



**ESTUDIOS  
ELECTRICOS**

**Empresa**  
**País**  
**Proyecto**  
**Descripción**

Starkraft  
Chile  
Parque Eólico Los Cerrillos  
Informe final - Control Primario de  
Frecuencia



**Starkraft**

**CÓDIGO DE PROYECTO** EE-2024-086  
**CÓDIGO DE INFORME** EE-EN-2024-2006  
**REVISIÓN** A

**18 dic. 24**



Este documento **EE-EN-2024-2006-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](mailto:claudio.celman@estudios-electricos.com)

**Ing. Andrés Capalbo**  
Sub-Gerente Dpto. Ensayos  
[andres.capalbo@estudios-electricos.com](mailto:andres.capalbo@estudios-electricos.com)

**Ing. Pablo Rifrani**  
Gerente Dpto. Ensayos  
[pablo.rifrani@estudios-electricos.com](mailto: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 48 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

<b>1</b>	<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
	2.1 Descripción de los participantes .....	5
	2.2 Nomenclatura.....	6
<b>3</b>	<b>REQUERIMIENTO NORMATIVO .....</b>	<b>7</b>
	3.1 Control de frecuencia.....	7
	3.2 Control primario de frecuencia .....	9
	3.2.1 Definición.....	9
	3.2.2 Requerimientos asociados a la prestación .....	10
<b>4</b>	<b>CONTEXTO DE LOS ENSAYOS.....</b>	<b>11</b>
	4.1 Procedimiento de pruebas.....	11
	4.2 Instrumental utilizado para la adquisición de datos.....	11
	4.3 Registro de señales con equipos de planta.....	13
	4.4 Metodología general de los ensayos .....	13
<b>5</b>	<b>VERIFICACION DEL CONTROL PRIMARIO DE FRECUENCIA .....</b>	<b>14</b>
	5.1 Respuesta ante variaciones tipo escalón .....	15
	5.2 Respuesta ante variaciones normales de la frecuencia del SEN .....	25
	5.3 Análisis del control primario de frecuencia .....	28
	5.3.1 Análisis de ensayos de respuesta al escalón .....	28
	5.3.2 Análisis de ensayos de variaciones normales de la frecuencia del SEN.....	30
	5.3.3 Determinación del retardo inicial y tiempo de establecimiento .....	33
	5.3.4 Resumen de aportes .....	35
<b>6</b>	<b>ANALISIS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>38</b>
	7.1 Medidas complementarias .....	38
	7.2 Diagrama unilineal.....	40
	7.3 Homologación de ensayos.....	41
	7.4 Archivos adjuntos entregados.....	41
	7.5 Acta de pruebas SSCC .....	44
	7.6 Certificado de calibración del equipamiento utilizado.....	47



# 1 RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento resume los resultados del proceso de Verificación de Servicios Complementarios (SSCC) de **Control Primario de Frecuencia** 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).

Los ensayos se realizan siguiendo el procedimiento elaborado por Estudios Eléctricos S.A. según el documento *"EE-EN-2024-0934-RA\_Procedimiento\_Ensayos\_SSCC\_PE\_Los\_Cerrillos"*, aprobado por el CEN.

Previamente se llevaron adelante pruebas en el contexto del proceso de Validación de Modelos Dinámicos (VMD) y de "Parámetros Operacionales (Pmax, MT y PPvD). 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 conformidad del CEN frente a lo presentado se muestra en el anexo 7.3.

No obstante, para el alcance particular de Control Primario de Frecuencia se han ejecutado la totalidad de los ensayos requeridos en la instancia de pruebas asociada a la verificación de Servicios Complementarios.

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



## 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 los días 22 y 23 de noviembre de 2024.



## 2.2 Nomenclatura

Tag	Descripción
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
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
EE	Estudios Eléctricos
CPF	Control primario de frecuencia
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 <sub>CF</sub>	Despacho de la central a mínimo técnico más bloque de reserva
P2 <sub>CF</sub>	Despacho de la central a $(P5_{CF} + 2 \cdot P1_{CF}) / 3$
P4 <sub>CF</sub>	Despacho de la central a $(2 \cdot P5_{CF} + P1_{CF}) / 3$
P5 <sub>CF</sub>	Despacho de la central a potencia máxima menos bloque de reserva

Tabla 2.2 – Nomenclatura empleada



## 3 REQUERIMIENTO NORMATIVO

### 3.1 Control de frecuencia

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 para prestar el servicio de control de frecuencia, específicamente control rápido de frecuencia (CRF), control primario de frecuencia (CPF), control secundario de frecuencia (CSF) y control terciario de frecuencia según la Norma Técnica de Servicios Complementarios (NTSSCC), y el Anexo Técnico "Verificación de Instalaciones para la Prestación de SSCC".

En líneas generales, las instalaciones deberán ser a los menos capaces de:

- Operar de manera estable en forma permanente en el rango de frecuencia comprendido entre 49 y 51 Hz, para tensiones comprendidas entre 0.95 y 1.05 por unidad de la tensión nominal.
- No reducir en más de un 10% su potencia activa entregada en estado normal de operación al SEN en su punto de conexión para frecuencias estabilizadas en el rango de 47.5 Hz y 49.5 Hz.
- Soportar cambios de frecuencia de hasta 2 Hz/s sin desconectarse del SEN. Para ello, la tasa de cambio de la frecuencia debe ser medida durante un período de 500 ms, según lo señalado en el artículo 3-11 de la NTSyCS.

En la Figura 3.1 se muestra la interpretación temporal de como intervienen las diferentes subcategorías de SSCC referidas al control de frecuencia según el Coordinador.

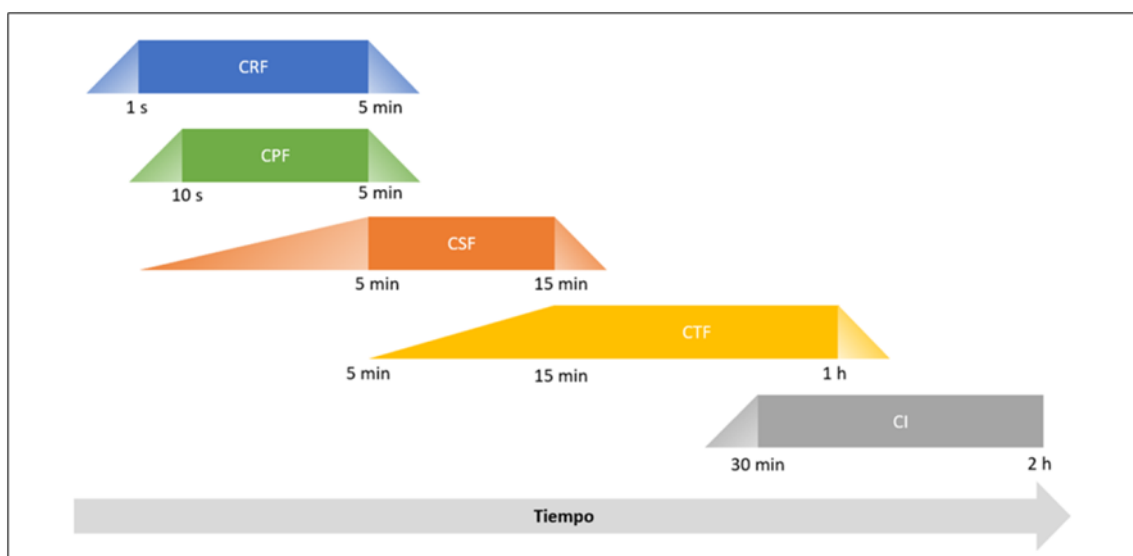


Figura 3.1 - Control de Frecuencia – Subcategorías según intervalo temporal

En la Figura 3.2 se presenta la interpretación de los distintos tiempos involucrados en cada subcategoría de SSCC de control de frecuencia de manera referencial.

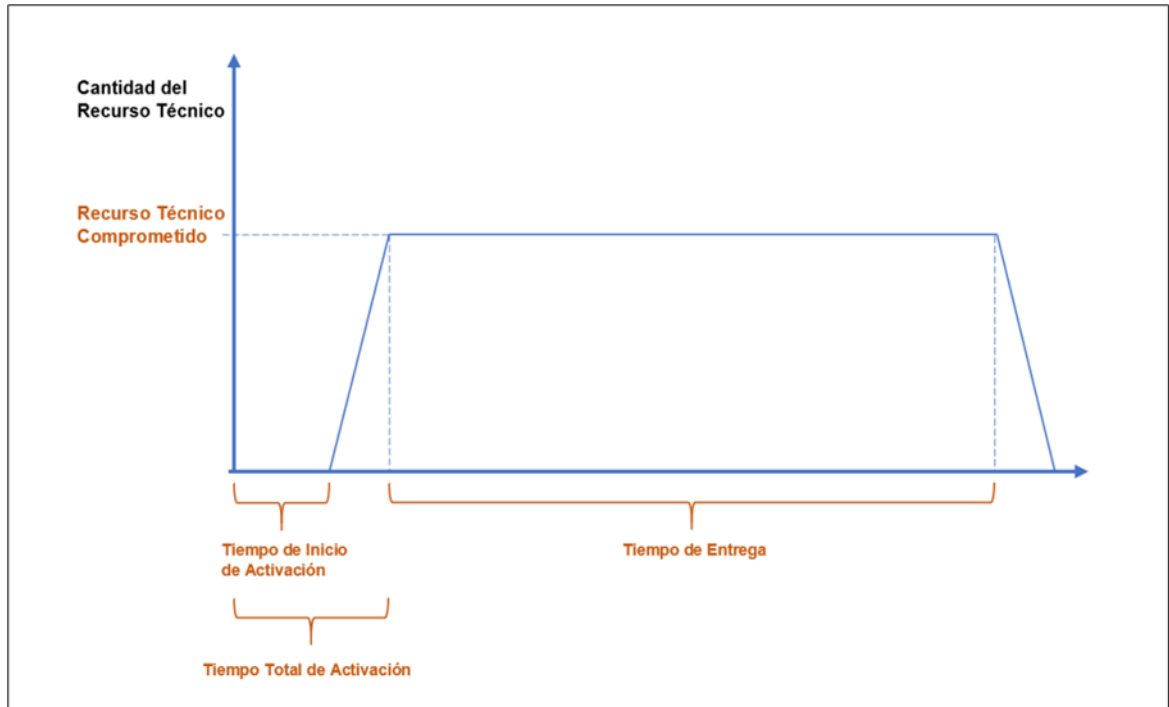


Figura 3.2 - Control de Frecuencia – Subcategorías según intervalo temporal

Donde:

- **Tiempo de inicio de activación:** Período en que se inicia la prestación del “Recurso Técnico Comprometido”, contado desde que es requerido el respectivo Servicio Complementario. Se entenderá que el respectivo Servicio Complementario es requerido cuando se produzca una condición operativa en el SEN, que active automatismos locales; a través del envío de la consigna tratándose de servicios automáticos centralizados; o desde la instrucción, en la operación en tiempo real, del Coordinador tratándose de Servicios Complementarios cuyo modo de activación no es mediante automatismos, según corresponda.
- **Tiempo total de activación:** Período en que se entrega la totalidad del “Recurso Técnico Comprometido”, incluyendo el “Tiempo de inicio de activación”.
- **Tiempo de entrega:** Período en que las instalaciones deberán ser capaces de mantener el total del “Recurso Técnico Comprometido”, contando desde el momento en que transcurrió el “Tiempo total de activación”.





Lo presentado anteriormente en ambas figuras se puede resumir en la siguiente tabla:

Subcategoría	Modo de activación	Tiempo de inicio de activación	Tiempo total de activación	Mínimo tiempo de entrega	Máximo tiempo de entrega
CRF	Automático local	-	1 s	5 min	-
CPF	Automático local	-	10 s	5 min	-
CSF	Automático centralizado	-	5 min	15 min	-
CTF	Por instrucción, en la operación en tiempo real, del CEN	5 min	15 min	-	1 hs
CI	Por instrucción, en la operación en tiempo real, del CEN	-	30 min	2 hs	-

Tabla 3.1 - Tiempos comprometidos por subcategoría – SSCC Control de frecuencia

## 3.2 Control primario de frecuencia

### 3.2.1 Definición

Corresponde a acciones de control automáticas locales orientadas a contener y corregir las desviaciones de frecuencia del sistema eléctrico.

El Tiempo Total de Activación del servicio CPF será de 10 [s], y su mínimo Tiempo de Entrega será de 5 [min].

La presentación de esta categoría de servicio se realizará a través de bandas de regulación simétricas, es decir, la reserva para subfrecuencia será igual que la reserva por sobrefrecuencia.



### 3.2.2 Requerimientos asociados a la prestación

En Estado Normal de operación del Sistema, es necesario contar con reservas de potencia activa para enfrentar las variaciones de la demanda respecto del valor programado para el despacho, con el fin de disminuir el error de frecuencia del Sistema con respecto a su valor nominal. Se considerarán como variaciones normales, las desviaciones que se encuentren dentro de la banda de  $\pm 0.2$  [Hz].

Considerando lo anterior, y dadas las exigencias de la NTSyCS vigente, en especial lo dispuesto en el artículo 3-17, para la prestación de este servicio se considerará la participación de unidades de tipo sincrónica en el caso de CPF+ y CPF-. En el caso de las unidades del tipo ERV, serán consideradas en la medida que cumplan con los requerimientos indicados por el Coordinador.

