

Punto P2_CT-Q2

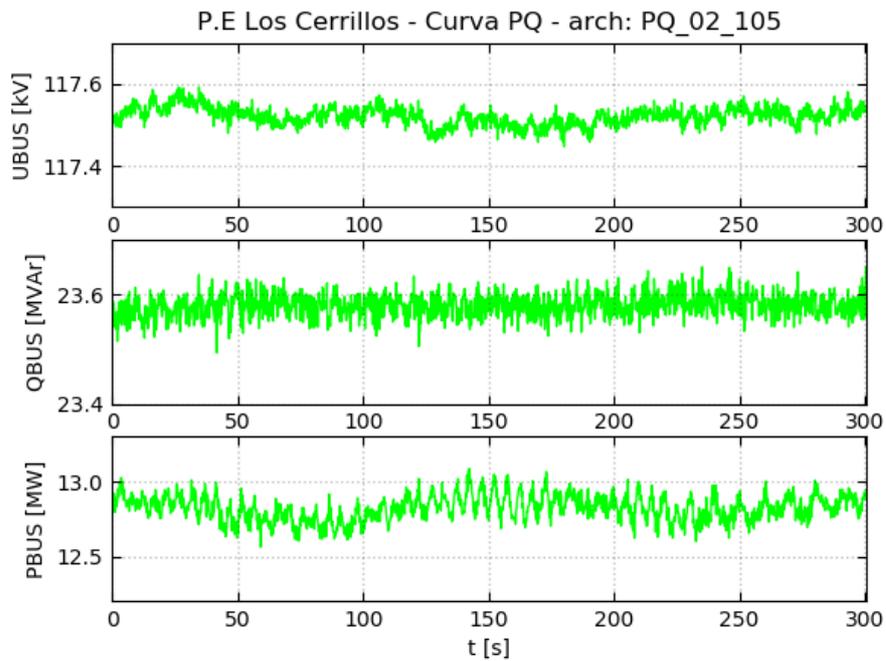


Figura 8.2 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI



Punto P4_CT-Q3

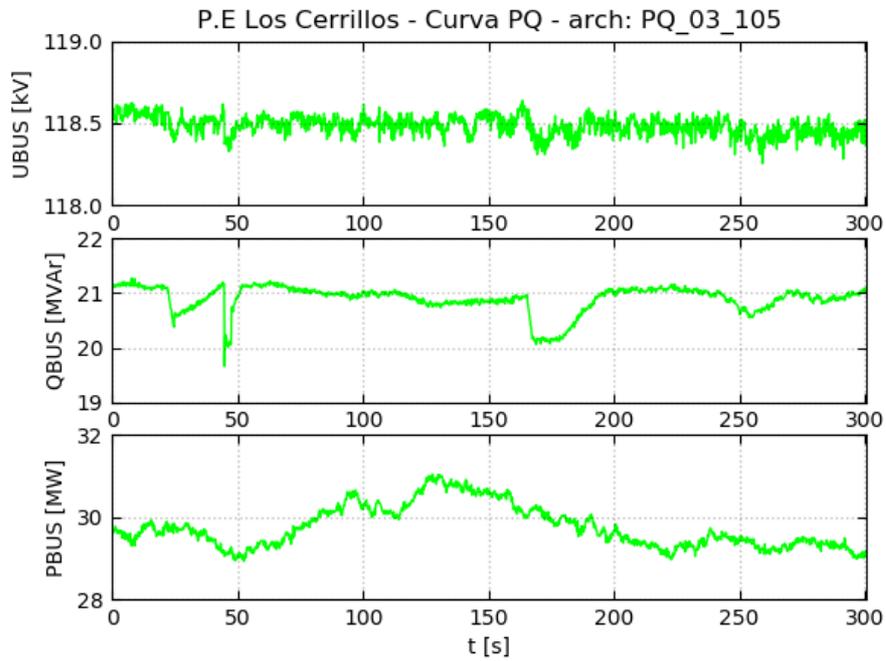


Figura 8.3 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI

Punto P5_CT-Q4

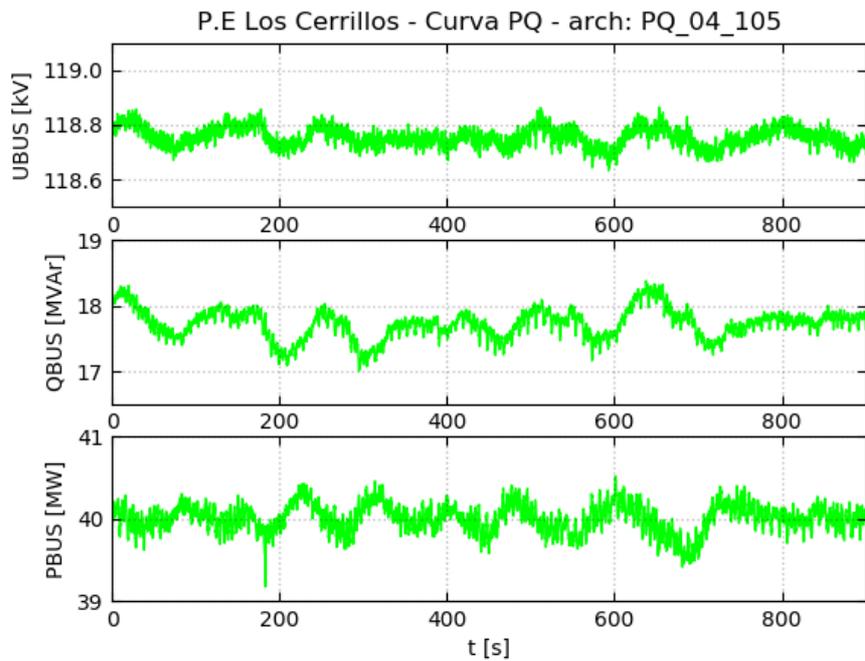


Figura 8.4 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI



8.1.2 Verificación curva PQ @ 1.00 p.u.

A continuación, se presentan las mediciones realizadas para los distintos puntos de despacho de potencia activa recorriendo la curva de capacidad de la central correspondiente a 1.0 p.u.

