

INFORME PRELIMINAR

Informe de ensayos de prestación de servicios complementarios de control primario de frecuencia





[Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco]

1 ÍNDICE

1		ÍND	NDICE							
2		Objetivo del Informe								
3		Mai	rco re	gulatorio	. 4					
4		Des	cripci	ón de la instalación	. 5					
5		Des	cripci	ón de los Ensayos	. 7					
6		Res	ultado	os de los ensayos	10					
	6.	1	Ensa	ayos para la determinación de la banda muerta	1					
		6.1.	1	Ensayos de medición de la banda muerta – 25 mHz	1					
		6.1.	2	Ensayos de medición de la banda muerta – 200 mHz	13					
		6.1.	3	Resumen de los ensayos de Banda Muerta y comentarios	۲7					
	6.	2	Ensa	ayos para la determinación del estatismo permanente	18					
	6.	3	Esca	lones de frecuencia ante diferentes configuraciones de estatismo	21					
		6.3.	1	Estatismo configurado en 2%	22					
		6.3.	2	Estatismo configurado en 4%	26					
		6.3.	3	Estatismo configurado en 8%	30					
		6.3.	4	Resumen y comentarios a los ensayos de escalones de frecuencia	34					
	6. es	4 stabl	Dete ecimi	erminación del retardo inicial del sistema de control de frecuencia y tiempo de ento	de 34					
	6.	5	Resu	umen de aportes al CPF	37					
7		Con	clusic	ones	39					
8		Acta	as de	pruebas	10					
9		Ane	xos		10					
	9.	1	Ane	xo 1	1 0					
	9.	2	Ane	xo 2	12					
	9.	9.3 Anexo 3								

2 Objetivo del Informe

El objetivo del informe es presentar los resultados de los ensayos que se realizaron a la central solar Luz del Norte en el contexto de la verificación de su capacidad para prestar Servicios Complementarios (SSCC), particularmente la capacidad de participación en Control Primario de Frecuencia.

3 Marco regulatorio

A continuación, se revisa el marco regulatorio aplicable a la verificación de instalaciones para la prestación de Servicios Complementarios. En particular, se revisan los aspectos aplicables a parques fotovoltaicos, para el Servicio Complementario (SC) de Control Primario de Frecuencia (CPF).

Norma Técnica de Servicios Complementarios (NT SSCC)

De acuerdo al artículo 4-5 de la Norma Técnica de Servicios Complementarios (NT SSCC), la verificación de instalaciones existentes para la prestación de SSCC se realiza de acuerdo a las instrucciones que el Coordinador ha definido en los **Instructivos Técnicos para la Verificación de Instalaciones**, y lo dispuesto en la NT SSCC. El Anexo Técnico **"Verificación de Instalaciones para la prestación de SSCC"** contiene las formalidades y descripción mínima de los requerimientos para el Proceso de Verificación de instalaciones existentes para la prestación de SSCC (Artículo 4-15 NT SSCC).

Según el artículo 4-8 de la NT SSCC, se debe comprobar que las instalaciones cumplan con los requisitos técnicos establecidos en la definición de los SSCC establecida en la Resolución SSCC.

Anexo Técnico de Verificación de instalaciones para la prestación de SSCC (Anexo Técnico – NT SSCC)

Los titulares o solicitantes del Proceso de Verificación deben entregar al Coordinador información técnica asociada a la cuantificación de recursos técnicos asociados a los SSCC de Control de Frecuencia y Control de Tensión que se indican en los Artículos 14 y 15 del Anexo Técnico.

De acuerdo al título VII del Anexo Técnico asociado a instalaciones que entregan el SC de CPF, se debe realizar ensayos y/o mediciones a efectos de demostrar que:

- La instalación cumple con los tiempos establecidos en la Resolución SSCC,
- El controlador de carga/velocidad o frecuencia/potencia cumple con las exigencias mínimas de desempeño estático y dinámico definidos en el Artículo 3-17 de la NTSyCS,
- La instalación dispone de los equipos para un adecuado monitoreo de la disponibilidad y desempeño del SC CPF, de acuerdo a lo indicado en los Artículos 4-17 y 4-27 de la NTSyCS,
- Se verificó la respuesta del sistema de control frecuencia/potencia o del control carga/velocidad de la instalación.

Adicionalmente, mediante mediciones en terreno, se deberá verificar el desempeño del controlador frente a pequeñas perturbaciones en la consigna de velocidad o frecuencia. Se requiere como mínimo:

- Medir el estatismo permanente del lazo automático de control de carga/velocidad o frecuencia/potencia,
- Medir la mínima y máxima "banda muerta" del controlador de carga/velocidad o frecuencia/potencia,
- Medir el tiempo de establecimiento del lazo de control de frecuencia frente a un pequeño escalón en la consigna de frecuencia o potencia,
- Evaluar el amortiguamiento del lazo de control de velocidad en todos los modos posibles de operación, y
- Verificar la capacidad de tomar o reducir carga, en forma automática ante distintas variaciones de frecuencia.