Los parque eólicos y fotovoltaicos que participen de la regulación primaria deberán contar con las características técnicas asociadas al Controlador de Carga/Velocidad, según lo dispuesto en el artículo 3-17 de la NTSyCS. Este controlador deberá cumplir con las siguientes exigencias mínimas:

- a) El retardo inicial del sistema de carga/velocidad deberá ser inferior a dos segundos, desde la detección de la sub- o sobrefrecuencia, hasta el comienzo de la acción.
- b) En caso de sobrefrecuencia, la acción del controlador de frecuencia / potencia dará lugar a una reducción proporcional de la producción de potencia con un gradiente de hasta el 55 % de la potencia activa disponible por cada Hertz de desviación de frecuencia, a partir de los 50,2 [Hz] hasta 51,5 [Hz].
- c) En caso de subfrecuencia, el estatismo permanente será ajustable dentro del rango del 2% al 8%.
- d) La banda muerta será de  $\pm 200$  [mHz].
- e) El funcionamiento del controlador de frecuencia / potencia de los parques eólicos y fotovoltaicos estará limitado por la disponibilidad del recurso primario.



## 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 Instrumental 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 4.1.

Denominación	Marca / Modelo	N° serie	Certificado de calibración
Analizador de calidad de energía	Janitza / UMG512 Pro	4201 – 5361	Ver Anexo 7.6

Tabla 4.1 - Característica de los equipos de adquisición

Las señales registradas con el instrumental primario 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 7.2 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.

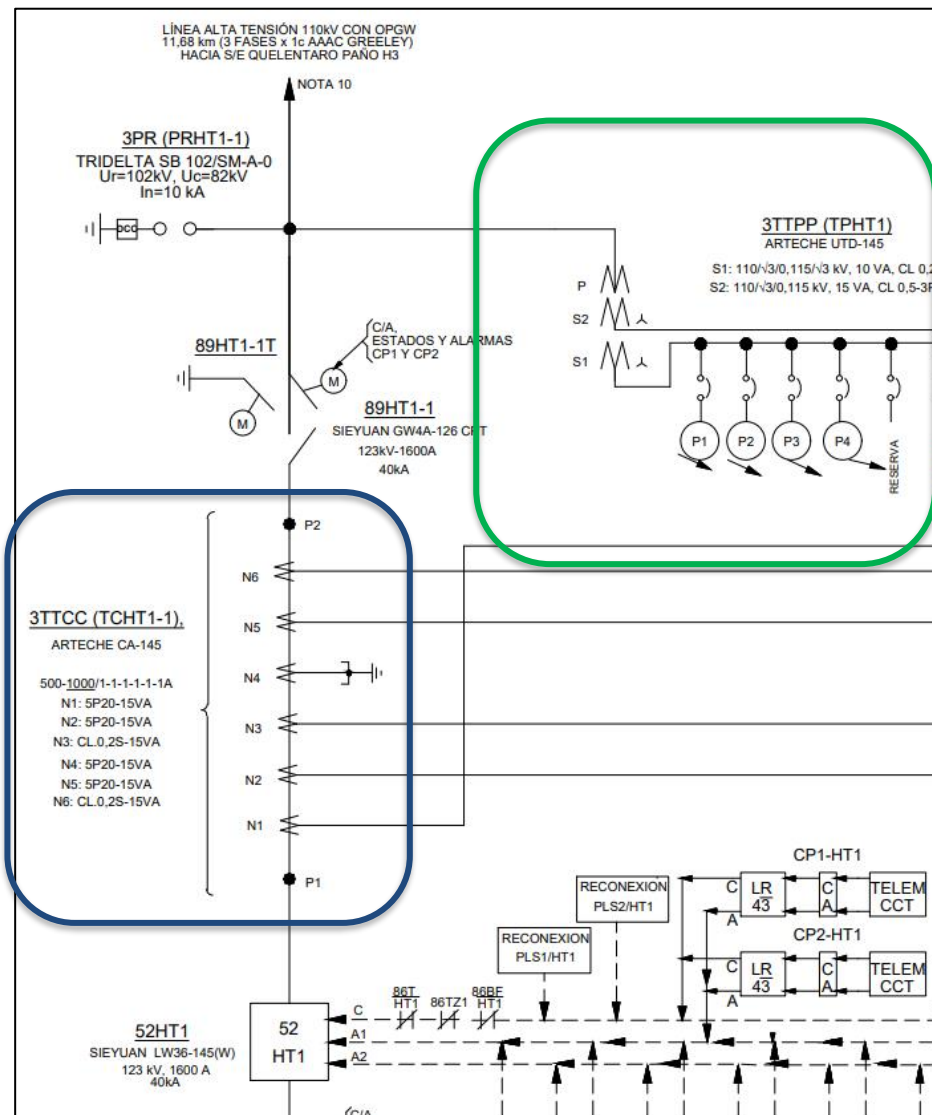


Figura 4.1 – Puntos de conexión a nivel planta en la S/E Cardonal



### 4.3 Registro 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 promedio de la planta durante los ensayos.

Las señales registradas fueron:

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

### 4.4 Metodología general de los ensayos

Para realizar los ensayos correspondientes al control primario de frecuencia se realizan cambios en la frecuencia vista por el control y también mediciones de la respuesta del sistema de control frente a las variaciones naturales de la frecuencia de la red.

El parque cuenta con una banda muerta ajustada de  $\pm 200$  mHz reducida de manera transitoria a  $\pm 25$  mHz durante los ensayos. En tanto, el estatismo se encuentra ajustado en un 5.0% tomando como valor base de potencia el despacho de potencia activa ajustado.

Los valores de banda muerta y estatismo no tienen limitaciones en su ajuste y no pueden ser modificados por el operador.



## 5 VERIFICACION DEL CONTROL PRIMARIO DE FRECUENCIA

El objetivo de estos ensayos es verificar la respuesta del controlador potencia/frecuencia del parque ante grandes y pequeñas variaciones de la frecuencia vista por el control, considerando los requerimientos definidos en la NT SSCC vigente, y teniendo en consideración su comportamiento para condición en estado normal y contingencia.

Considerando un bloque de reserva en función de la potencia máxima disponible, del estatismo configurado (5%), y los escalones a aplicar ( $\pm 0.2$  Hz y  $\pm 0.7$  Hz), se proponen los despachos de potencia activa mostrados en la Tabla 5.1 según la potencia máxima disponible del parque durante las pruebas. Esta última resultó ser de 40.0 MW.

Despacho de Potencia Activa	Despacho de potencia activa para escalón $\pm 0.2$ Hz [MW]	Despacho de potencia activa para escalón $\pm 0.7$ Hz [MW]
P1 <sub>CPF</sub>	6.8	11.0
P2 <sub>CPF</sub>	15.0	15.0
P3 <sub>CPF</sub>	22.0	20.0
P4 <sub>CPF</sub> <sup>1</sup>	40.0	32.0

Tabla 5.1 – Despachos de potencia activa en el POI para las pruebas CPF

Por último, se proponen pruebas adicionales en el despacho P2<sub>CPF</sub> con el fin de evaluar el umbral de activación de la banda muerta en su configuración actual de  $\pm 200$  mHz. Los escalones por aplicar son de  $\pm 0.2$  Hz y  $\pm 0.25$  Hz.

<sup>1</sup> Se ajusta el despacho de alta carga en base a la potencia disponible registrada.



## 5.1 Respuesta ante variaciones tipo escalón

A fin de verificar el cumplimiento de lo establecido por la Guía Técnica, se ensaya la respuesta de la central ante variaciones rápidas de la frecuencia vista por el control.

Cada uno de los ensayos se compone de dos (2) escalones de frecuencia; escalones de signo positivo y negativo de 0.2 Hz y 0.7 Hz.

Los ensayos se realizan en cada uno de los niveles de potencia definidos en las Tabla 5.1. Además, se considera la banda muerta en un ajuste modificado de  $\pm 25$  mHz para todos los estados de carga. De forma complementaria se considera su ajuste actual de  $\pm 200$  mHz para el estado de carga P2<sub>CPF</sub>.

Los escalones aplicados tienen una duración aproximada de 5 minutos, con el fin de evidenciar el correcto establecimiento de la central y que su aporte es sostenido en el tiempo, además de verificar el cumplimiento de la guía técnica. Para llevar a cabo estos ensayos, se fuerza un cambio de tipo escalón en la frecuencia vista por el control (FVC).

Para cada ensayo la figura muestra la señal de frecuencia simulada (FVC) y la respuesta en la potencia activa del parque eólico, ambas señales en color **verde**. Adicionalmente se grafica la banda muerta en su ajuste transitorio de  $\pm 25$  mHz (línea **roja** segmentada).

En base a lo presentado en las Figura 5.1 a Figura 5.16 se aprecia una respuesta estable y un aporte sostenido de la instalación frente a las desviaciones de frecuencia vistas por el control. El aporte de frecuencia corresponde a lo esperado en base al estatismo ajustado de 5% en base a la potencia despachada y una banda muerta de  $\pm 25$  mHz.

Respecto a la verificación del ajuste de banda muerta, la Figura 5.17 evidencia la nula respuesta de la potencia a nivel PPC ante un escalón de  $\pm 0.2$  Hz con una banda muerta configurada en  $\pm 0.2$  Hz. Como se logra apreciar, la potencia no varía ante el escalón ya que la perturbación realizada se encuentra dentro del rango de la banda muerta.

En tanto, en la Figura 5.18 se presenta un ensayo donde se realiza un escalón levemente mayor, de  $\pm 0.25$  Hz, manteniendo el mismo ajuste de la banda muerta ( $\pm 0.2$  Hz), se evidencia una variación de potencia activa de  $\pm 0.3$  MW, lo que concuerda con el estatismo ajustado de 5.0%. Lo anterior permite corroborar el correcto funcionamiento de la banda muerta.



## Despacho P1<sub>CPF</sub>

Las siguientes figuras presentan la respuesta de la central ante escalones en la frecuencia vista por el control.

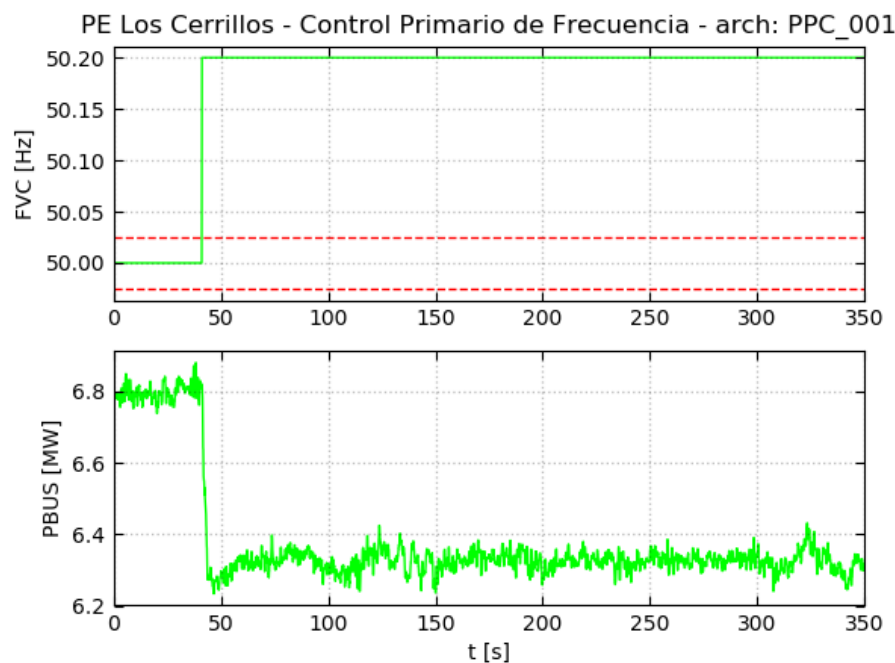


Figura 5.1 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.2 Hz – PELECo = 6.8 MW