Punto P5_CT-Q5

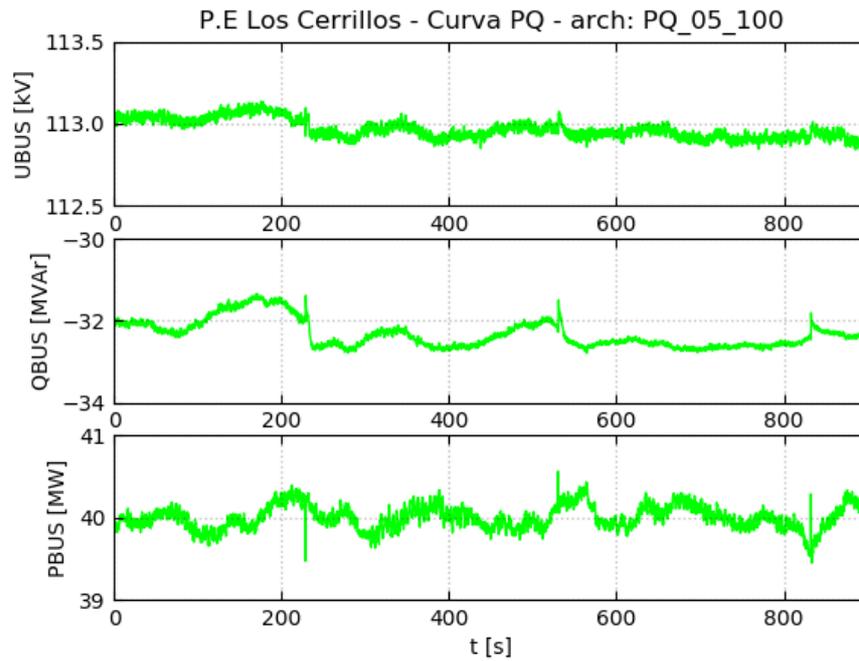


Figura 8.5 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI



Punto P4_CT-Q6

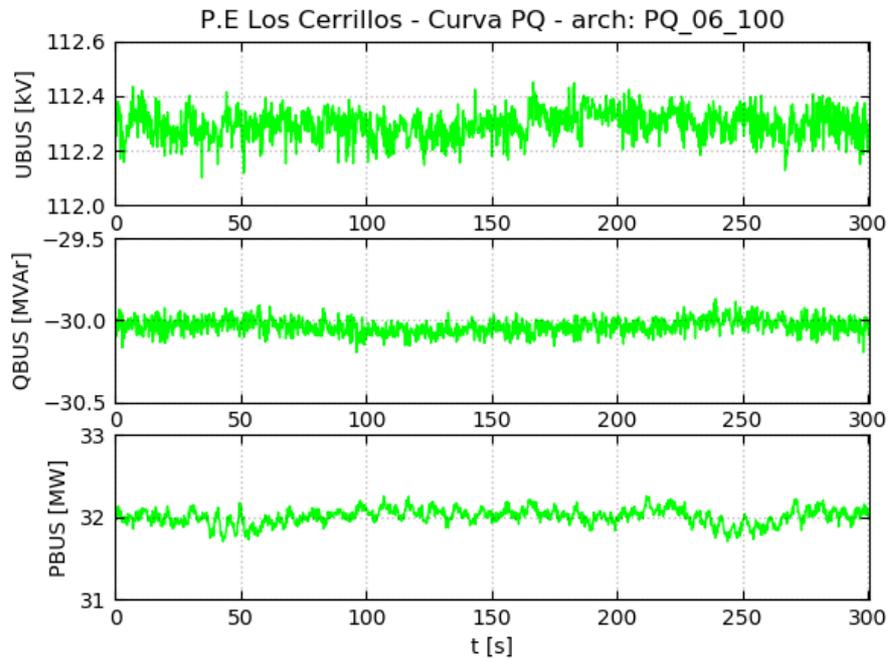


Figura 8.6 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI

Punto P2_CT-Q7

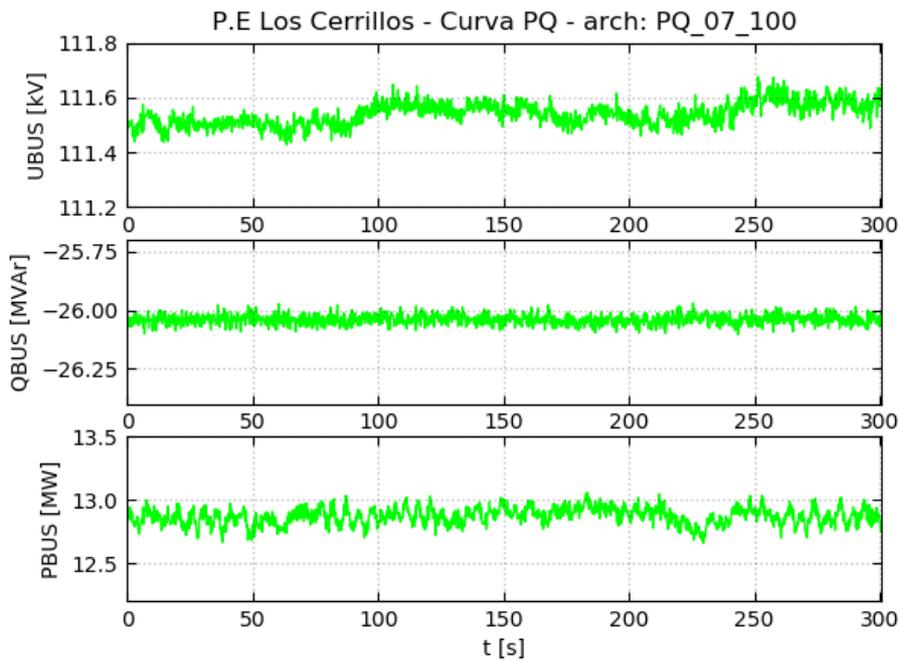


Figura 8.7 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI



Punto P1_CT-Q8

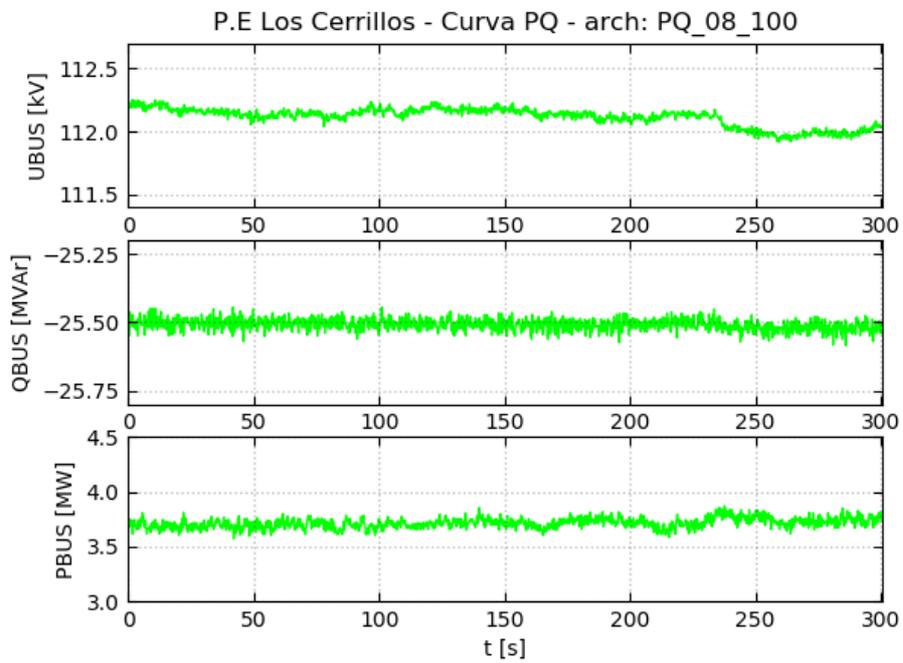


Figura 8.8 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales en POI



8.2 Medidas complementarias

A modo complementario, se presentan las condiciones de viento en el POI durante el desarrollo de los ensayos.