En atención a los requerimientos normativos exigidos en el marco regulatorio, en la sección 5 de este documento se indican los ensayos realizados por parte del Experto Técnico, en conjunto con la empresa solicitante, para realizar las pruebas y obtener los resultados y mediciones que permitan verificar la capacidad de entregar el SSCC de CPF de la planta solar Luz del Norte.

4 Descripción de la instalación

El parque fotovoltaico Luz del Norte se ubica en la comuna de Copiapó, región de Atacama. El parque consiste en un arreglo de 172 inversores "SMA Sunny Central 800 CP" con una potencia aparente máxima de 880 [kVA] a 25 [°C] cada uno.

Debido a las condiciones geográficas donde la central se encuentra localizada, la salida de los inversores se reduce a una potencia aparente máxima de 820 [kVA] y son operados para exportar una potencia activa de 795.4 [kW].

Para colectar la potencia de los inversores se utilizan 86 transformadores elevadores de 3 devanados 23/0.36/0.36 [kV] y 1.6/0.8/0.8 [MVA], por cada dos inversores se dispone de un transformador. La potencia de los transformadores elevadores es colectada a través de una barra a la cual se conecta el lado de baja tensión del transformador elevador 220/23 [kV] y 150 [MVA] de la subestación Luz del Norte. La subestación Luz del Norte se conecta al SEN en la Subestación Carrera Pinto en 220 [kV] a través de una línea de 2.6 [km] de longitud.

La Figura 1 obtenida del informe de validación de modelos de la central Luz del Norte presenta un diagrama de interconexión de los elementos del parque.

Para efectos de cuantificar distintas variables de interés, a partir de la base de datos DIgSILENT de Operación de Febrero 2022 que publicó el Coordinador en su sitio web se construyó un modelo simplificado de la central fotovoltaica Luz del Norte en una base de datos DIgSILENT (Figura 2). Se consideró además el banco de capacitores de 32 [MVAr] que está dentro de las instalaciones de la central en 23 [kV], el cual no está modelado en la citada base de datos DIgSILENT que publicó el Coordinador en su sitio web.



Figura 1: Diagrama de interconexión del parque. Fuente: Informe de Homologación validado por el Coordinador en sitio web de infotécnica *"319_Informe de Validación NT PV LDN.pdf*".



Figura 2: Diagrama del modelo simplificado de la central Luz del Norte implementado en DIgSILENT.

5 Descripción de los Ensayos

Objetivos del ensayo

Los ensayos de verificación para el SC CPF tienen por objetivo verificar la respuesta de la instalación ante variaciones rápidas y pequeñas de la frecuencia y convalidar que el error de estado permanente esté dentro de los márgenes tolerados una vez alcanzada la nueva condición de equilibrio. De acuerdo a la Resolución SSCC y al Informe de SSCC vigente, se define para el SC de CPF los siguientes tiempos asociados a la prestación del servicio:

- Tiempo de inicio de activación: menor a 2 segundos desde la detección del evento,
- Tiempo total de activación: 10 segundos desde la detección del evento, y
- Mínimo tiempo de entrega: 5 minutos.

Antecedentes relacionados a los Instructivos Técnicos

El instructivo técnico de verificación de SSCC de Control de Frecuencia, para el caso del CPF, indica que los ensayos tienen por finalidad evaluar la respuesta del controlador frecuencia/potencia de los parques fotovoltaicos. Durante las pruebas el controlador de frecuencia/potencia debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

- a) El retardo inicial del sistema de carga/velocidad deberá ser inferior a dos segundos, desde la detección de la sub- o sobre frecuencia, hasta el comienzo de la acción. El Coordinador podrá aceptar retardos superiores sólo en caso de que el propietario del parque fotovoltaico proporcione evidencias técnicas que lo justifiquen.
- b) En caso de sobre frecuencia, 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%.
 El estatismo deberá calcularse sobre la potencia nominal.
- d) La banda muerta será de ±200 [mHz].
- e) El funcionamiento del controlador de frecuencia/potencia del parque fotovoltaico estará limitado por la disponibilidad del recurso primario.

Ensayos

Los ensayos se realizarán considerando 4 puntos de generación de la central:

- Plena carga menos bloque de reserva (P1),
- Mínimo técnico más bloque de reserva (P4), y
- Dos (2) cargas intermedias (P2 y P3).

1. Ensayos para la determinación de banda muerta

El ensayo de verificación de la banda muerta de la central corresponde a configurar el parámetro de banda muerta del controlador en ±25 [mHz] y registrar la respuesta de la central durante un periodo de 15 minutos frente a las variaciones normales de frecuencia de la red, para cada uno de los puntos de generación (P1, P2, P3 y P4). En caso de que las variaciones normales de la frecuencia de la red sean poco significativas para obtener respuestas sostenidas de la planta, se podrá extender la prueba por 15 minutos adicionales.