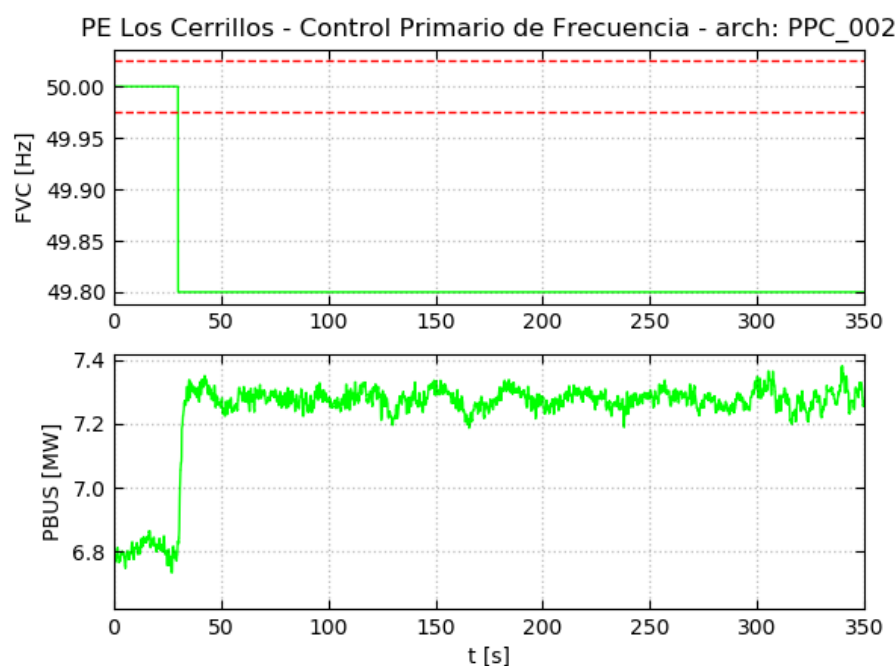


Figura 5.2 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 6.8 MW



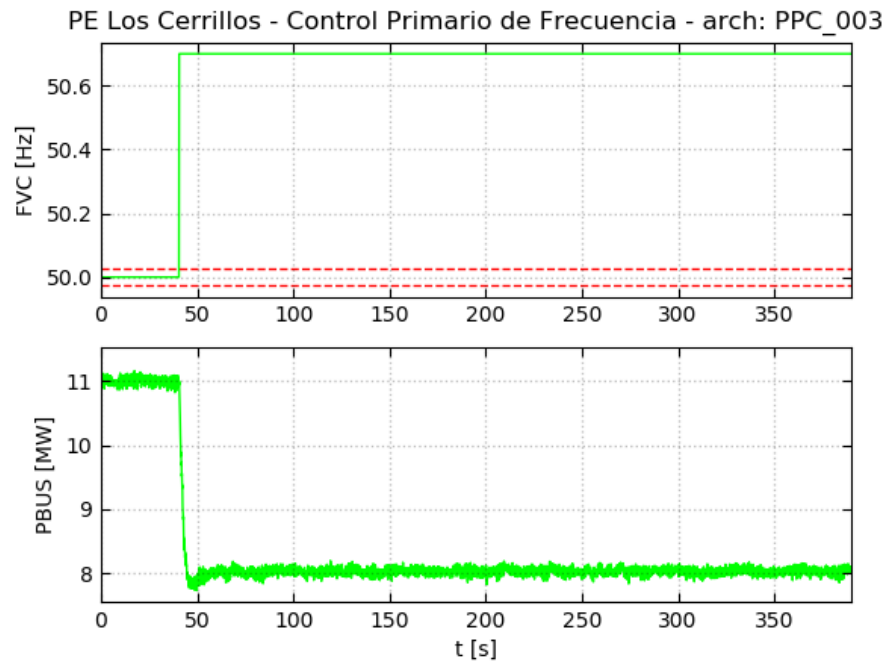


Figura 5.3 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.7 Hz – PELECo = 11.0 MW

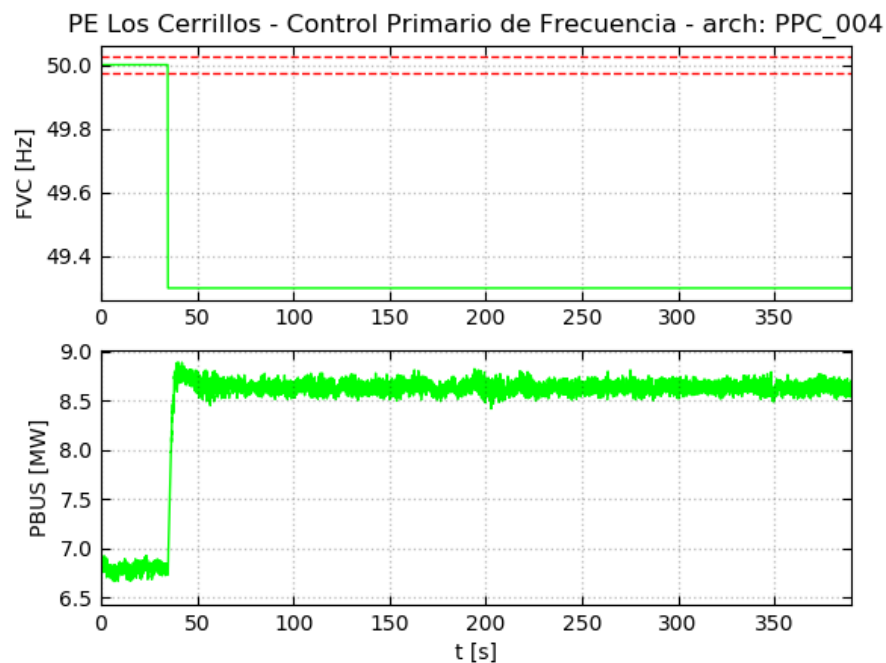


Figura 5.4 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.7 Hz – PELECo = 6.8 MW



## Despacho P2<sub>CPF</sub>

Las siguientes figuras presentan la respuesta de la central ante escalones en la frecuencia vista por el control.

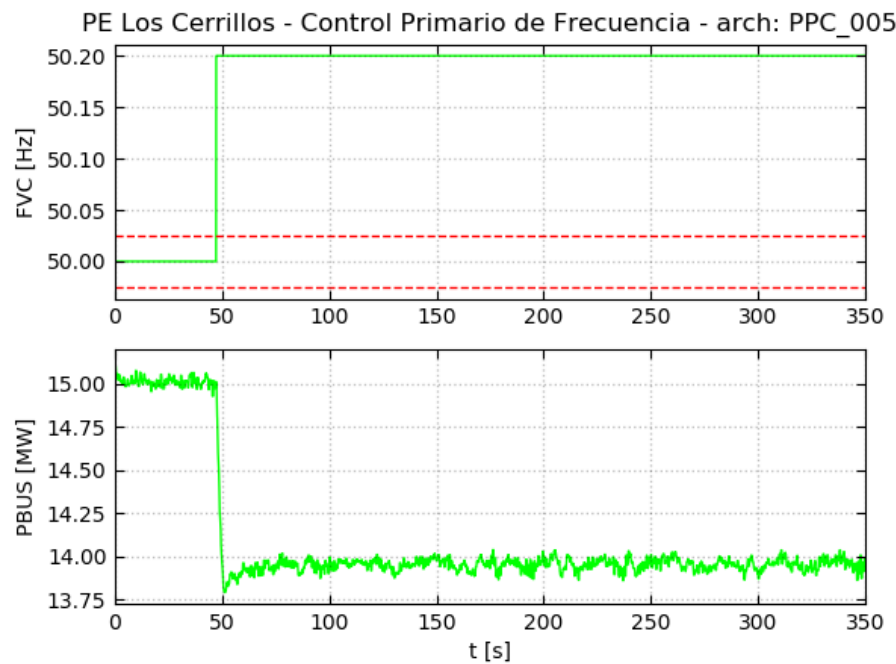


Figura 5.5 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.2 Hz – PELECo = 15.00 MW

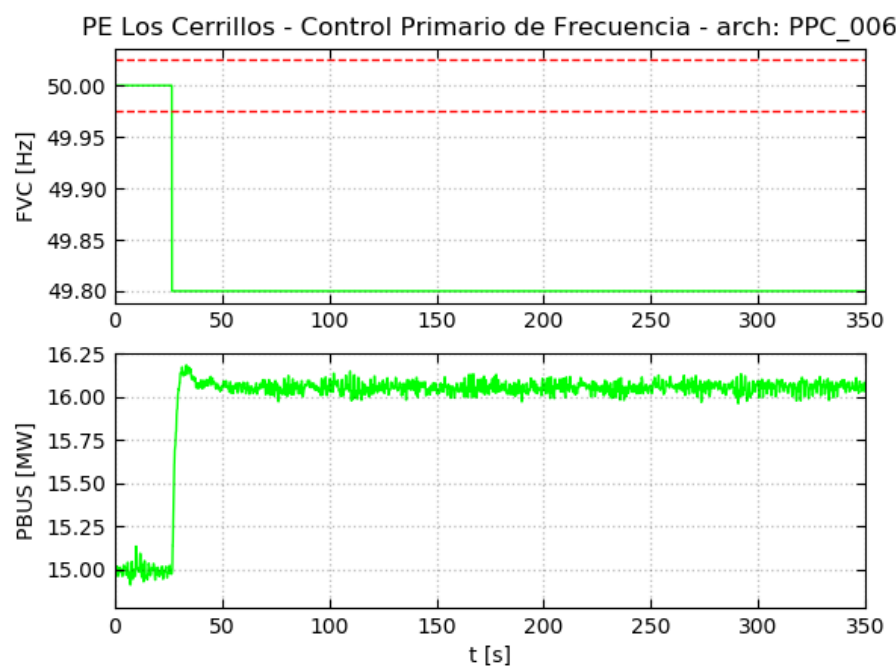


Figura 5.6 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 15.00 MW

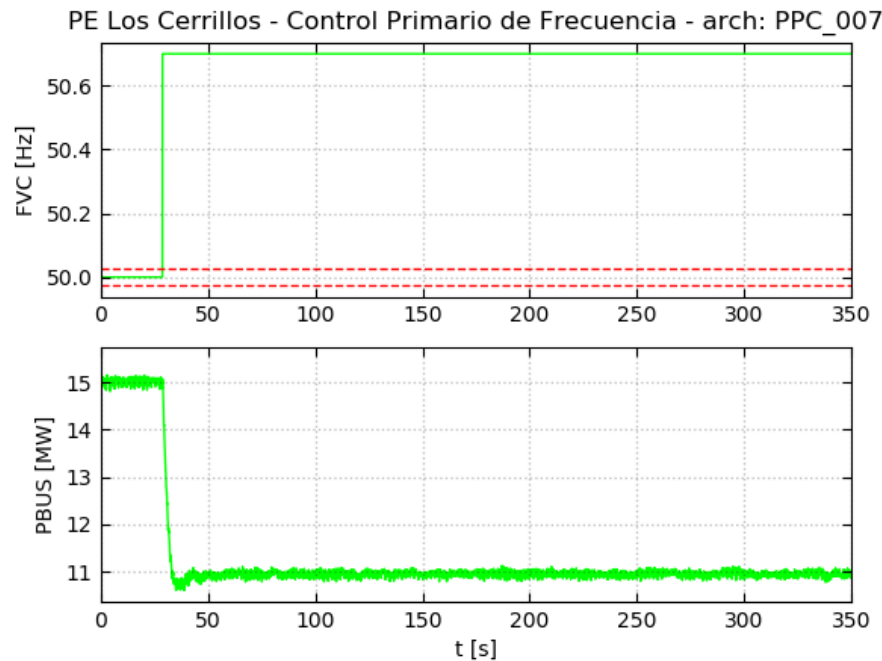


Figura 5.7 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.7 Hz – PELECo = 15.0 MW

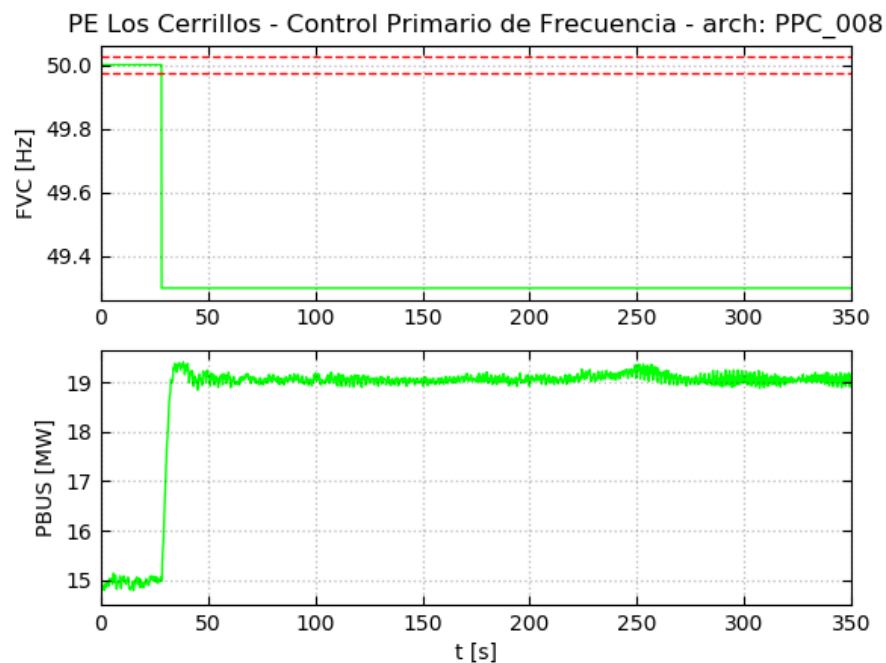


Figura 5.8 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.7 Hz – PELECo = 15.0 MW



## Despacho P3<sub>CPF</sub>

Las siguientes figuras presentan la respuesta de la central ante escalones en la frecuencia vista por el control.