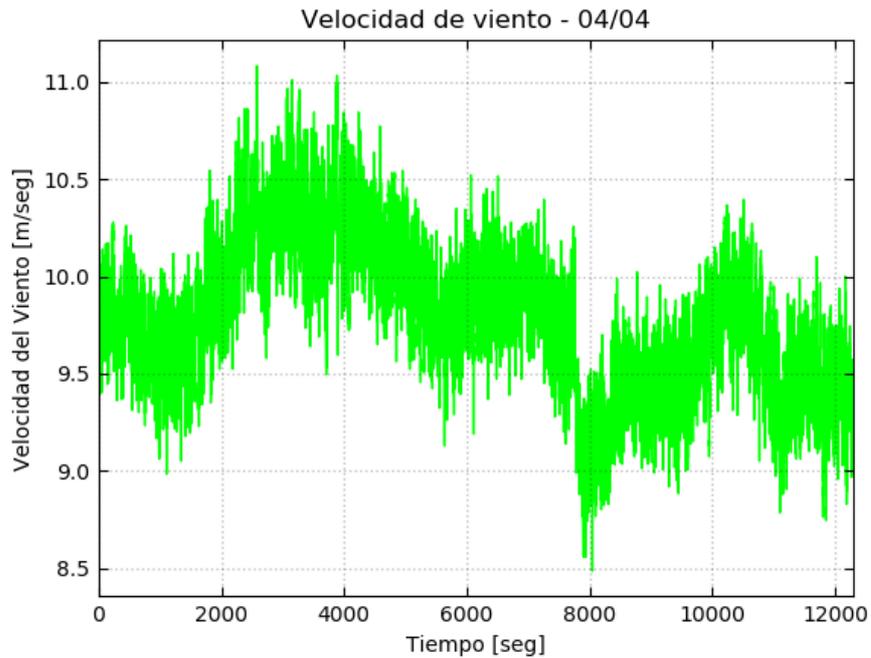


Figura 8.9 – Velocidad del viento durante los ensayos

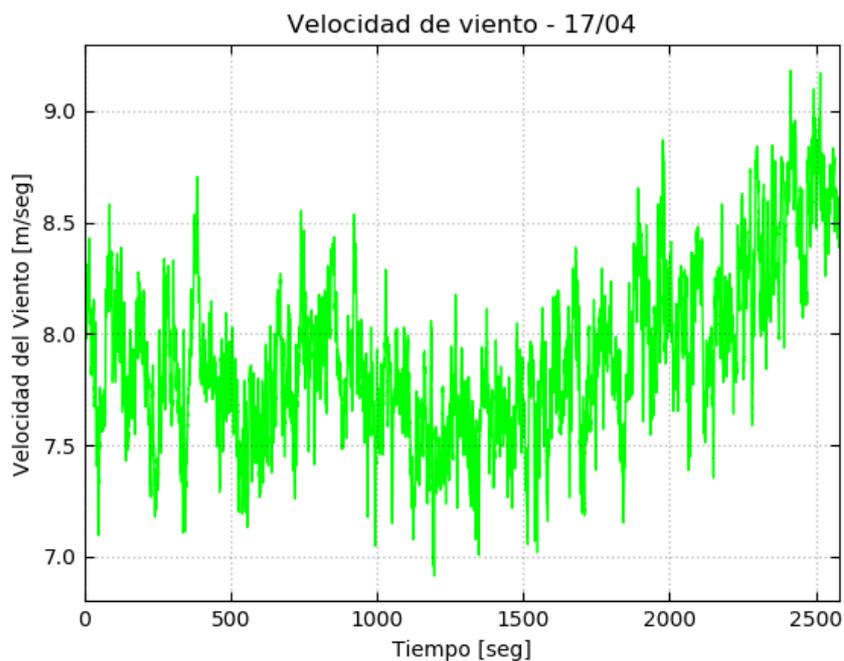


Figura 8.10 – Velocidad del viento durante los ensayos

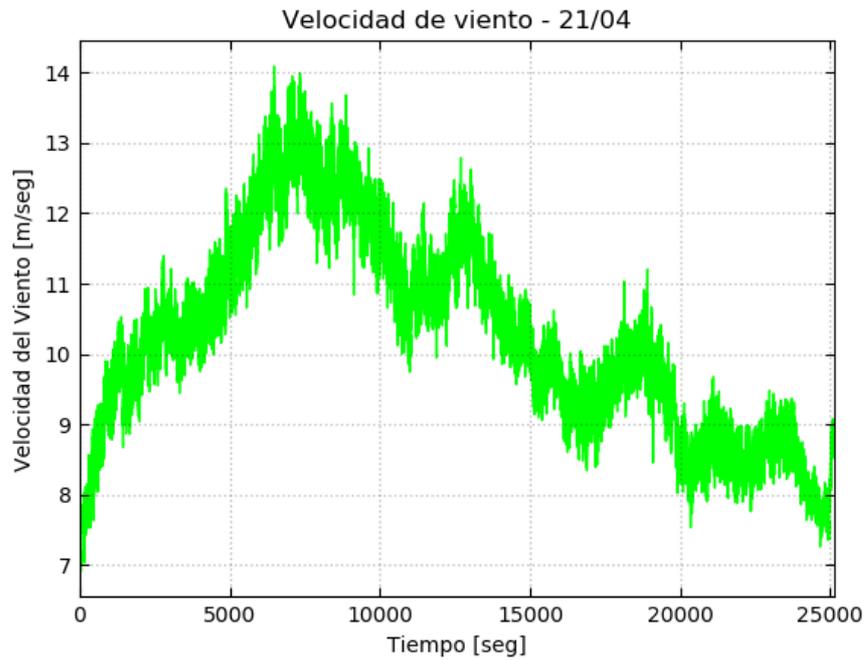


Figura 8.11 – Velocidad del viento durante los ensayos

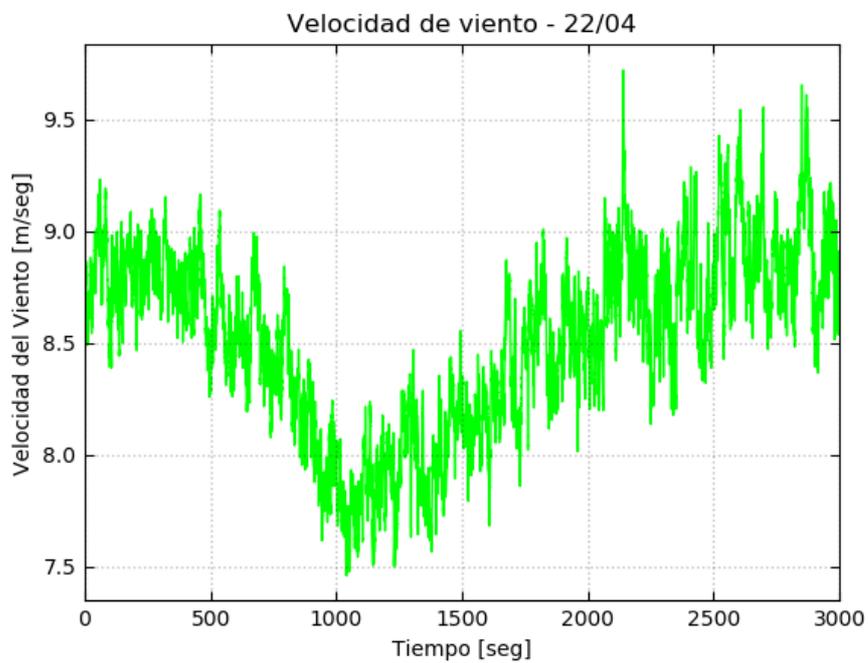


Figura 8.12 – Velocidad del viento durante los ensayos

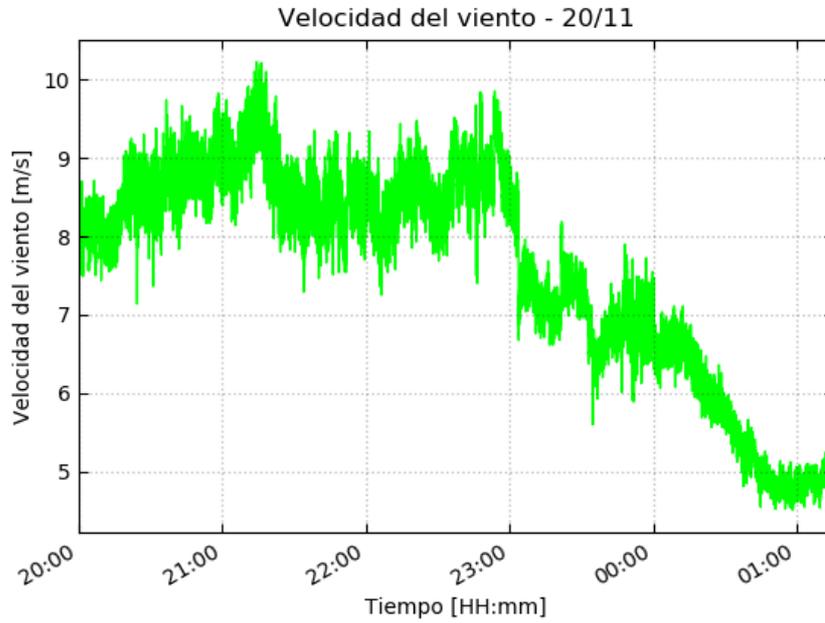


Figura 8.13 – Velocidad del viento durante los ensayos

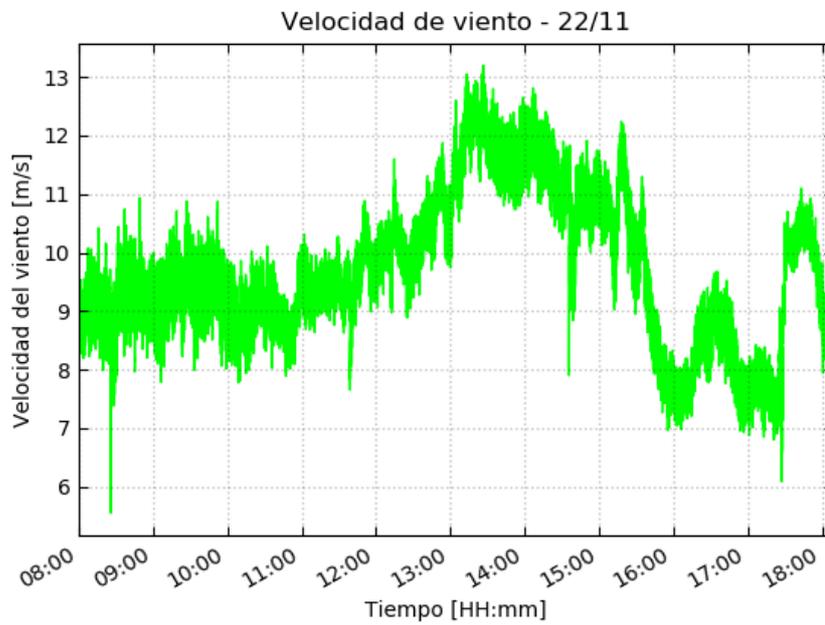


Figura 8.14 – Velocidad del viento durante los ensayos

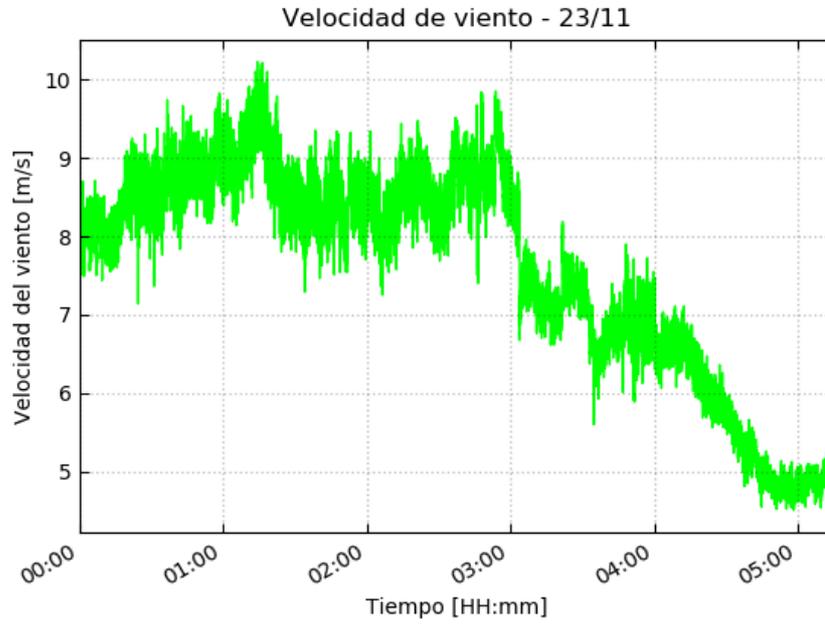


Figura 8.15 – Velocidad del viento durante los ensayos

8.3 Información del PPC

Q setpoint control mode

For studies with direct reactive power control mode the parameter *SelectSchemeQ* has to be set to 2. After initialization process described in chapter 4, a setpoint step will be realized by change of *Qoffset [Mvar]* on intended simulation time. A ramped setpoint change can be achieved by activating the Q ramp function with the parameter *Q_ramp_enable*. Two different types of ramps can be used. One ramp is defined by a given time in which the new setpoint has to be reached. The other ramp reaches its new setpoint with a defined ramp rate. Table 1 shows the PI controller parameters which determine the response to setpoint changes.

For the open loop control mode the Parameter *Q_OLC_EN* has to be changed.