Posteriormente, se configurará el parámetro de banda muerta en ±200 [mHz] y, considerando que normalmente las variaciones de la red son menores, se introducirá artificialmente valores de frecuencia en la referencia del controlador entre 0 y ±200 [mHz] con el fin de verificar que se cumple la exigencia normativa, para cada uno de los puntos de generación (P1, P2, P3, P4).

Se corrobora durante los ensayos la posibilidad de ajustar la banda muerta con la unidad en servicio y se indica el rango de ajuste permitido por el controlador.

2. Ensayos para la determinación del estatismo

2.a) Rango de ajuste del estatismo y cambios de ajustes del estatismo

En el caso del rango de ajuste del estatismo, se verificó que el rango de ajuste del estatismo de la central está acorde a lo indicado en el Artículo 3-17 de la NTSyCS para cada uno de los 4 puntos de generación de la central a ensayar. El ajuste del estatismo está a disposición del operador, por lo que no se requiere de la presencia de un especialista para su modificación.

Se verificó que la unidad posee la capacidad de cambiar el estatismo encontrándose en servicio. Se verificó la operación del estatismo considerando:

- Estatismo de 2%,
- Estatismo de 4%, y
- Estatismo de 8%.

Al respecto, el protocolo de ensayos es el siguiente:

- 1. Se ajusta el estatismo al valor al cual la central está normalmente durante su operación permanente,
- 2. Se lleva la central al punto de generación P1,
- 3. Se aplican escalones de frecuencia de ±0.2 [Hz] y de ±0.7 [Hz] y se registra la respuesta durante 5 minutos para cada uno de los escalones aplicados,
- 4. Se lleva la central al punto de generación P2 y se repite el punto 3,
- 5. Se lleva la central al punto de generación P3 y se repite el punto 3,
- 6. Se lleva la central al punto de generación P4 y se repite el punto 3,
- 7. Se ajusta el estatismo al mayor valor de estatismo permitido según el Artículo 3-17 de la NTSyCS y se repiten las pruebas indicadas en los puntos 2 a 6, y
- 8. Se ajusta el estatismo al menor valor de estatismo permitido según el Artículo 3-17 de la NTSyCS y se repiten las pruebas indicadas en los puntos 2 a 6.

Los valores de aporte al CPF esperados para los escalones de frecuencia de ± 0.2 [Hz] y de ± 0.7 [Hz] se detallan en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 para cada una de las configuraciones de estatismo ensayadas.

Con el objetivo de homologar la respuesta de la planta a lo exigido para las máquinas síncronas, se configuró una banda muerta de 25 [mHz] para la realización de los ensayos.

Terminado este ensayo se normalizó la condición de carga de la central.

2.b) Determinación del estatismo permanente

Para realizar esta prueba, se dispuso el parque en su punto de operación a plena carga de acuerdo a la disponibilidad del insumo primario disponible al momento de realizar el ensayo. En la sección 6 se determina el estatismo permanente según se indica en la sección 3.1.1.3 del Instructivo Técnico, considerando la siguiente fórmula que relaciona las variaciones de frecuencia con las variaciones de potencia activa de la central:

$$R[\%] = \frac{\Delta f}{\Delta P} \cdot 100 \, [\%]$$

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- 1. Se ajusta el estatismo de la central a su configuración de operación normal,
- 2. Se ajusta el despacho de la central a su punto de máxima potencia disponible,
- 3. Se introduce la frecuencia de la red a la referencia del controlador,
- 4. Se simula la adición de 200 [mHz] a la señal introducida en el punto 3, se registran los valores durante 60 segundos,
- 5. Se repite el punto 4 hasta que la central alcance su mínimo técnico.

Con el objetivo de homologar la respuesta de la planta a lo exigido para las máquinas síncronas, se configuró una banda muerta de 25 [mHz] para la realización de los ensayos.

Resultados asociados a las mediciones durante los ensayos

Considerando los resultados de las mediciones de banda muerta y estatismo, se determina también:

- El retardo inicial del controlador frecuencia/potencia (sección 3.1.3 del Instructivo Técnico), y
- El tiempo de establecimiento (sección 3.1.4 del Instructivo Técnico).

Consideraciones de seguridad

Los ensayos se realizaron en coordinación con el operador de la planta y el operador de la red, verificando constantemente que las variables registradas (tensión, potencia y frecuencia) estén dentro de los rangos de operación aceptables y que las referencias introducidas en el control de planta no provoquen una operación incorrecta de la planta y del sistema. Para esto se verificó, además, si existían al momento de realizar las pruebas restricciones operativas en la red, que puedan condicionar las máximas excursiones de las variables ensayadas.