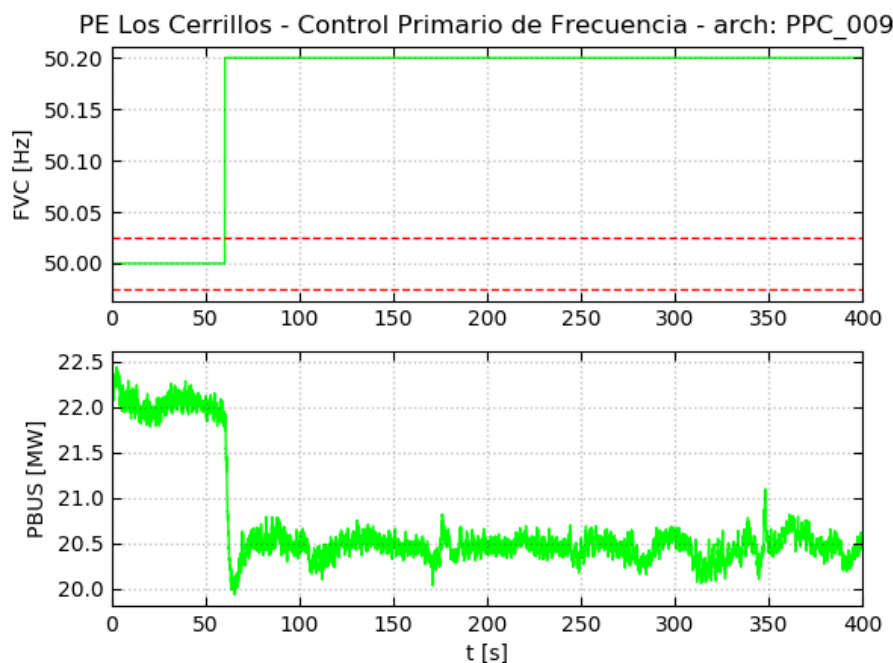


Figura 5.9 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.2 Hz – PELECo = 22.0 MW

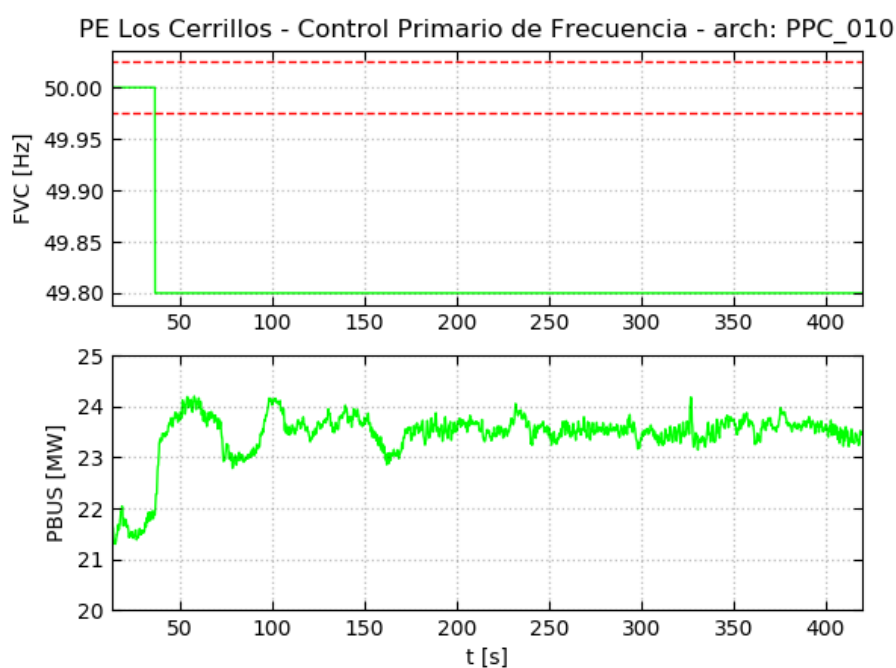


Figura 5.10 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 22.0 MW

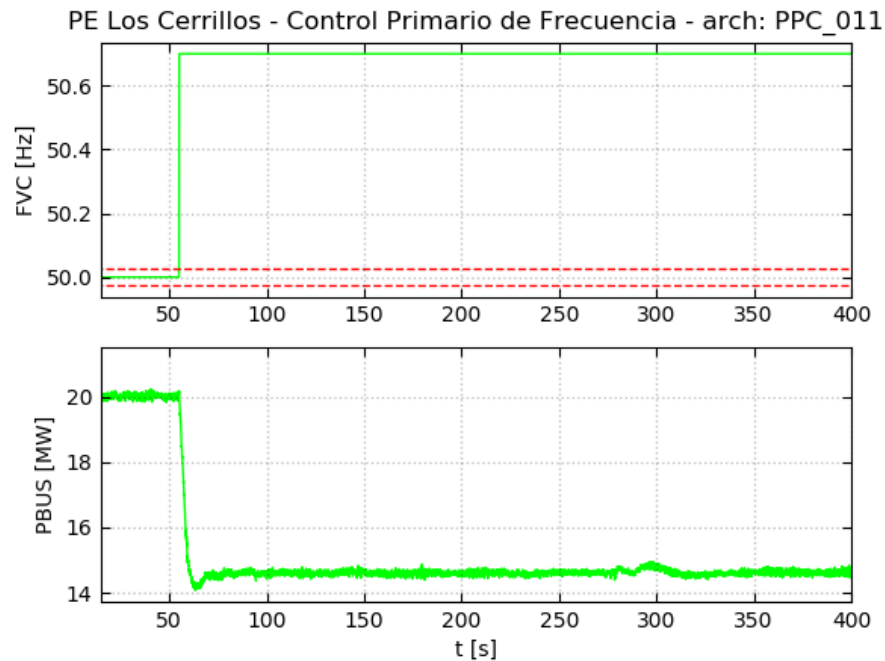


Figura 5.11 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.7 Hz – PELECo = 20.0 MW

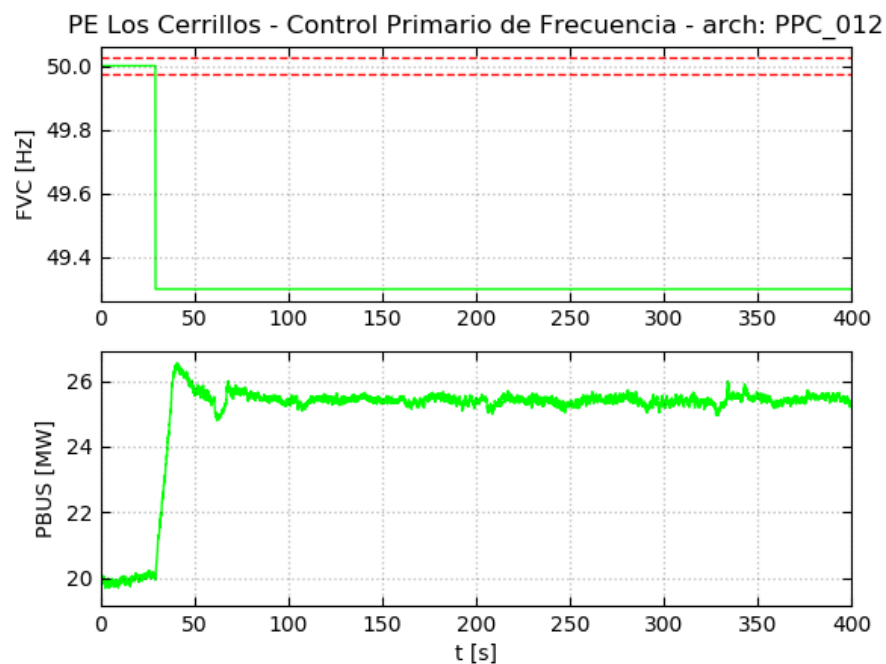


Figura 5.12 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.7 Hz – PELECo = 20.0 MW



## Despacho $P_{4_{CPF}}$

Las siguientes figuras presentan la respuesta de la central ante escalones en la frecuencia vista por el control.

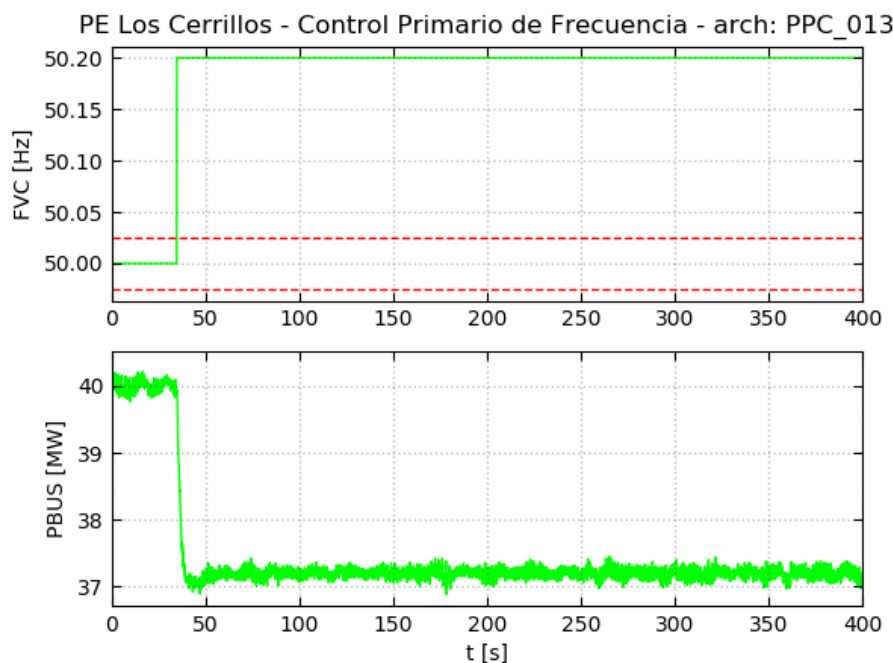


Figura 5.13 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.2 Hz – PELECo = 40.0 MW

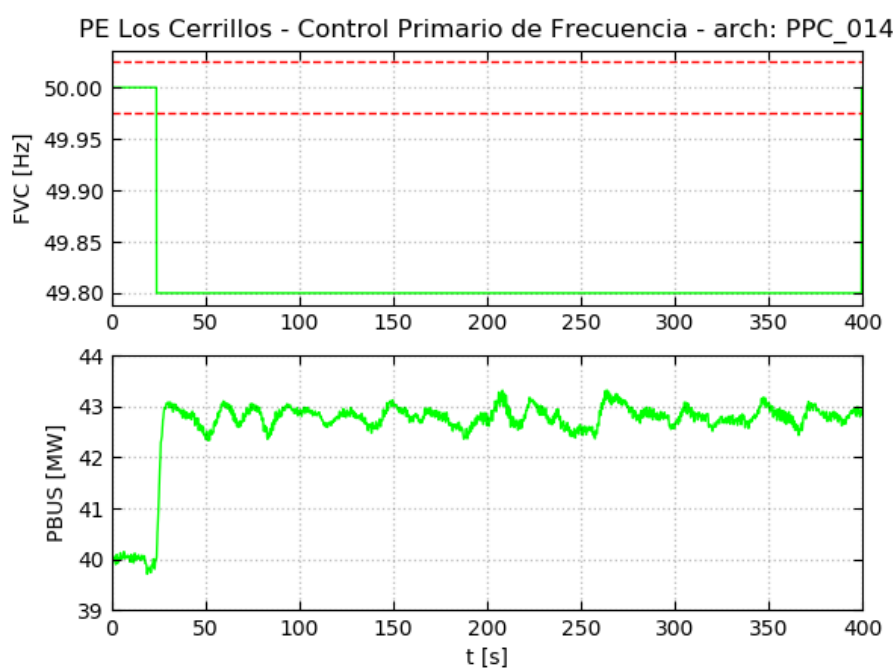


Figura 5.14 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 40.0 MW

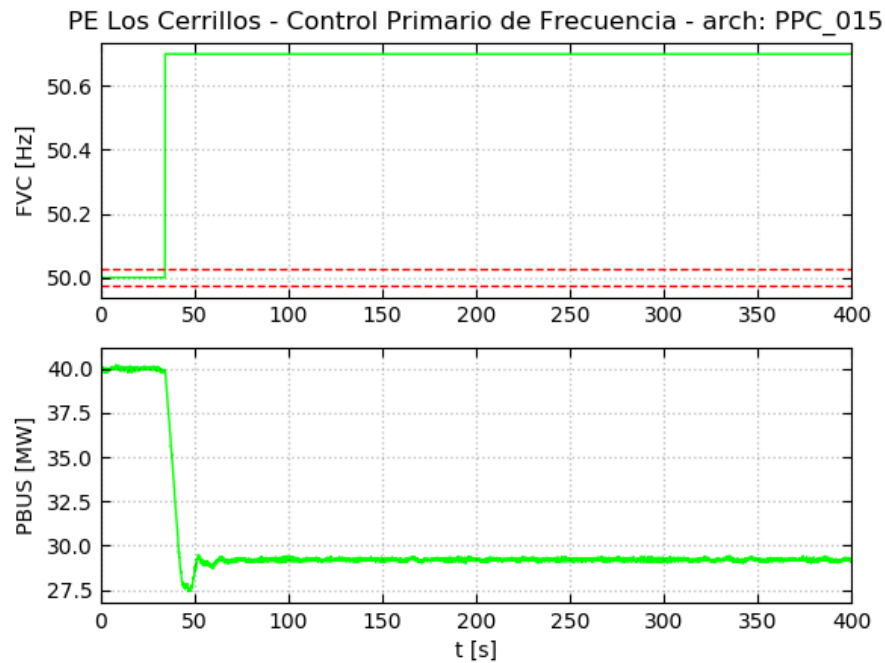


Figura 5.15 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.7 Hz – PELECo = 40.0 MW