Figura 8.16 – Modo de control de potencia reactiva del PPC Nordex Energy GmbH

Direct voltage control mode

For studies with direct voltage control the parameter *SelectSchemeQ* has to be set to 3. After initialization process described in chapter 4, a setpoint step will realized by change of *Uoffset [kV]* on intended simulation time. A ramped setpoint change can be achieved by activating the Q ramp function with the parameter *Q_ramp_enable*. Two different types of ramps can be used. One ramp is defined by a given time in which the new setpoint has to be reached. The other ramp reaches its new setpoint with a defined ramp rate.

Q=f(U) control mode

For studies with Q=f(U) control mode the parameter *SelectSchemeQ* has to be set to 0. A reaction of the Q=f(U) control can be realised by a paramter change on *Uoffset* or by a tap change of the windfarm transformer or a setpoint change of the AC voltage source if this used to represent the grid. The setpoint of the Q=f(U) function is controlled by the same the PI controller as the Q setpoint control (see Table 2).

Figura 8.17 – Modo de control de tensión del PPC Nordex Energy GmbH

Power-factor as a function of voltage (PF=f(U))

For studies with PF=f(U) control mode the parameters *PF_PfU_EN* and *SelectSchemeQ* have to be set to 1. Also the slope defining parameters *PF_PfU_gain_rising* and *PF_PfU_gain_falling* and the voltage level are important for parameterization of this characteristic. The slope parameters are given in $\cos(\phi)/kV$. Their minimum and maximum values are defined by the parameters *PF_PfU_PFmin* and *PF_PfU_PFmax*.

Figura 8.18 – Modo de control de factor de potencia del PPC Nordex Energy GmbH



Absolute Active Power Constraint

The response to active power setpoints can be verified by variation of the parameter P_{ext_set} . The setpoint is given in MW. The external setpoint is enabled by setting parameter $P_{ext_set_EN}$ to 1. The system will follow the setpoint with its default settings.

For the open loop control mode the Parameter P_{OLC_EN} has to be changed.

Active Power Gradient Constraint

It is also possible to follow the setpoint by means of a ramp function. The ramp function can be enabled or disabled by the parameter P_{ramp_ENABLE} . Two different types of ramps can be used. One ramp is defined by a given time in which the new setpoint has to be reached ($P_{ramp_ENABLE} = 2$). The other ramp reaches its new setpoint with a defined ramp rate in MW/s ($P_{ramp_ENABLE} = 1$).

Frequency dependent active power control

For any frequency test the parameter $SelectSchemeP$ has to be set to 1. The base for all frequency tests is an array called KL with 2 x 9 elements. The first row KL_x defines frequency points in Hz. The second row KL_y defines active power values in %. The 5th value has to be the rated frequency and the 4th and 6th value determine the deadband of the frequency curve. All other points can be chosen freely.