6 Resultados de los ensayos

Puntos de despacho considerados durante los ensayos

De acuerdo con la información entregada por First Solar, la central Luz del Norte puede ajustar su estatismo en valores entre un 0.2% y un 100%. Las pruebas de control primario de frecuencia se realizaron considerando escalones de frecuencia de \pm 0.2 [Hz] y de \pm 0.7 [Hz], por lo tanto, resulta pertinente definir los puntos de despacho de acuerdo a la reserva que puede entregar la central Luz del Norte teniendo en cuenta sus límites operativos y los escalones de frecuencia que se ensayarán (\pm 0.2, \pm 0.7 [Hz]).

De acuerdo a lo indicado en el Anexo 3, los límites operativos de la central Luz del Norte son los siguientes:

Potencia Máxima	136,81 [MW]
Mínimo Técnico	13,5 [MW]

Tabla 1: Límites operativos central Luz del Norte

Preliminarmente, en la confección de los protocolos de pruebas se escogieron puntos que permitirían alcanzar los límites operativos de la central durante las pruebas de desviación de frecuencia. Sin embargo, durante la realización de los ensayos estos puntos debieron ser modificados debido a la dificultad que implicaba para el Centro de Despacho y Control el constante cambio de puntos de despacho de la central.

De acuerdo a los protocolos de verificación de CPF aprobados por el Coordinador, se hicieron ensayos considerando configuración de estatismo de 2%, 4% y 8% junto con una banda muerta de 25 mHz.

En la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 se indican los puntos de despacho de la central para los cuales se realizó cada uno de los ensayos de desviación de frecuencia, junto con la reserva esperada a entregar por la planta considerando el estatismo configurado y a la desviación de frecuencia simulada. Los valores de reserva que están definidos por los límites operativos de la central (Potencia Máxima o Mínimo Técnico) de acuerdo al punto de despacho se marcan en color rojo.

	Estatismo 2%							
Punto de	∆f = -0	.2 [Hz]	∆f = 0.	2 [Hz]	Δf = -0	.7 [Hz]	∆f = 0.	7 [Hz]
Despacho	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
P1	98.4	24.6	98.4	-24.6	109.3	27.5	109.3	-93.0
P2	86.6	24.6	86.6	-24.6	86.6	50.2	86.6	-73.1
P3	61	24.6	61	-24.6	61	75.8	61	-47.5
P4	41	24.6	41	-24.6	36	93.0	41	-27.5

Table 3. Dunkas da das		mus semenals s submers	man I dal Nauta mana	
Tadia Z: Puntos de des	.pacho ensavados v rese	rva esperada a entregar	por luz dei Norte para ur	1 estatismo de 2%

Tabla 3: Puntos de despacho ensayados y reserva esperada a entregar por Luz del Norte para un estatismo de 4%.

	Estatis	mo 4%						
Punto de	∆f = -0	.2 [Hz]	∆f = 0.	2 [Hz]	∆f = -0	.7 [Hz]	∆f = 0.	7 [Hz]
Despacho	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
P1	86.6	12.3	86.6	-12.3	86.6	46.5	86.6	-46.5
P2	85	12.3	85	-12.3	85	46.5	85	-46.5
P3	61	12.3	61	-12.3	61	46.5	61	-46.5
P4	41	12.3	41	-12.3	41	46.5	41	-27.5

Tabla 4: Puntos de despacho ensayados y reserva esperada a entregar por Luz del Norte para un estatismo de 8%.

Estatismo 8%								
Punto de	∆f = -0	.2 [Hz]	∆f = 0.	.2 [Hz]	∆f = -0	.7 [Hz]	Δf = 0.	.7 [Hz]
Despacho	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva	Despacho	Reserva
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
P1	110	6.2	110	-6.2	110	23.3	110	-23.3
P2	86.6	6.2	86.6	-6.2	86.6	23.3	86.6	-23.3
P3	61	6.2	61	-6.2	61	23.3	61	-23.3
P4	41	6.2	41	-6.2	41	23.3	41	-23.3

En el artículo 3-17 de la NTSyCS se indica "[...] 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].". Si bien durante las pruebas se ensayaron valores de estatismo que producen gradientes mayores del 55% de la potencia activa disponible, se debería considerar un **estatismo mínimo de 3.65% para eventos de sobrefrecuencia para cumplir con lo indicado en el artículo 3-17 de la NTSyCS.**

6.1 Ensayos para la determinación de la banda muerta

6.1.1 Ensayos de medición de la banda muerta – 25 mHz

De acuerdo a lo indicado en los protocolos de ensayos que fueron aprobados por el Coordinador, el ensayo de medición de la banda muerta de 25 mHz consiste en medir, para periodos de tiempo de 15 minutos, la respuesta de la planta ante variaciones de frecuencia normales de la red. Esta medición se realizó para 4 puntos de despacho distintos y se configuró un estatismo de 2%.

En la Figura 3 se observa, para cada uno de los puntos ensayados, la inyección de potencia activa de Luz del Norte en un periodo de 15 minutos junto con las variaciones de frecuencia medidas desde la red para el mismo intervalo temporal.