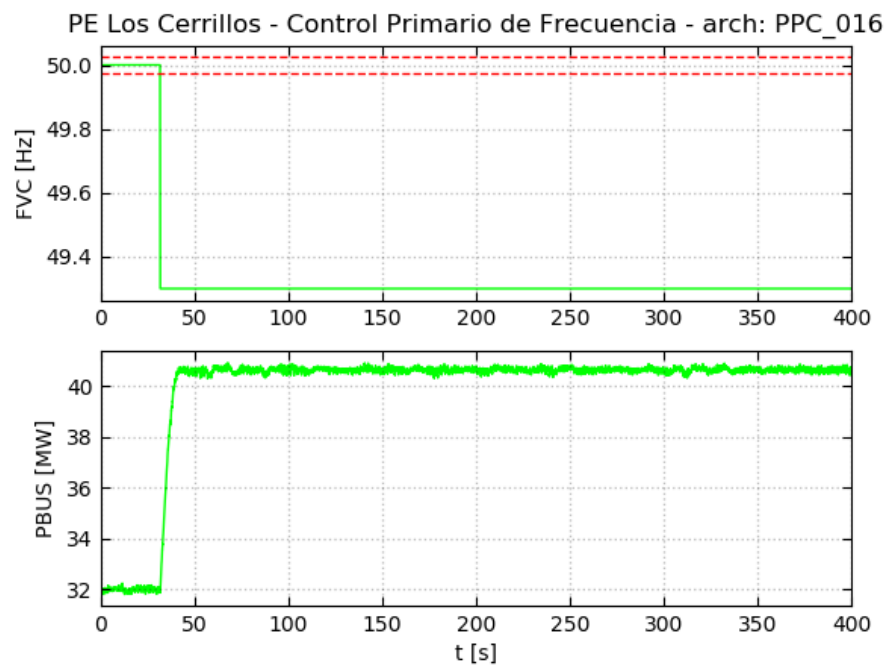


Figura 5.16 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.7 Hz – PELECo = 32.0 MW



## Despacho P2<sub>CPF</sub> – Banda muerta $\pm 200$ mHz

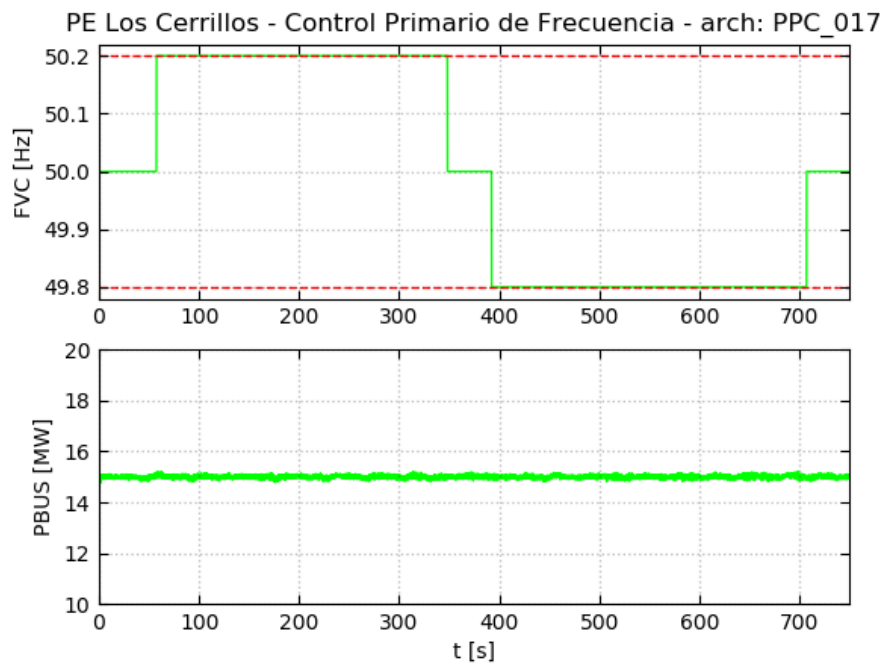


Figura 5.17 – Respuesta al escalón en FVC – Step =  $\pm 200$  mHz – PELECo = 15.0 MW

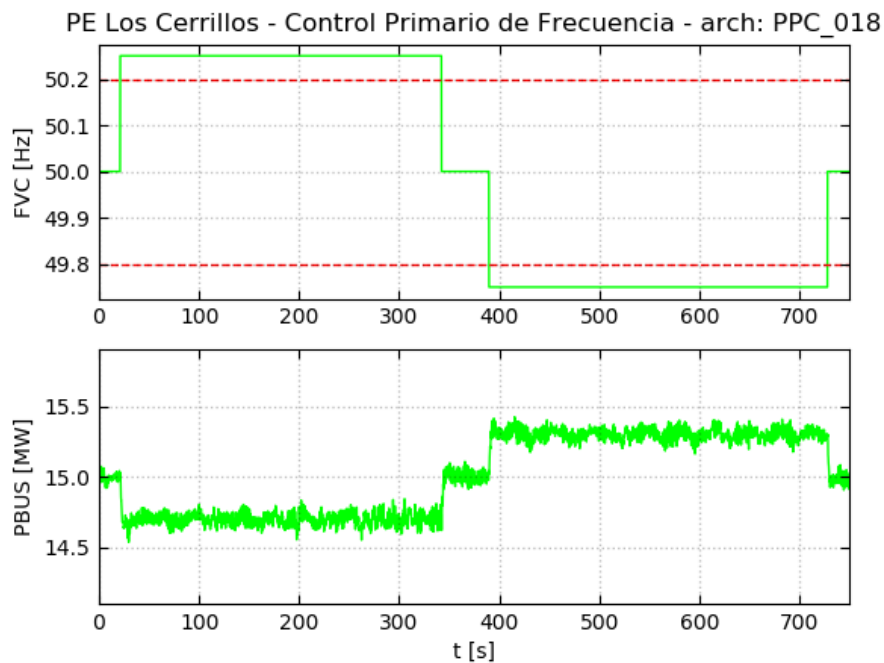


Figura 5.18 – Respuesta al escalón en FVC – Step =  $\pm 250$  mHz – PELECo = 15.0 MW





## 5.2 Respuesta ante variaciones normales de la frecuencia del SEN

Operando la central en cada uno de los niveles de potencia definidos en las Tabla 5.1 (correspondiente al escalón de  $\pm 0.2$  Hz), se realiza un registro de la respuesta del control primario de frecuencia ante variaciones naturales de la frecuencia de la red.

Las pruebas consisten en registrar la evolución de la potencia activa en función de la frecuencia real de la red durante un plazo estimado de 20 minutos. Durante estas pruebas se considera la banda muerta en su ajuste transitorio de  $\pm 25$  mHz (línea roja segmentada) y el estatismo en su valor actual de 5.0%.

Como se observa desde las Figura 5.19 a la Figura 5.22, el parque responde adecuadamente ante las variaciones naturales de la red en todos los estados de carga y se visualiza claramente el efecto espejo entre la frecuencia y la potencia activa verificando que la central es apta para la correcta prestación del Control Primario de Frecuencia.

**P1<sub>CPF</sub> = 6.8 MW**

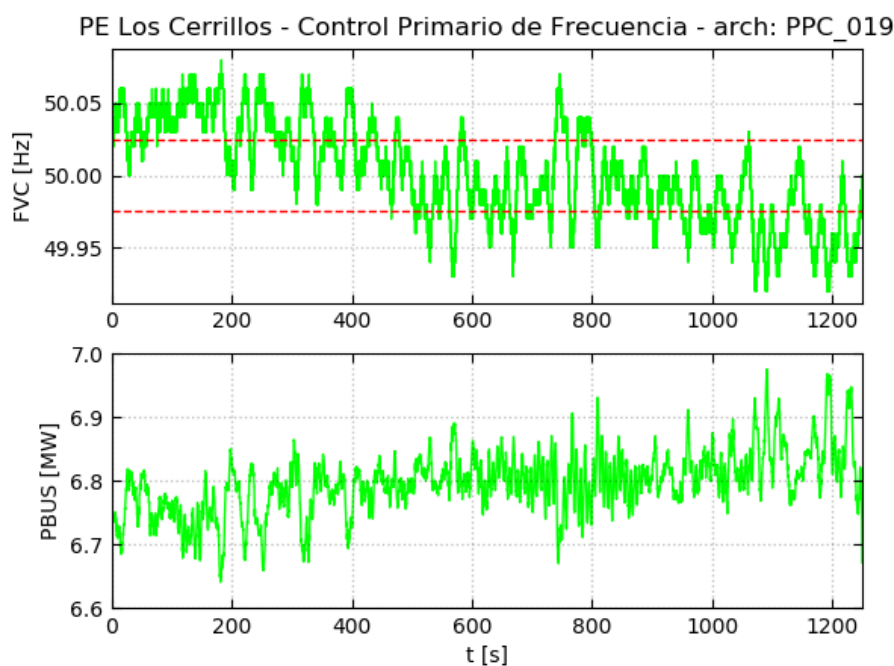


Figura 5.19 – Respuesta ante variaciones de la frecuencia de la red – P1<sub>CPF</sub>



$P2_{CPF} = 15.0 \text{ MW}$

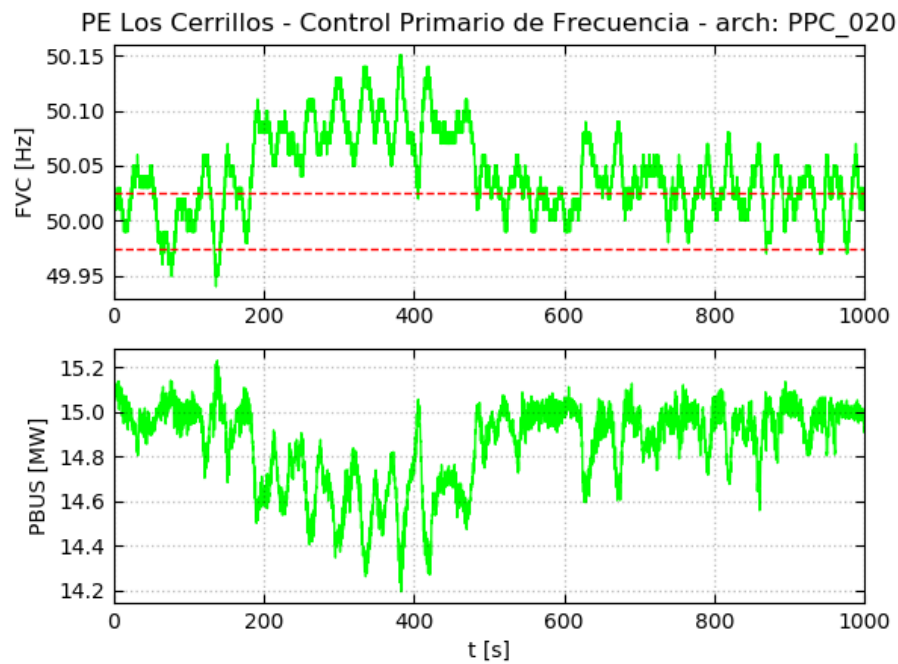


Figura 5.20 – Respuesta ante variaciones de la frecuencia de la red –  $P2_{CPF}$

$P3_{CPF} = 22.0 \text{ MW}$

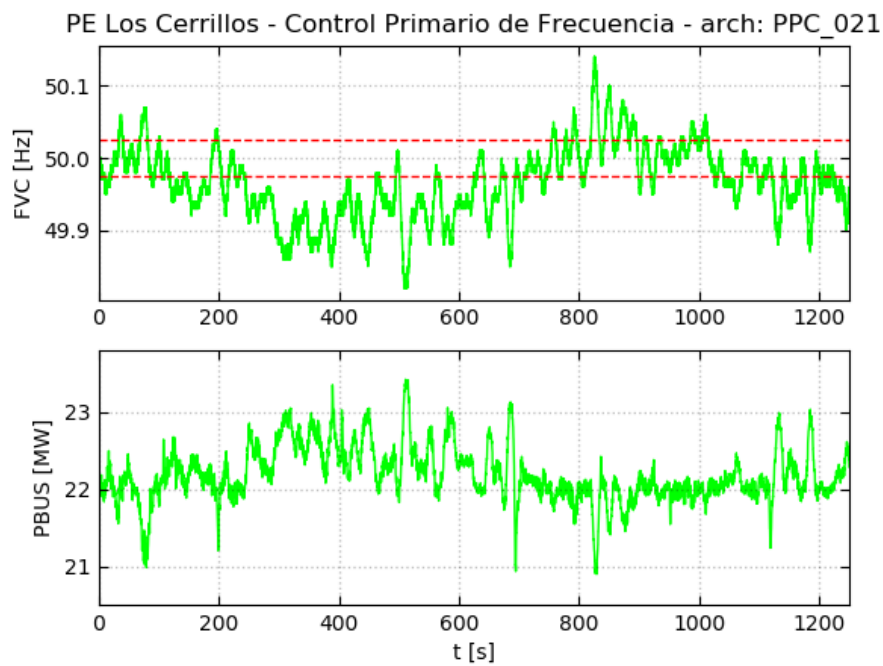


Figura 5.21 – Respuesta ante variaciones de la frecuencia de la red –  $P3_{CPF}$



$P_{4_{CPF}} = 40.0 \text{ MW}$

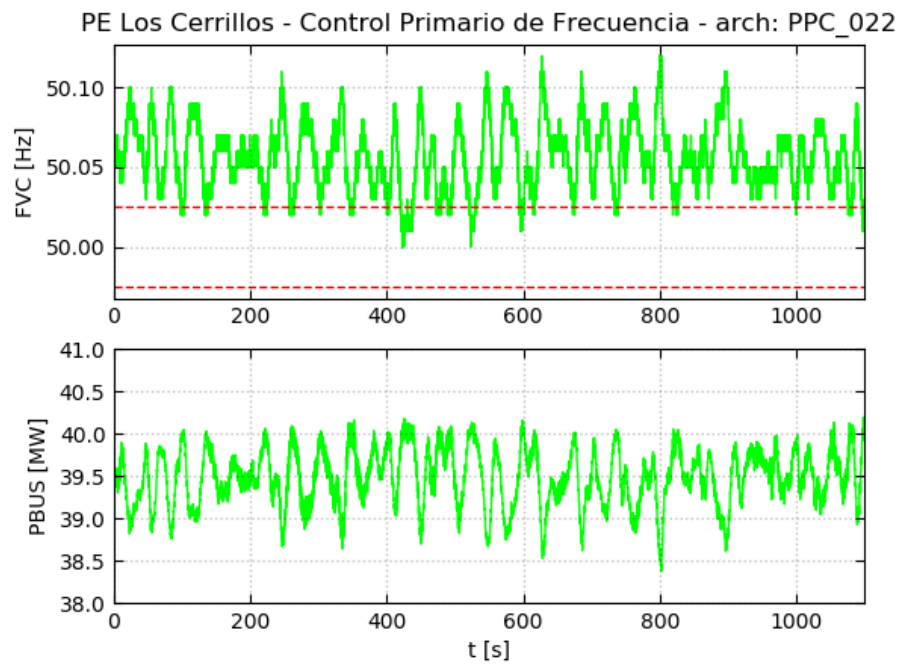


Figura 5.22 – Respuesta ante variaciones de la frecuencia de la red –  $P_{4_{CPF}}$

### 5.3 Análisis del control primario de frecuencia

Durante el desarrollo de los ensayos de respuesta al escalón (apartado 5.1) y de operación normal (apartado 5.2), con un valor de estadismo de 5%, se verificó que la respuesta del parque resulta acorde a lo esperado en cuanto a su respuesta cualitativa y aporte de potencia desarrollado.