Figura 8.19 – Modo de control de potencia activa del PPC Nordex Energy GmbH

8.4 Protección de los aerogeneradores

Function	Response threshold	Delay time
Over voltage protection stage 1	$U > 1.15 U_{nom}$	60 s
Over voltage protection stage 2	$U > 1.25 U_{nom}$	0.1 s
Under voltage protection stage 1	$U < 0.87 U_{nom}$	180 s
Under voltage protection stage 2	$U < 0.80 U_{nom}$	11 s
Over frequency protection stage 1	$f > 52.0 \text{ Hz}$	0.2 s
Over frequency protection stage 2	$f > 52.0 \text{ Hz}$	0.2 s
Under frequency protection stage 1	$f < 47.5 \text{ Hz}$	300 s
Under frequency protection stage 2	$f < 47.0 \text{ Hz}$	0.2 s
Frequency gradient protection	4 Hz/s	1 s

Figura 8.20 – Protecciones tensión y frecuencia de los aerogeneradores Nordex N163



8.5 Antecedentes del transformador principal

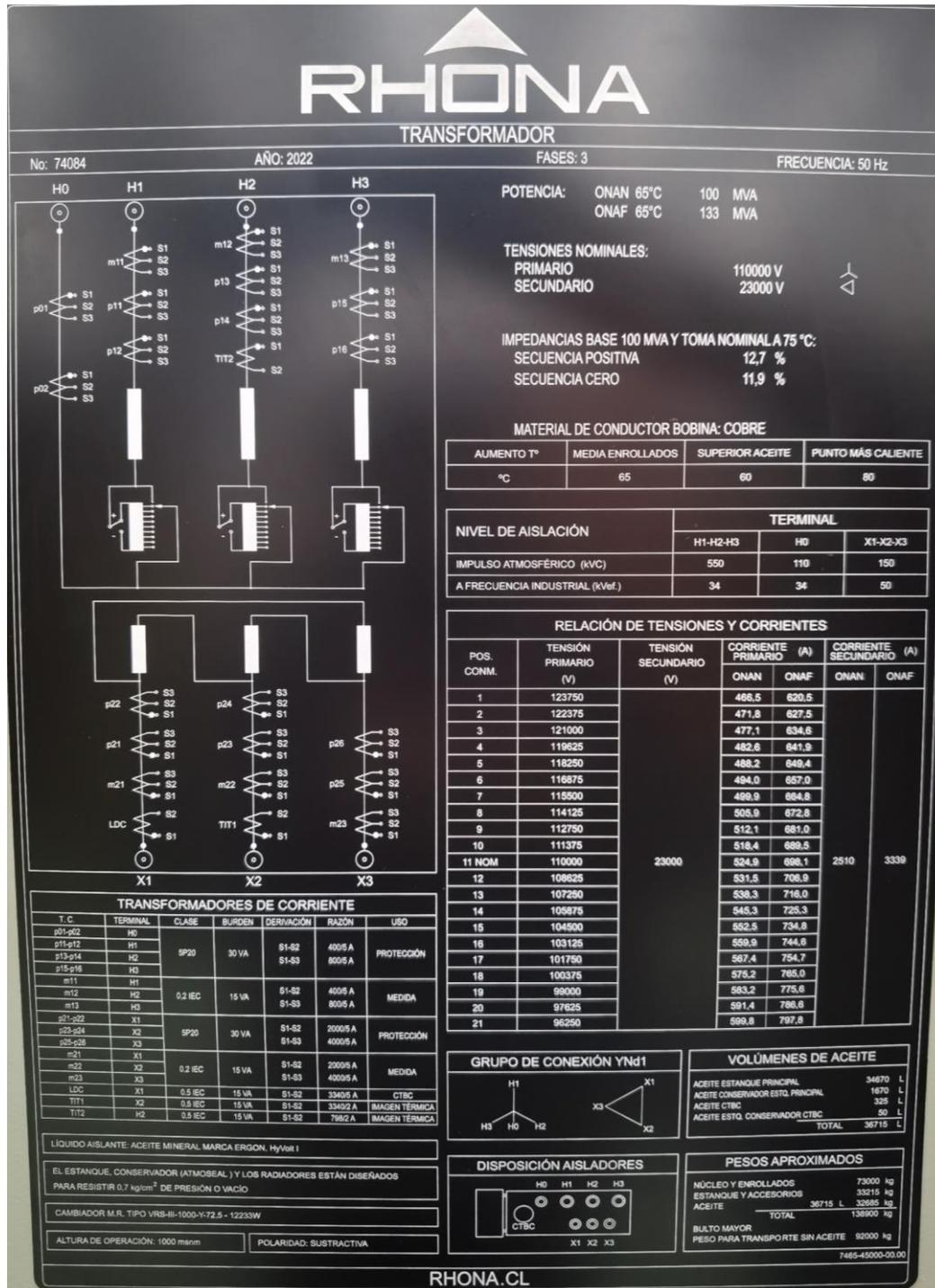


Figura 8.21 – Placa del transformador principal



8.6 Antecedentes de los transformadores de bloque

Techn. parameters			
Type:	DST 6350 H/30	Cooling method:	KFWF
Nominal Capacity:	6.350 kVA	Operating Mode:	continuous
Nominal Voltage:	23.000 V / 750 V	Frequency:	50,00 Hz
Nominal Current HV:	159,4 A	Type:	LT
Nominal Current LV:	4.888 A	Insulation Class:	120
Tappings HV:	±2x2,5 %	Duration of short-circuit:	2 s
AC HV / LV:	70,0 kV / 3,0 kV	Coolant:	synthetic ester oil
BIL HV / LV:	170 kV	Excess temp. of winding:	60 K
Insulated for:	36,0 kV / 1,1 kV	Excess temp. of oil:	30 K
Degree of protection transform:	IP54	Excess tem hot spot:	70 K
Degree of protection bushings:	IP54/IP00		
Vectorgroup:	Dy 5		
Neutral point:	not brought out		
	Water inlet temperature: max 55°C		
	Water flow rate: 160l/min		
Losses			
No-load losses:	2.720 W	Tolerance:	0,0 %
impedance losses:	68.000 W	Tolerance:	0,0 %
Efficiency (PEI):	99,572 %		
Impedance voltage:	9,00 %	Tolerance:	10,0 %
Reference Temp. uk / Pk:	75 °C		
Sound power:	80 dB	Tolerance:	0,0 dB