Figura 3: Ensayos de banda muerta de 25 mHz - Comparación potencia v/s tiempo y frecuencia v/s tiempo.

Como se puede apreciar de las mediciones, Luz del Norte se mantiene generando en el setpoint entregado a través del sistema de control de la planta cuando las variaciones de frecuencia del sistema se mantienen dentro de la banda de los 25 mHz. Para desviaciones mayores de frecuencia, la potencia generada por Luz del Norte se desvía del setpoint en dirección contraria al sentido de la desviación de frecuencia y de manera proporcional a la magnitud de la desviación.

En la Figura 4 se presenta, para cada uno de los puntos de despacho, las mediciones de 15 minutos de frecuencia (eje de abscisas) y de potencia (eje de ordenadas) en un gráfico de dispersión.



Figura 4: Ensayos de banda muerta de 25 mHz - Gráfico de dispersión.

Se observa que el parque fotovoltaico Luz del Norte es capaz de operar con una banda muerta de 25 mHz, ante un estatismo configurado de 2%. Se logra apreciar un comportamiento lineal con banda muerta en la respuesta de la planta.

6.1.2 Ensayos de medición de la banda muerta - 200 mHz

En el caso particular de parques fotovoltaicos, se indica en los instructivos técnicos elaborados por el Coordinador para las pruebas de control de frecuencia que, como requisito mínimo, se debe cumplir que la banda muerta sea 200 mHz.

De acuerdo a lo indicado en los protocolos de ensayos que fueron aprobados por el Coordinador, el ensayo de medición de la banda muerta de 200 mHz consiste en medir, para periodos de tiempo de 15 minutos, la respuesta de la planta ante variaciones de frecuencia normales de la red. Sin embargo, como las desviaciones de frecuencia naturales de la red son típicamente menores a 200 mHz, se consideraron pruebas de escalón de 150 mHz, 200 mHz y 250 mHz con una duración de 60 segundos por escalón para

este tipo de ensayos. Esta medición se realizó para 4 puntos de despacho distintos y se configuró un estatismo de 2%.

En la Figura 5 se muestra la evolución de la potencia activa de Luz del Norte junto con el setpoint de potencia activa de acuerdo al escalón de desviación de frecuencia que corresponda. Dado que el sistema de control de Luz del Norte que permite simular escalones de frecuencia no es capaz de reportar los escalones de frecuencia ficticios introducidos al controlador, se reporta solamente el setpoint de potencia activa en las gráficas.



Figura 5: Ensayos de banda muerta de 200 mHz - Respuesta a escalón de 150 mHz, 200 mHz y 250 mHz.

En la Figura 6 se muestra la interfaz del controlador de la planta mediante la cual se realizaron los ensayos de escalón. Al presionar el botón "Frequency Test" se abre la ventana emergente "CLN1 – Frequency Response Test" que permite simular mediciones de frecuencia ficticias de magnitud "Test Freq" y de duración "Test Duration (s)". La señal ficticia de frecuencia no se reporta en el sistema SCADA.

		Freque	ncy Con	nfiguration	
Frequency Cntrol Enable Frequency Test				CLN1 - Frequency Test	2
High DB Hz High Droop Pct High Limit Hz Low DB Hz Low Droop Pct Low Limit Hz Nominal Freq Hz	New 0.025 16.000 51.000 0.025 16.000 49.500 50.000	Current 0.025 16.000 51.000 0.025 16.000 49.500 50.000	Hig Low	Test InactiveTest Freq49.5Test Duration (s)30sPlant Command118.37Enable TestFreq Low Limit49.5Freq High Limit51Freq High Deadband0.03Freq Low Deadband0.03	

Figura 6: Funcionalidad "Frequency Test" de la planta Luz del Norte.

Por su parte, se registró en las actas de prueba correspondiente el minuto exacto en el cual fue aplicado el escalón de frecuencia a la planta, con lo cual es posible verificar que los aportes de potencia solamente fueron entregados ante desviaciones mayores a 200 mHz.

	Ensayo: Banda Muerta 200 [mHz]								
Fecha	13-12-22	Hora inicio	14:36						
Número de prueba	1	Hora fin	14:46						
Potencia Activa (P) al		Potencia Reactiva (Q) al							
comenzar la prueba (MW)	41	comenzar la prueba (MVAr)	0						
Banda Muerta Configurada									
(mHz)	200								
	1	Doguizción do frocuencia	Disponibilidad insumo	D promodio	Tion				