#### 5.3.1 Análisis de ensayos de respuesta al escalón

A partir de las pruebas de escalón en la central (apartado 5.1), se calcula el estadismo para los escalones de  $\pm 0.2$  Hz, en el estado de carga  $P_{2CPF}$ .

En la Figura 5.23, se puede apreciar la respuesta del parque ante un escalón de  $+0.2$  Hz, en el estado de carga  $P_{2CPF}$ . A partir de la figura se calcula el valor del estadismo.

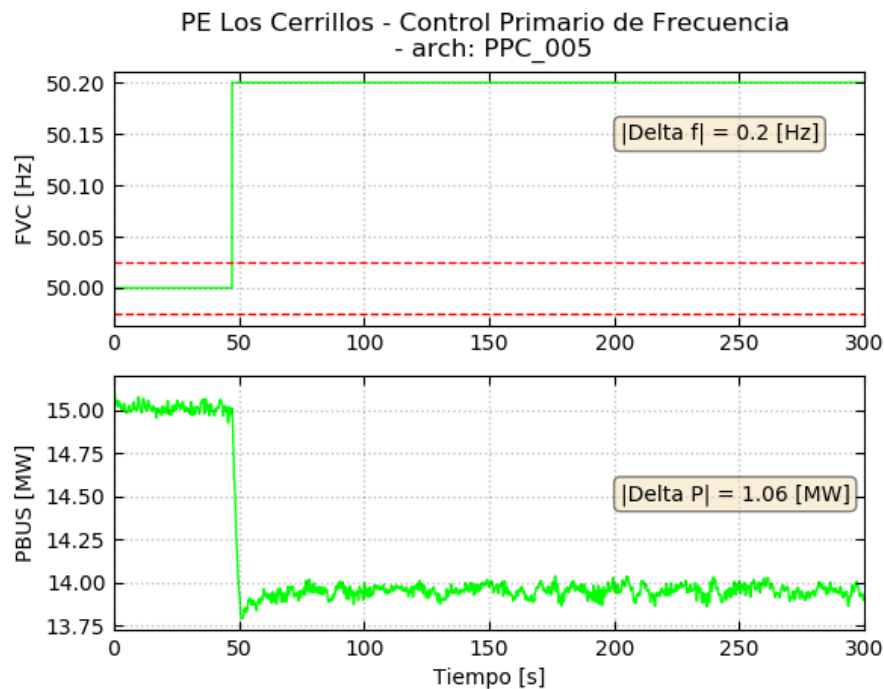


Figura 5.23 – Respuesta al escalón en FVC – Step =  $+0.2$  Hz – PELECo = 15.0 MW

El estadismo calculado, para una banda muerta (BM) de  $\pm 25$  mHz y una potencia consignada de 15.0 MW es:

$$\text{Estadismo} = \frac{\frac{\Delta F - BM}{F_{BASE}}}{\frac{\Delta P}{P_{BASE}}} = \frac{\frac{(0.2 - 0.025) \text{ Hz}}{50.0 \text{ Hz}}}{\frac{1.06 \text{ MW}}{15.0 \text{ MW}}} = 5.0\%$$



En la Figura 5.24, se puede apreciar la respuesta del parque ante un escalón de -0.2 Hz, en el estado de carga P2<sub>CPF</sub>. A partir de la figura se calcula el valor del estatismo.

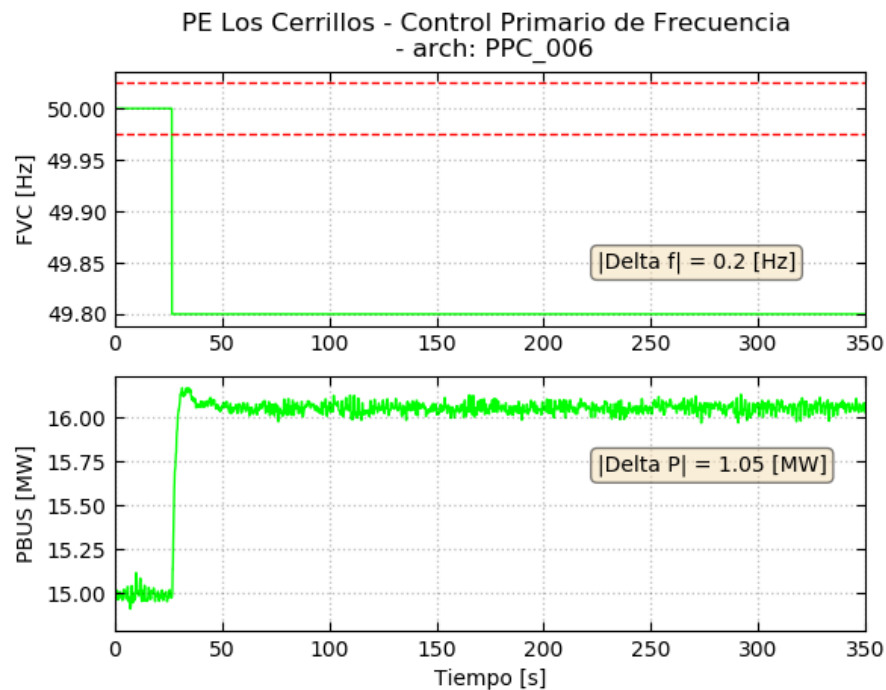


Figura 5.24 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 15.0 MW

El estatismo calculado, para una banda muerta (BM) de  $\pm 25$  mHz y una potencia consignada de 15.0 MW es:

$$\text{Estatismo} = \frac{\frac{\Delta F - BM}{F_{BASE}}}{\frac{\Delta P}{P_{BASE}}} = \frac{\frac{(0.2 - 0.025) \text{ Hz}}{50.0 \text{ Hz}}}{\frac{1.05 \text{ MW}}{15.0 \text{ MW}}} = 5.0\%$$



### 5.3.2 Análisis de ensayos de variaciones normales de la frecuencia del SEN

El control de carga/velocidad responde a un estatismo de 5.0% y fue configurado transitoriamente con una banda muerta de  $\pm 25$  mHz para el registro de variaciones naturales de la frecuencia de la red. A los efectos de comprobar experimentalmente estos valores se grafica la relación Potencia Activa vs. Frecuencia Eléctrica.