Figura 8.22 – Placa del transformador de bloque

8.7 Antecedentes de los transformadores auxiliares

CERTIFICADO DE PRUEBAS					
N° CERTIFICADO	: 0000079961	N°SERIE	: 75659	CLIENTE	: ELEC NOR CHILE S.A.
O.C.N°	: 21-800030-17	N° OT	: OT000025-22	FECHA DE EMISIÓN	:
FABRICANTE	: RHONA S.A	N° TAG	: SIN TAG	TIPO	: PAD MOUNTED
PRODUCTO	: TRANSFORMADOR 3F 200kVA 23/4 kV				
POTENCIA [kVA]	: 200	REFRIGERACIÓN	: OA	ELEVACIÓN DE T°	: 65 [°C]
TENSIÓN AT [V]	: 23000	DERIVACIONES	: 24150 - 23575 - 23000 - 22425 - 21850	TENSIÓN BT [V]	: 400
POLARIDAD	: Dyn1	FLUIDO AISLANTE	: Aceite Mineral	FRECUENCIA	: 50 [Hz]
ALT DE OPERACIÓN	: 1000 [msnm]	FASES	: 3	PESO TOTAL	: 1550 [kg]

Figura 8.23 – Placa del transformador de SS/AA



8.9 Homologación de ensayos

miércoles 06-11-2024 14:19

WJ Williams Jimenez San Martin <williams.jimenez@coordinador.cl>
RE: Proceso Verificacion SSCC NUP.995-3252-994

Para Gonzalez Moraga Diego

CC Manfredo Héctor Tombolini Jeria; Di Marzio Giuseppe; Santibañez Marcelo; Bahamondes Fabian; Soto Alex Rodrigo; Benjamín Gálvez Aguado; verificacion.SSCC; Javiera Ketterer Hoppe; Mante Carlos; ...

Estimado Diego,

El departamento de control de la operación conforme a su solicitud ha revisado la minuta de ensayos de SSCC homologables y no hay comentarios sobre los ensayos mencionados en el documento que nos enviaste.

Las pruebas homologables corresponden a:

- Ensayos dinámicos en 3 estados de carga
- Pruebas dinámicas de control de potencia reactiva en 3 estados de carga
- Pruebas dinámicas de control de factor de potencia en 3 estados de carga
- Pruebas dinámicas de control de tensión en 3 estados de carga
- Toma y bajada de carga con rampa de potencia activa ajustada

Quedaría pendiente a realizarse en los ensayos:

- Medición de curva de capacidad
- Pruebas de control primario de frecuencia
- Pruebas de rampa de potencia activa con gradiente adicional

Figura 8.25 – Aprobación del CEN sobre la homologación de ensayos

8.10 Archivos adjuntos entregados

Forman parte integral del presente informe los siguientes archivos que se entregan en forma adjunta:

- Registros de ensayos: "**EE-EN-2024-1929-RA_PE_Los_Cerrillos_Registros.zip**"

Todos los registros de ensayos del presente informe son entregados adjuntos en formato ".csv". Para correlacionar el nombre del archivo con la figura se debe considerar las siguientes tablas:

Ensayos – Aerogenerador cercano G01	
Nombre	Descripción
WTG-G01_003	CTRL Q – Baja
WTG-G01_002	CTRL Q – Media
WTG-G01_001	CTRL Q – Alta

Tabla 8.1 – Registros aerogenerador cercano



Ensayos – Aerogenerador lejano F04	
Nombre	Descripción
WTG-F04_003	CTRL Q – Baja
WTG-F04_002	CTRL Q – Media
WTG-F04_001	CTRL Q – Alta

Tabla 8.2 – Registros aerogenerador lejano

Ensayos PPC – Control de tensión	
Nombre	Descripción
PPC_001	CTRL Q – Baja
PPC_104	CTRL Q – Media
PPC_101	CTRL Q – Alta
PPC_002	CTRL PF – Baja
PPC_105	CTRL PF – Media
PPC_102	CTRL PF – Alta
PPC_003	CTRL V – Baja
PPC_106	CTRL V – Media
PPC_103	CTRL V – Alta

Tabla 8.3 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión en PPC



Ensayos - Curva PQ – 1.0 p.u.	
Nombre	Descripción
PQ_05_100	P5 Q5
PQ_06_100	P4 Q6
PQ_07_100	P3 Q7
PQ_08_100	P1 Q8

Tabla 8.4 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.00 p.u.

Ensayos - Curva PQ – 1.05 p.u.	
Nombre	Descripción
PQ_01_105	P1 Q1
PQ_02_105	P2 Q2
PQ_03_105	P4 Q3
PQ_04_105	P5 Q4

Tabla 8.5 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.05 p.u.

Mediciones complementarias	
Nombre	Descripción
WSPEED_2011	Velocidad del viento – 20/11
WSPEED_2211	Velocidad del viento – 22/11
WSPEED_2311	Velocidad del viento – 23/11

Tabla 8.6 – Registro de datos ambientales



8.11 Acta de pruebas SSCC

ESTUDIOS ELECTRICOS <small>ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS</small>			
ACTA DE PRUEBAS			
Fecha	23/11/2024	Empresa	Statkraft
ID Proyecto	EE-2024-086	Ubicación	Litueche, Región de O'Higgins
Denominación Planta	Parque Eólico Cerrillos		
Servicios por verificar	<i>Servicios Complementarios:</i> - Control de Tensión (CT) - Control Primario de Frecuencia (CPF) - Control Terciario de Frecuencia en giro (CTFg)		
Datos de la instalación			
Potencia aparente nominal [MVA]	47.2 MVA	Tipo de central	Eólica
Tensión en POI nominal [kV]	110 kV	Cantidad de aerogeneradores	8
Potencia activa máxima [MW]	44.56 MW	Transformador elevador bajo carga	33 / 110 kV
Potencia activa mínima [MW]	3.7 MW		
Responsables durante las pruebas			
Coordinado	Marcelo Santibañez	Representante Statkraft en las pruebas	
Equipo Experto Técnico	Marcelo Calviz	Equipo Experto Técnico	
Datos de las pruebas			
Estado previo de la planta	En servicio		
Inicio del período de pruebas	20/11/2024		
Fin del período de pruebas	23/11/2024		
Protocolo aplicable	EE-EN-2024-0934-RA_Procedimiento_Ensayos_SSCC_PE_Los_Cerrillos		
Firmas Aclaración/Empresa	Marcelo Santibañez <small>Coordinado</small>	<small>Digitally signed by</small> Marcelo Santibañez; <small>Date: 2024.12.02</small> 13:17:45 -03'00'	 <small>Marcelo Calviz</small> Ino. Ensayos Experto técnico