Puntos alcanzados	Hora	Desviación de frecuencia (mHz)	Disponibilidad insumo primario (MW)	P promedio (MW)	Tiempo total (s)	Observaciones
1.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
1.2) Desviación de 50 mHz						No ensayado
1.3) Desviación de 100 mHz						No ensayado
1.4) Desviación de 150 mHz	14:37	150		41	60	
1.5) Desviación de 200 mHz	14:38	200		41	60	
1.6) Desviación de 250 mHz	14:40	250		33.95	60	
2.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
2.2) Desviación de -50 mHz						No ensayado
2.3) Desviación de -100 mHz						No ensayado
2.4) Desviación de -150 mHz	14:42	-150		41	60	
2.5) Desviación de -200 mHz	14:43	-200		41	60	
2.6) Desviación de -250 mHz	14:45	-250		48.05	60	

Figura 7: Acta de prueba - Banda Muerta de 200 mHz - Despacho 41 MW

	Ensayo: Banda Muerta 200 [mHz]							
Fecha	13-12-22	Hora inicio	16:18					
Número de prueba	1	Hora fin	16:29					
Potencia Activa (P) al		Potencia Reactiva (Q) al						
comenzar la prueba (MW)	61	comenzar la prueba (MVAr)	0					
Banda Muerta Configurada								
(mHz)	200							

Puntos alcanzados	Hora	Desviación de frecuencia (mHz)	Disponibilidad insumo primario (MW)	P promedio (MW)	Tiempo total (s)	Observaciones
1.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
1.2) Desviación de 50 mHz						No ensayado
1.3) Desviación de 100 mHz						No ensayado
1.4) Desviación de 150 mHz	16:24	150		61	60	
1.5) Desviación de 200 mHz	16:26	200		61	60	
1.6) Desviación de 250 mHz	16:28	250		53.95	60	
2.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
2.2) Desviación de -50 mHz						No ensayado
2.3) Desviación de -100 mHz						No ensayado
2.4) Desviación de -150 mHz	16:18	-150		61	60	
2.5) Desviación de -200 mHz	16:20	-200		61	60	
2.6) Desviación de -250 mHz	16:22	-250		68.05	60	

Figura 8: Acta de prueba - Banda Muerta de 200 mHz - Despacho 61 MW

		Ensayo:	Banda Muerta 200 [mHz]
Fecha	14-12-22	Hora inicio	11:00
Número de prueba	1	Hora fin	11:10
Potencia Activa (P) al		Potencia Reactiva (Q) al	
comenzar la prueba (MW)	86.6	comenzar la prueba (MVAr)	0
Banda Muerta Configurada			
(mHz)	200		

Puntos alcanzados	Hora	Desviación de frecuencia (mHz)	Disponibilidad insumo primario (MW)	P promedio (MW)	Tiempo total (s)	Observaciones
1.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
1.2) Desviación de 50 mHz						No ensayado
1.3) Desviación de 100 mHz						No ensayado
1.4) Desviación de 150 mHz	11:00	150		86.6	60	
1.5) Desviación de 200 mHz	11:02	200		86.6	60	
1.6) Desviación de 250 mHz	11:03	250		79.55	60	
2.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
2.2) Desviación de -50 mHz						No ensayado
2.3) Desviación de -100 mHz						No ensayado
2.4) Desviación de -150 mHz	11:06	150		86.6	60	
2.5) Desviación de -200 mHz	11:07	200		86.6	60	
2.6) Desviación de -250 mHz	11:09	250		93.65	60	

Figura 9: Acta de prueba - Banda Muerta de 200 mHz - Despacho de 86.6 MW

	Ensayo: Banda Muerta 200 [mHz]										
Fecha	13-12-22	Hora inicio	12:10								
Número de prueba	1	Hora fin	12:23								
Potencia Activa (P) al		Potencia Reactiva (Q) al									
comenzar la prueba (MW)	98.4	comenzar la prueba (MVAr)	0								
Banda Muerta Configurada											
(mHz)	200										

Puntos alcanzados	Hora	Desviación de frecuencia (mHz)	Disponibilidad insumo primario (MW)	P promedio (MW)	Tiempo total (s)	Observaciones
1.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
1.2) Desviación de 50 mHz						No ensayado
1.3) Desviación de 100 mHz						No ensayado
1.4) Desviación de 150 mHz	12:12	150		98.4	60	
1.5) Desviación de 200 mHz	12:14	200		98.4	60	
1.6) Desviación de 250 mHz	12:16	250		91.35	60	
2.1) Desviación de 0 mHz						No ensayado
2.2) Desviación de -50 mHz						No ensayado
2.3) Desviación de -100 mHz						No ensayado
2.4) Desviación de -150 mHz	12:19	-150		98.4	60	
2.5) Desviación de -200 mHz	12:20	-200		98.4	60	
2.6) Desviación de -250 mHz	12:22	-250		105.45	60	

Figura 10: Acta de prueba - Banda Muerta de 200 mHz - Despacho de 98.4 MW

6.1.3 Resumen de los ensayos de Banda Muerta y comentarios

Se realizaron ensayos de banda muerta en la planta solar Luz del Norte de acuerdo a los protocolos de ensayo aprobados por el Coordinador. Respecto de los ensayos realizados, se tienen las siguientes observaciones:

- 1. El parque fotovoltaico Luz del Norte es capaz de operar con una banda muerta de 25 mHz, ante un estatismo configurado de 2%. Se aprecia un comportamiento lineal por fuera de la banda muerta en la respuesta de la planta.
- 2. Al configurar la banda muerta de la planta en 200 mHz, se verifica que los aportes de potencia solamente fueron entregados ante desviaciones mayores a 200 mHz.
- 3. Los parámetros asociados al Control Primario de Frecuencia tales como banda muerta, estatismo y límites de respuesta son configurables en todo su rango desde la interfaz del controlador de la planta. En el caso particular de la banda muerta, se verificó durante los ensayos que es posible configurar la banda muerta con la planta en servicio simplemente cambiando el parámetro en la interfaz que se muestra en la Figura 11.



Figura 11: Interfaz de configuración del Control Primario de Frecuencia de Luz del Norte.

6.2 Ensayos para la determinación del estatismo permanente

Antecedentes relacionados al estatismo permanente de parques fotovoltaicos

El concepto de "estatismo permanente" no está definido para el caso de parques fotovoltaicos. El control de potencia ante desviaciones de frecuencia no se realiza por un dispositivo físico como es en el caso de las turbinas de máquinas síncronas cuya modificación de potencia ante desviaciones de frecuencia ocurre gracias al *governor* de la planta.

En el caso de centrales basadas en electrónica de potencia, el control de potencia se realiza mediante el control de la electrónica de los inversores. Luego, el estatismo no depende de las características constructivas de los inversores, sino que depende de cómo está configurado el controlador (software) de la planta. En el caso de Luz del Norte, el controlador no cuenta con un parámetro de estatismo característico o "permanente", sino que este es configurable en un rango.

Para efectos de llevar a cabo este ensayo, que es requerido de igual manera para parques fotovoltaicos en los instructivos técnicos de verificación para el control de frecuencia, se realizó la prueba considerando un estatismo de 3.65%, que corresponde al valor de estatismo más exigente que permite cumplir con lo indicado en el artículo 3-17 de la NTSyCS.

Resultado de los ensayos

De acuerdo a los protocolos de ensayo aprobados por el Coordinador, se configuró un estatismo de 3.65% y una banda muerta de 25 mHz para la realización de los ensayos. Con el parque operando a capacidad máxima según la disponibilidad de insumo primario en el momento que comienzan las pruebas, se simuló una rampa de escalones de frecuencia de 200 mHz donde cada escalón tuvo una duración mínima de 60 segundos.

Al momento de inicio de las pruebas, el parque contaba con disponibilidad de insumo primario para operar a 132.6 MW. Los escalones de frecuencia se simularon calculando la consigna esperada de potencia activa de acuerdo a la frecuencia que se intentó reproducir. Las adiciones de frecuencia se fueron sobreponiendo a las anteriores, de modo de formar una rampa de escalones de 200 mHz. Dado que, para efectos de las pruebas, se simuló la desviación de frecuencia mediante la manipulación de la consigna de potencia activa y no se modificó la señal de frecuencia del sistema que entra a la planta, las protecciones de sobrefrecuencia no desconectaron el parque para desviaciones mayores a 1.5 Hz.

Se registró en el acta de pruebas correspondiente el minuto exacto en que se introdujeron al parque los escalones de frecuencia simulados.

Ensayo: Determinación del estatismo permanente								
Fecha	14-12-22	Hora inicio	13:32					
Número de prueba	1	Hora fin	13:46					
Potencia Activa (P) al		Potencia Reactiva (Q) al						
comenzar la prueba (MW)	132.6	comenzar la prueba (MVAr)	0					
Estatismo de subida		Estatismo de bajada						
configurado (%)	3.65	configurado (%)	3.65					
Banda Muerta Configurada								
(mHz)	25							

Puntos alcanzados	Hora	Escalón de frecuencia aplicado (Hz)	Disponibilidad insumo primario (MW)	P promedio (MW)	Tiempo total (s)	Comentarios
0.2 Hz - Escalón 1	13:32	0.2	132.6	126.48	60	
0.2 Hz - Escalón 2	13:34	0.4		111.02	60	
0.2 Hz - Escalón 3	13:35	0.6		95.56	60	
0.2 Hz - Escalón 4	13:37	0.8		80.11	60	
0.2 Hz - Escalón 5	13:39	1		64.65	60	
0.2 Hz - Escalón 6	13:41	1.2		49.19	60	
0.2 Hz - Escalón 7	13:43	1.4		33.74	60	
0.2 Hz - Escalón 8	13:44	1.6		18.28	60	

Figura 12: Acta de prueba – Estatismo permanente - Despacho de 132.6 MW

En la Figura 13 se observa la evolución de la potencia activa del parque y la consigna de potencia activa solicitada al controlador a la planta.