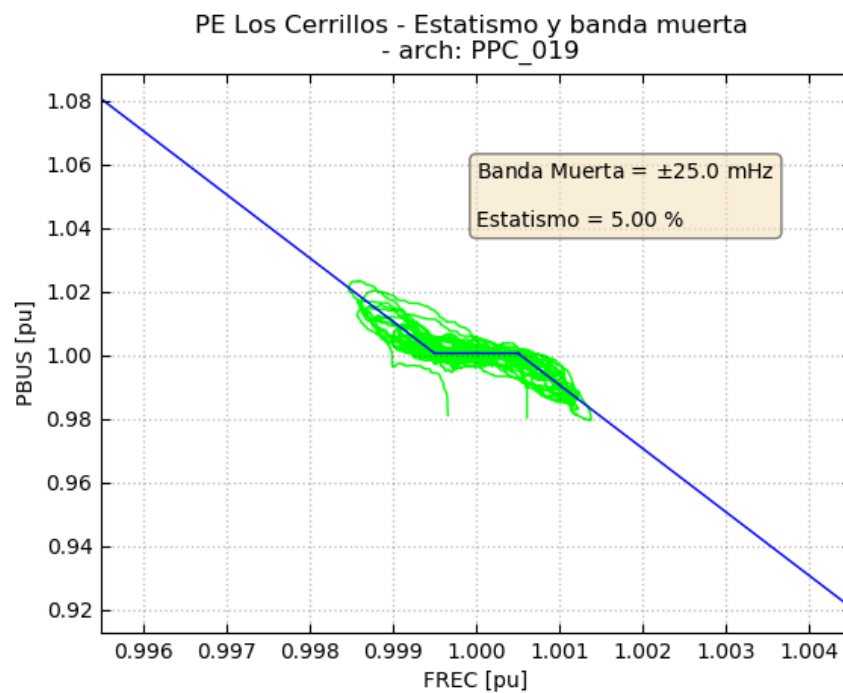


Figura 5.25 – Determinación de banda muerta y estatismo – PELECo = 6.8 MW

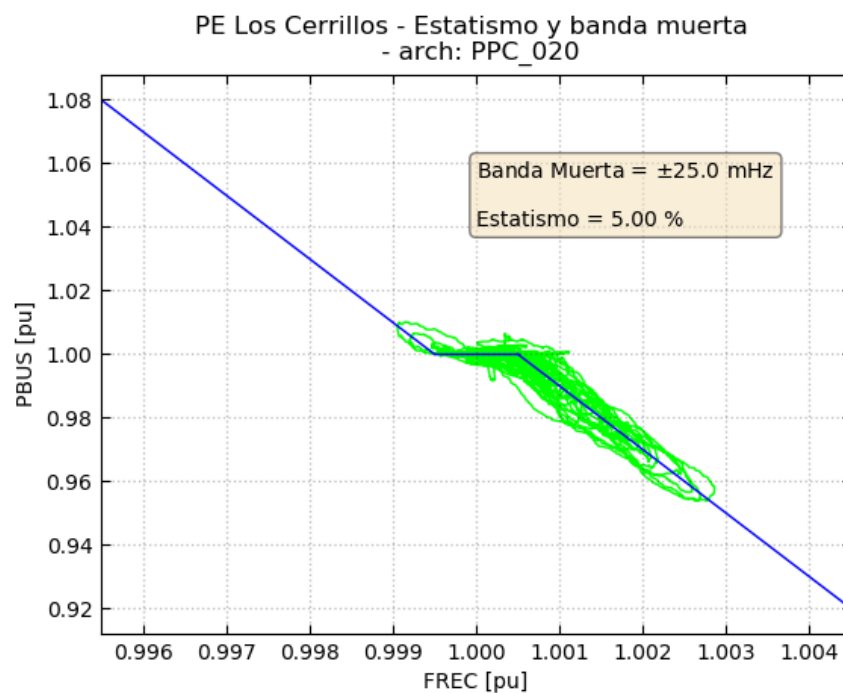


Figura 5.26 – Determinación de banda muerta y estatismo – PELECo = 15.0 MW

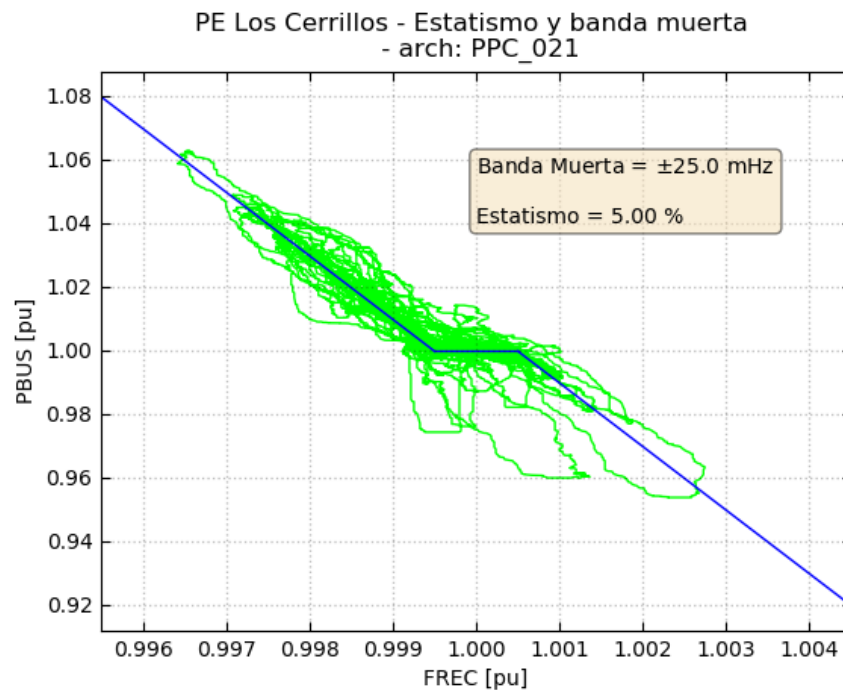


Figura 5.27 – Determinación de banda muerta y estatismo – PELECo = 22.0 MW

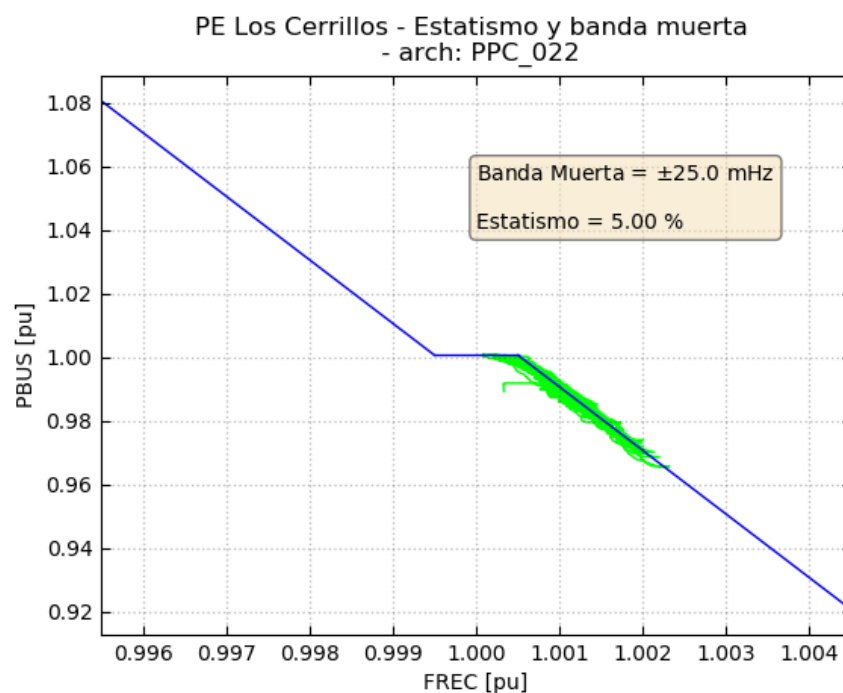


Figura 5.28 – Determinación de banda muerta y estatismo – PELECo = 40.0 MW



Como se puede apreciar en las figuras presentadas a partir de los registros experimentales, en color **verde** se visualiza la relación potencia activa vs. frecuencia eléctrica registrada durante los ensayos que permite evidenciar la real banda muerta y estatismo del parque actualmente implementada.

Cabe aclarar que se trazó una línea de color **azul** con estatismo de 5.0% y banda muerta de  $\pm 25$  mHz a modo de referencia de la característica esperada.





### 5.3.3 Determinación del retardo inicial y tiempo de establecimiento

A partir de las pruebas de escalón en la central (apartado 5.1), se calcula el tiempo total de activación y el tiempo de establecimiento para los escalones de  $\pm 0.2$  Hz, en el estado de carga P2<sub>CPF</sub>.

En los registros mostrados a continuación se puede apreciar que la central responde a un escalón de frecuencia según el estatismo configurado. Adicionalmente, se presentan los parámetros de tiempo de inicio de activación, tiempo total de activación y tiempo de establecimiento que caracterizan al sistema carga/velocidad.

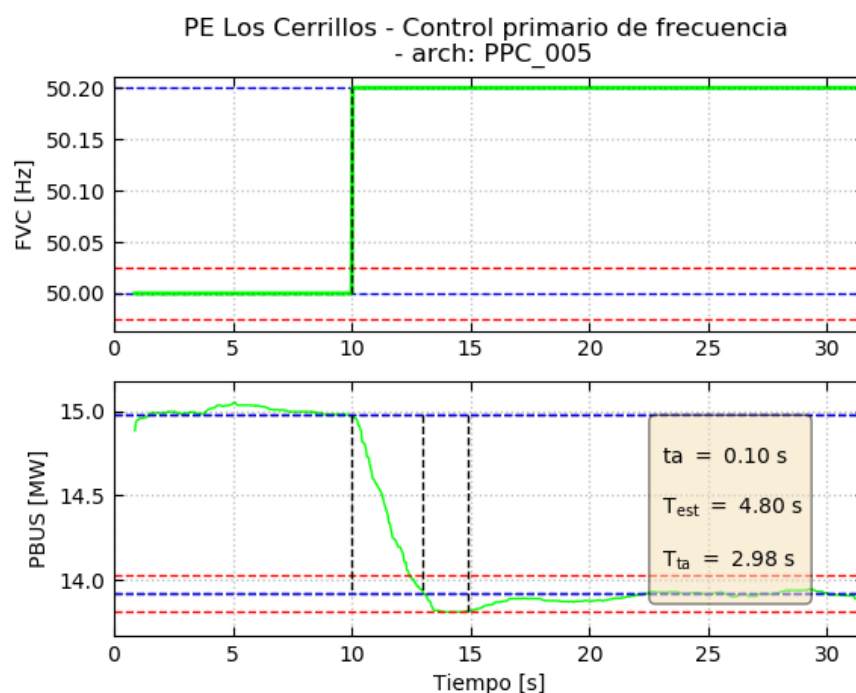


Figura 5.29 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.2 Hz – PELECo = 15.0 MW

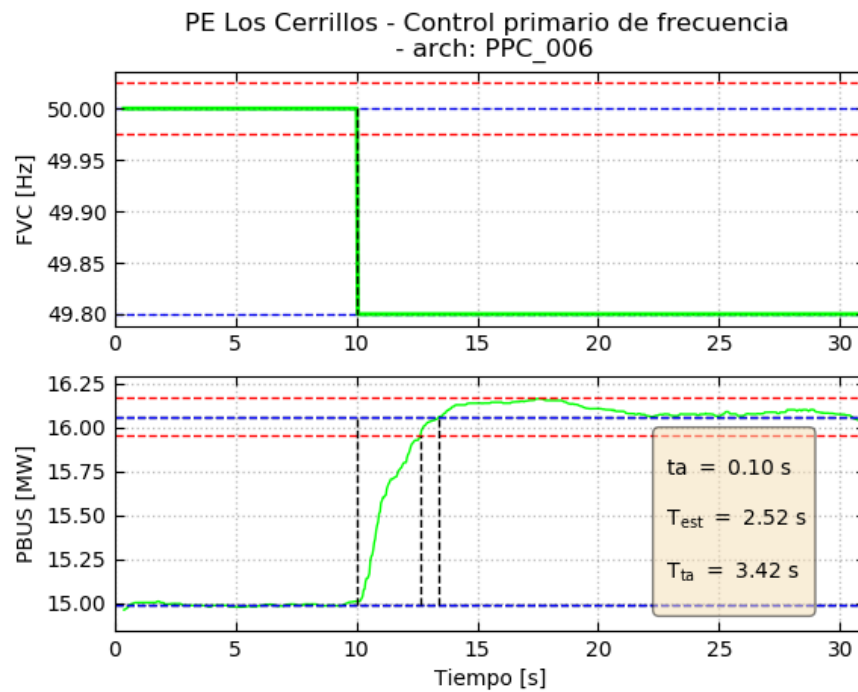


Figura 5.30 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.2 Hz – PELECo = 15.0 MW

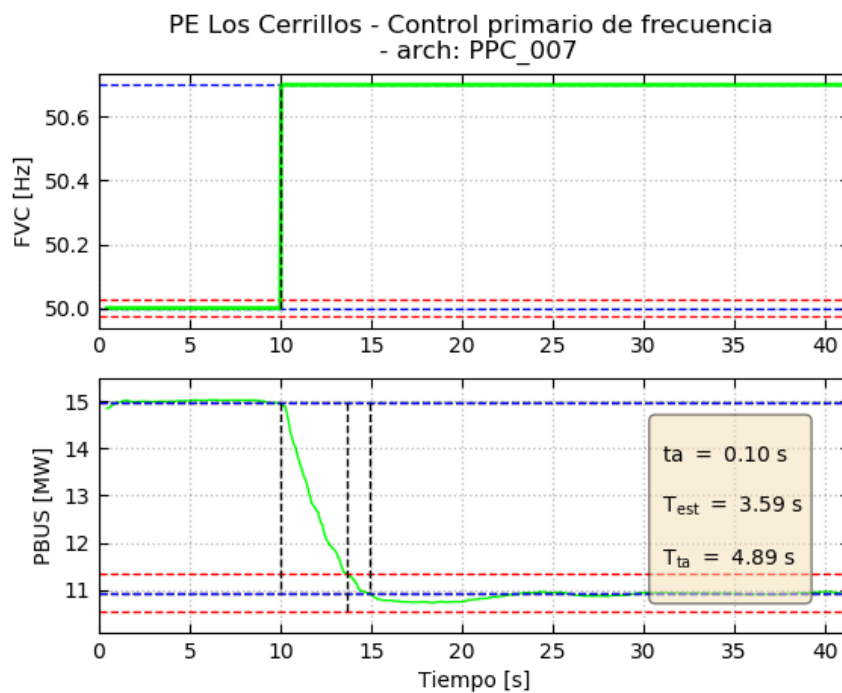


Figura 5.31 – Respuesta al escalón en FVC – Step = +0.7 Hz – PELECo = 15.0 MW

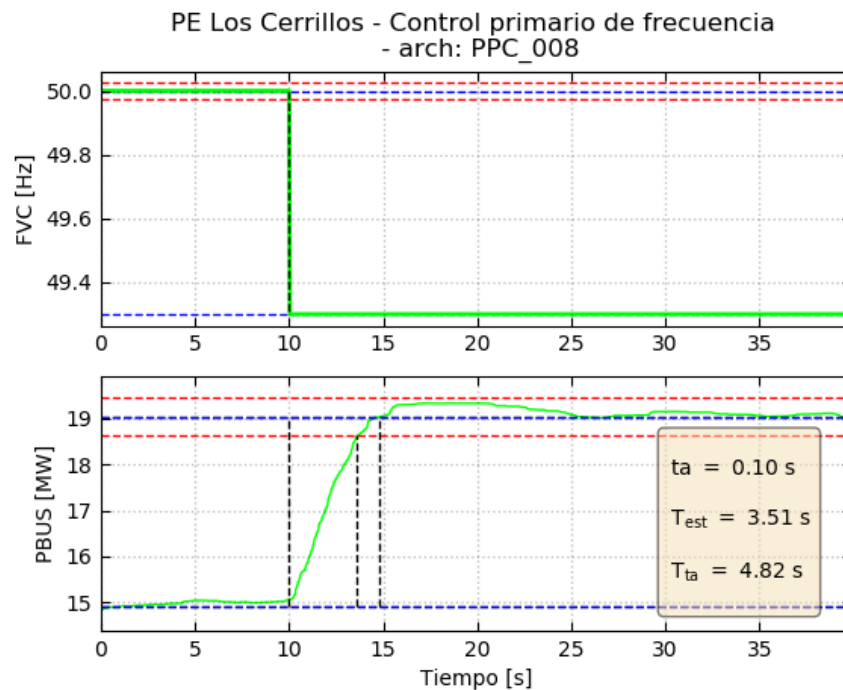


Figura 5.32 – Respuesta al escalón en FVC – Step = -0.7 Hz – PELECo = 15.0 MW

Se observa desde la Figura 5.29 a la Figura 5.32 que la respuesta de potencia activa ante cambios de tipo escalón en la frecuencia vista por el controlador es rápida y estable.

### 5.3.4 Resumen de aportes

Se presenta en la Tabla 5.2 los valores de potencia aportados en 1 segundo, 10 segundos y 5 minutos, ante determinados escalones de frecuencia aplicados sobre la referencia vista por el controlador de planta, con un estatismo de 5.0%.



Parque Eólico Los Cerrillos - Tabla resumen de aportes con estadismo 5.0%												
Punto de despacho	$\Delta f$ aplicado [Hz]	Aporte esperado teórico [MW]	Potencia inicial real [MW]	Potencia final (1 s) [MW]	Aporte efectivo (1 s) [MW]	% del aporte logrado	Potencia final (10 s) [MW]	Aporte efectivo (10 s) [MW]	% del aporte logrado	Potencia final (5 min) [MW]	Aporte efectivo (5 min) [MW]	% del aporte logrado
P1_CPF	0.2	-0.48	6.79	6.53	-0.26	55%	6.30	-0.49	103%	6.32	-0.47	99%
P1_CPF	-0.2	0.48	6.80	7.03	0.23	48%	7.30	0.5	105%	7.28	0.48	101%
P1_CPF	0.7	-2.97	10.99	9.93	-1.06	36%	7.91	-3.08	104%	8.02	-2.97	100%
P1_CPF	-0.7	1.83	6.79	7.40	0.61	33%	8.74	1.95	106%	8.63	1.84	100%
P2_CPF	0.2	-1.05	15.01	14.58	-0.43	41%	13.90	-1.11	106%	13.944	-1.07	101%
P2_CPF	-0.2	1.05	14.99	15.51	0.52	50%	16.1	1.11	106%	16.04	1.05	100%
P2_CPF	0.7	-4.05	15.00	13.77	-1.23	30%	10.75	-4.25	105%	10.92	-4.08	101%
P2_CPF	-0.7	4.04	14.95	15.84	0.89	22%	19.31	4.36	108%	19.05	4.1	102%
P3_CPF	0.2	-1.54	22.03	21.28	-0.75	49%	20.39	-1.64	106%	20.46	-1.57	102%
P3_CPF	-0.2	1.55	22.12	22.64	0.52	34%	23.72	1.6	103%	23.66	1.54	99%
P3_CPF	0.7	-5.40	20.00	18.95	-1.05	19%	14.2	-5.8	107%	14.60	-5.4	100%
P3_CPF	-0.7	5.39	19.95	20.73	0.78	14%	25.7	5.75	107%	25.55	5.6	104%
P4_CPF	0.2	-2.80	40.00	38.94	-1.06	38%	37.05	-2.95	105%	37.22	-2.78	99%
P4_CPF	-0.2	2.80	39.98	40.80	0.82	29%	42.89	2.91	104%	42.81	2.83	101%
P4_CPF	0.7	-10.79	39.98	38.80	-1.18	11%	27.77	-12.21	113%	29.17	-10.81	100%
P4_CPF	-0.7	8.64	31.99	33.31	1.32	15%	40.49	8.5	98%	40.62	8.63	100%

Tabla 5.2 – Resumen de aportes de potencia – BM  $\pm 25$  mHz – Estadismo 5.0%



## 6 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 SSCC*" vigente.

En lo que respecta al ***SSCC de Control Primario de Frecuencia*** y en función de los ensayos realizados puede concluirse que:

- Mediante ensayos de respuesta al escalón se comprueba el correcto desempeño dinámico del control primario de frecuencia de la planta.
- Adicionalmente, se ha verificado el correcto desempeño de la regulación primaria de frecuencia frente a variaciones naturales de la frecuencia de la red.
- El parque cuenta con un estatismo ajustado de 5.0% y una banda muerta de  $\pm 200$  mHz. Cabe destacar que el valor de banda muerta es ajustado transitoriamente a  $\pm 25$  mHz para el desarrollo de las pruebas.
- De forma complementaria, se evalúa el ajuste de banda muerta del sistema de control.
- Se estiman los tiempos de inicio de activación, tiempo total de activación y tiempo de establecimiento del parque eólico ante escalones positivos y negativos de frecuencia.
- Se han comprobado satisfactoriamente los valores de estatismo y banda muerta ajustados mediante el análisis de los ensayos realizados.
- La banda muerta y estatismo no pueden ser modificados por el operador del parque eólico y no existen limitaciones para su ajuste.