Figura 8.26 – Acta de Pruebas SSCC (1 de 3)



ESTUDIOS ELECTRICOS

ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Resumen de pruebas

SC Control de Tensión:

No se realizan pruebas dinámicas referidas al control de tensión debido a que las mismas fueron validadas durante los ensayos de validación de modelos dinámicos tanto para nivel aerogeneradores como a nivel PPC. Al respecto el CEN indicó lo siguiente mediante correo:

"El departamento de control de la operación conforme a su solicitud ha revisado la minuta de ensayos de SSCC homologables y no hay comentarios sobre los ensayos mencionados en el documento que nos enviaste.

Las pruebas homologables corresponden a:

- *Ensayos dinámicos en 3 estados de carga*
- *Pruebas dinámicas de control de potencia reactiva en 3 estados de carga*
- *Pruebas dinámicas de control de factor de potencia en 3 estados de carga*
- *Pruebas dinámicas de control de tensión en 3 estados de carga*
- *Toma y bajada de carga con rampa de potencia activa ajustada*

"

Se realizan pruebas estáticas con el parque conectado a la red:

- Puntos Curva PQ operables en 4 estados de carga.

-

SC Control de Frecuencia:

Se realizan pruebas de Control Primario de Frecuencia en el parque:

- Escalones en la referencia de frecuencia en 4 estados de carga.
- Registro de variaciones naturales de la red en 4 estados de carga.

Se realizan pruebas de Control Terciario de Frecuencia en giro en el parque:

- Toma de carga con tasa normal de operación y una tasa adicional.
- Bajada de carga con tasa normal de operación y una tasa adicional.

Observaciones/Desvíos del protocolo

SC Control de Tensión:

Curva PQ:

De acuerdo con el procedimiento, se intentan probar los distintos niveles de tensión en POI para cuatro estados de carga. Se logra ensayar únicamente un solo nivel de tensión en función de si era una condición de absorción o inyección de reactivos.

Se logra verificar la inyección de reactivos en una tensión aproximada de 1.07pu, que permite evaluar los niveles de tensión de 1.05pu y 1.10pu de tensión. En tanto, para la condición de absorción de reactivos se verifica en una tensión aproximada de 1.01pu, que permite evaluar el nivel de tensión de 1.00pu de tensión.

Firmas Aclaración/Empresa	Marcelo Santibañez Coordinado Digitally signed by Marcelo Santibañez Date: 2024.12.02 13:17:20 -03'00'	 Marcelo Calviz Inq. Ensayos Experto técnico
-------------------------------------	--	--

Figura 8.27 – Acta de Pruebas SSCC (2 de 3)



ESTUDIOS ELECTRICOS
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Se presentan a continuación, dos tablas resumen con los puntos de absorción e inyección de lo realmente alcanzado en planta.

Despacho potencia activa	Subexcitación				
	Tensión 0.9 p.u.	Tensión 0.95 p.u.	Tensión 1.0 p.u.	Tensión 1.05 p.u.	Tensión 1.1 p.u.
P5 _{PPC} = 39.9 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.02 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P4 _{PPC} = 31.28 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P2 _{PPC} = 12.91 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P1 _{PPC} = 3.7 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable

Despacho potencia activa	Sobrexitación				
	Tensión 0.9 p.u.	Tensión 0.95 p.u.	Tensión 1.0 p.u.	Tensión 1.05 p.u.	Tensión 1.1 p.u.
P5 _{PPC} = 39.9 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P4 _{PPC} = 31.28 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P2 _{PPC} = 12.91 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P1 _{PPC} = 3.7 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)

SC Control Primario de Frecuencia:

Ante la falta de recurso primario se ajusta el estado de alta carga.

A continuación, se detallan los desvíos respecto de lo presentado en procedimiento:

Despacho de Potencia Activa [MW]	Perturbación tipo escalón					Observación
	Estatismo	Punto de aplicación	Banda Muerta [mHz]	Magnitud Escalón [Hz]	Duración [min]	
P5 _{CPF}	Ajustado	Simulación de frecuencia	±25	±0.2, +0.7	5	Modificación del despacho a 40 MW por falta de recurso eólico
P5 _{CPF}	Ajustado	Simulación de frecuencia	±25	-0.7	5	Modificación del despacho a 32 MW por falta de recurso eólico

SC Control Terciario de Frecuencia en giro:

Se realiza la toma y bajada de carga en su tasa normal de operación 4.9 MW/min (10%P_{nom}/min), y con una tasa adicional de 9.5 MW/min (20%P_{nom}/min),

Firmas Aclaración/Empresa	 Marcelo Santibañez Digitally signed by Marcelo Santibañez Date: 2024.12.02 13:18:00 -03'00' Coordinado	 Marcelo Calvz Ing. Ensayos Experto técnico
-------------------------------------	---	--

Figura 8.28 – Acta de Pruebas SSSC (3 de 3)



8.12 Certificado de calibración del equipamiento utilizado

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN



ESTUDIOS ELÉCTRICOS

Estudios Eléctricos declara que el instrumento:
Fue calibrado siguiendo los lineamientos establecidos en el procedimiento
EE-MP-2009-156_05 Control de Equipos habiéndose encontrado conforme y
quedando habilitado para su uso.

Instrumento	Número de Serie:	Última Calibración
JANITZA UMG512 Pro	4201-5361	11/4/2024

Para la calibración se emplearon los siguientes instrumentos patrón:

Instrumento Patrón	Número de Serie:	Última calibración	Proxima calibración
VALIJA OKICRON 256-6	HH594R	4/3/2024	4/3/2025

Fecha de evaluación: 11/4/2024
Certificado número: EE-CI-2024-0410

Nombre Inspector: Leiss, Jorge
Firma:


**Power System Studies & Power Plant Field
Testing and Electrical Commissioning**

Figura 8.29 – Certificado de calibración adquisidor de datos



Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.