## 7 ANEXOS

### 7.1 Medidas complementarias

Se presentan las condiciones de viento durante el desarrollo de los ensayos.

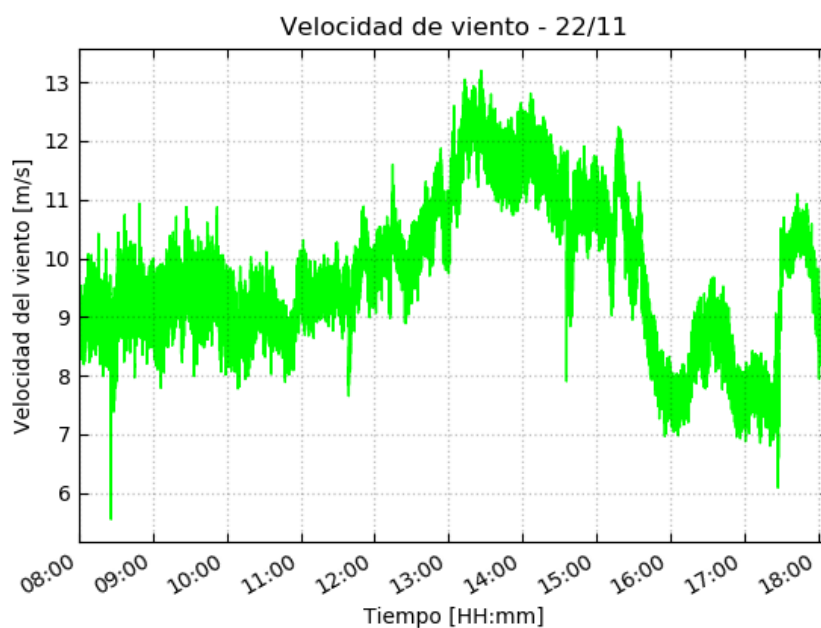


Figura 7.1 – Velocidad del viento durante los ensayos

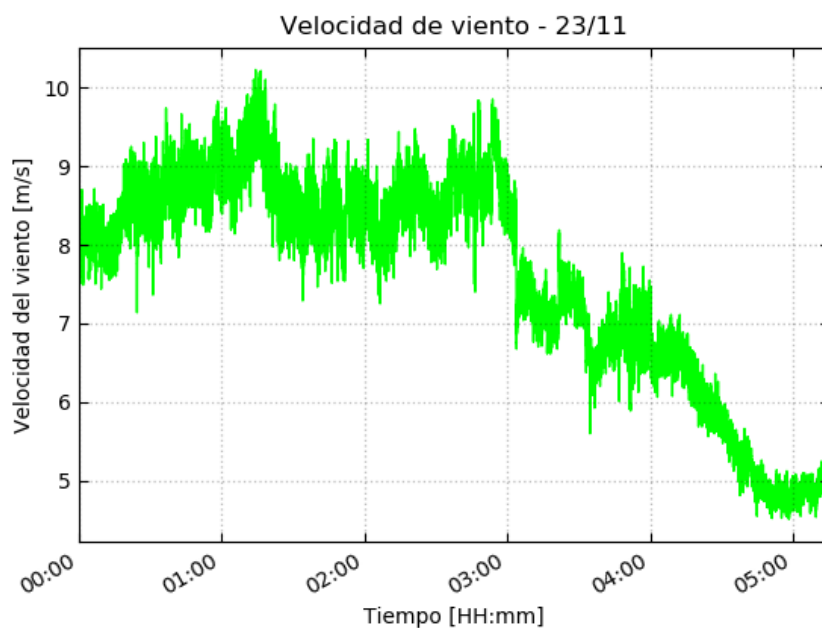
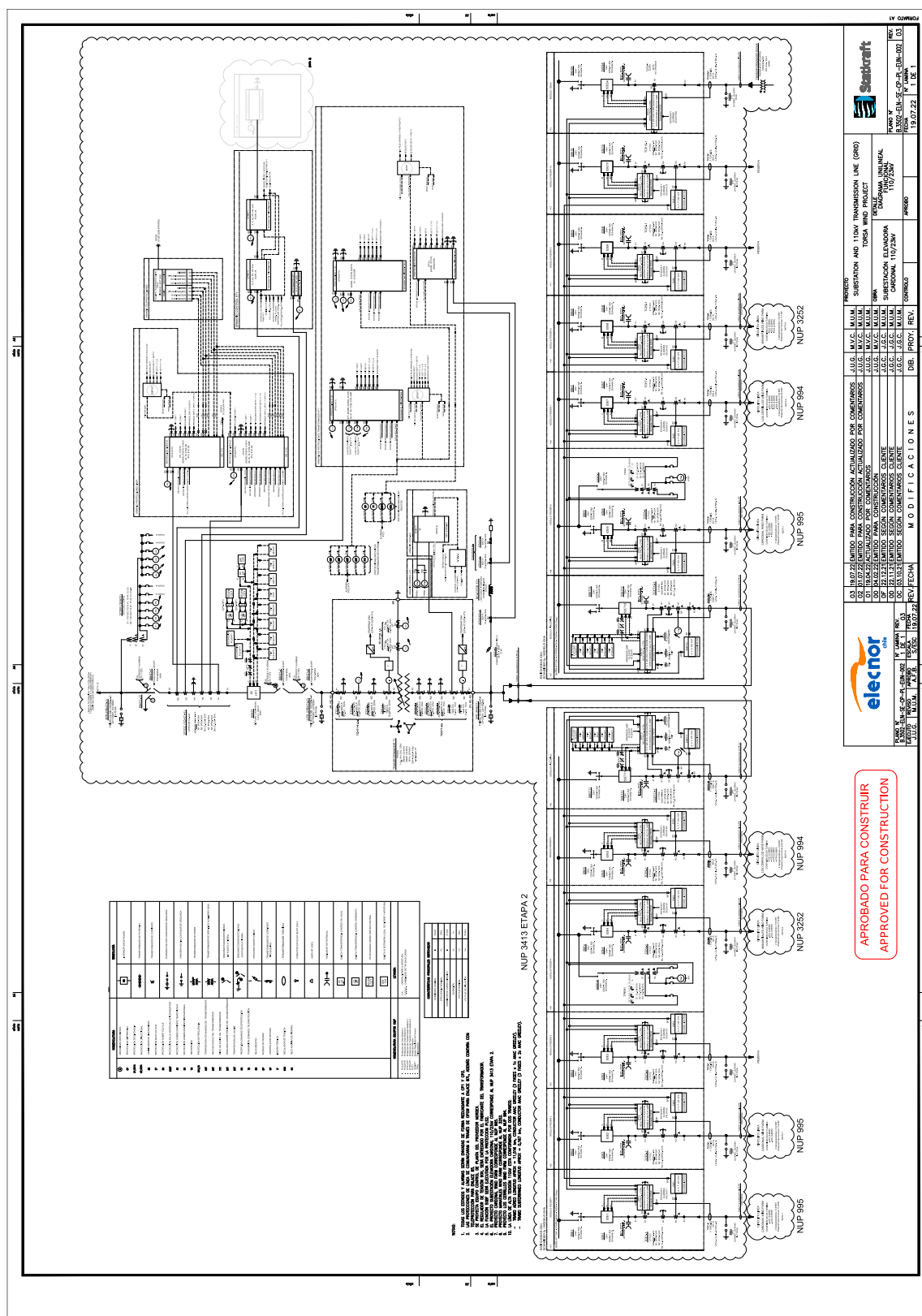


Figura 7.2 – Velocidad del viento durante los ensayos

## 7.2 Diagrama unilineal



*Figura 7.3 – Unilineal general de planta*





### 7.3 Homologación de ensayos



Figura 7.4 – Aprobación del CEN sobre la homologación de ensayos

### 7.4 Archivos adjuntos entregados

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

- Registros de ensayos: ***"EE-EN-2024-2006-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 - Control Primario de Frecuencia	
Nombre	Descripción
PPC_001	Step +0.2 Hz - P1
PPC_002	Step -0.2 Hz - P1
PPC_003	Step +0.7 Hz - P1
PPC_004	Step -0.7 Hz - P1
PPC_005	Step +0.2 Hz - P2
PPC_006	Step -0.2 Hz - P2
PPC_007	Step +0.7 Hz - P2
PPC_008	Step -0.7 Hz - P2
PPC_009	Step +0.2 Hz - P3
PPC_010	Step -0.2 Hz - P3
PPC_011	Step +0.7 Hz - P3
PPC_012	Step -0.7 Hz - P3
PPC_013	Step +0.2 Hz - P4
PPC_014	Step -0.2 Hz - P4
PPC_015	Step +0.7 Hz - P4
PPC_016	Step -0.7 Hz - P4

Tabla 7.1 – Registros de pruebas

Ensayos - Control Primario de Frecuencia – Verificación banda muerta	
Nombre	Descripción
PPC_017	Step $\pm 0.2$ Hz - P2
PPC_018	Step $\pm 0.25$ Hz - P2

Tabla 7.2 – Registros de pruebas – Verificación banda muerta

Ensayos - Control Primario de Frecuencia – Registro de red	
Nombre	Descripción
PPC_019	P1
PPC_020	P2
PPC_021	P3
PPC_022	P4

Tabla 7.3 – Registros de pruebas – Registros de red



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

*Tabla 7.4 – Registro de datos ambientales*



## 7.5 Acta de pruebas SSSC



<b>ESTUDIOS ELECTRICOS</b> 			
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS			
<b>ACTA DE PRUEBAS</b>			
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> <ul style="list-style-type: none"><li>- Control de Tensión (CT)</li><li>- Control Primario de Frecuencia (CPF)</li><li>- Control Terciario de Frecuencia en giro (CTFg)</li></ul>		
<b>Datos de la instalación</b>			
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		
<b>Responsables durante las pruebas</b>			
Coordinado	Marcelo Santibañez	Representante Statkraft en las pruebas	
Equipo Experto Técnico	Marcelo Calviz	Equipo Experto Técnico	
<b>Datos de las pruebas</b>			
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_SSSC_PE_Los_Cerrillos		
<b>Firmas</b> Aclaración/Empresa	<b>Marcelo Santibañez</b> Coordinado	Digitally signed by Marcelo Santibañez; Date: 2024.12.02 13:17:45 -03'00'	 Marcelo Calviz Ino. Ensayos Experto técnico

Figura 7.5 – Acta de Pruebas SSSC (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.

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

Figura 7.6 – 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 <sub>PPC</sub> = 39.9 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.02 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P4 <sub>PPC</sub> = 31.28 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P2 <sub>PPC</sub> = 12.91[MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable
P1 <sub>PPC</sub> = 3.7 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.01 pu)	No alcanzable	No alcanzable

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.
P5 <sub>PPC</sub> = 39.9 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P4 <sub>PPC</sub> = 31.28 [MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P2 <sub>PPC</sub> = 12.91[MW]	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Alcanzado subiendo la tensión (1.07 pu)	Alcanzado bajando la tensión (1.07 pu)
P1 <sub>PPC</sub> = 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 <sub>CPF</sub>	Ajustado	Simulación de frecuencia	±25	±0.2, +0.7	5	Modificación del despacho a 40 MW por falta de recurso eólico
P5 <sub>CPF</sub>	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<sub>nom</sub>/min), y con una tasa adicional de 9.5 MW/min (20%P<sub>nom</sub>/min),

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

Figura 7.7 – Acta de Pruebas SSCC (3 de 3)



## 7.6 Certificado de calibración del equipamiento utilizado

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN			
			
<b>ESTUDIOS ELÉCTRICOS</b>			
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 7.8 – Certificado de calibración analizador de energía



Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.