Estatismo Permanente - Estatimo Configurado 3.65%

Figura 13: Ensayo de estatismo permanente - Potencia v/s tiempo y frecuencia v/s tiempo.

Para efectos de calcular el estatismo, se consideró la siguiente fórmula¹:

$$R[\%] = \frac{\frac{(f - BM) - 50}{50}}{\frac{P_n - P}{P_n}} \cdot 100\%$$

En la Tabla 5, se presenta el cálculo del estatismo para cada uno de los puntos teóricos a alcanzar.

Escalón de	Potencia	Potencia	Randa Muarta [Ha]	Cálculo
Frecuencia [Hz]	Nominal [MW]	Alcanzada [MW]	Banda Muerta [H2]	Estatismo [%]
0	136.8	132.6	0.025	0.00%
0.2	136.8	126.48	0.025	4.64%
0.4	136.8	111.02	0.025	3.98%
0.6	136.8	95.56	0.025	3.81%
0.8	136.8	80.11	0.025	3.74%
1	136.8	64.65	0.025	3.70%
1.2	136.8	49.19	0.025	3.67%
1.4	136.8	33.74	0.025	3.65%
1.6	136.8	18.28	0.025	3.64%

Tabla 5: Cálculo de estatismo - Ensayo de estatismo permanente.

¹ Adaptación de la fórmula disponible en la sección 3.1.1.3 de los instructivos técnicos de verificación de control de frecuencia. La fórmula entregada en los instructivos técnicos es solamente válida para máquinas síncronas.

Para efectos de determinar si la respuesta real de Luz del Norte ante la prueba de estatismo permanente converge a un estatismo configurado de 3.65%, se analiza la respuesta de la planta en la Figura 14.



Estatismo Permanente - Estatimo Configurado 3.65% Dispersión

Figura 14: Ensayo de estatismo permanente – Gráfico de dispersión (azul) y estatismo de 3.65% como referencia (rojo).

Se observa que el estatismo medido en la respuesta de la planta converge al estatismo configurado inicialmente en la medida que se adicionan escalones de frecuencia.

6.3 Escalones de frecuencia ante diferentes configuraciones de estatismo

Se ensayaron escalones de frecuencia de ±0.2 Hz y ±0.7 Hz con configuración de banda muerta de 25 mHz y estatismos de 2%, 4% y 8%. Los ensayos se realizaron para los puntos de despacho indicados en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, junto con la reserva esperada a entregar por la planta considerando el estatismo configurado y a la desviación de frecuencia simulada.

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos.

6.3.1 Estatismo configurado en 2%

Los puntos de despacho ensayados y la reserva esperada a desplegar de acuerdo a un estatismo de 2% se presentan en la Tabla 2 para las desviaciones de ±0.2 Hz y ±0.7 Hz. En la Figura 15 y Figura 16 se presentan los resultados de los ensayos y se destaca, para cada ensayo, los siguientes puntos:

- Instante de inicio del despliegue de la reserva.
- Instante de llegada de la potencia a la banda de establecimiento de ±10%.
- Instante de 10 segundos desde el inicio del despliegue de la reserva.

Dado que el modo control de frecuencia se encontraba activo para realizar este tipo de ensayos, la planta se encontraba constantemente variando su potencia en función de las desviaciones naturales de frecuencia de la red. Por lo tanto, en la ejecución de algunos de los ensayos la potencia de la planta al inicio del despliegue de la reserva fue levemente distinta al punto de setpoint inicial configurado.

En la Tabla 6 se resumen los principales resultados de las pruebas para el estatismo configurado.

Dunto do	Afaplicado	P. Inicial	R. esperada	P. inicial	R. esperada	P. final	R. efectiva	% de la	P. final	R. efectiva	% de la	
Puillo de		teórica	teórica	real	real	(10seg)	entregada (10seg)	reserva	(5min)	entregada (5min)	reserva	Comentarios
Despacho	[[[2]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	esperada	[MW]	[MW]	esperada	
P1	-0.2	98.4	24.6	98.6	24.4	120.2	21.6	88%	123.1	24.5	100%	
P1	0.2	98.4	-24.6	98.7	-24.9	74.4	-24.3	98%	73.7	-25.0	100%	
P1	-0.7	109.3	18.5	109.7	18.1	127.8	18.1	100%	127.4	17.7	98%	(1)
P1	0.7	109.3	-93	110.7	-94.4	22.7	-88.1	93%	14.1	-96.6	100%	
P2	-0.2	86.6	24.6	86.7	24.5	109.3	22.5	92%	111.3	24.6	100%	
P2	0.2	86.6	-24.6	90.6	-28.6	62.7	-27.9	98%	61.9	-28.7	100%	
P2	-0.7	86.6	41.3	88.4	39.5	127.9	39.5	100%	127.4	39.0	99%	(1)
P2	0.7	86.6	-73.1	86.8	-73.3	16.9	-69.9	95%	13.9	-72.9	99%	
P3	-0.2	61	24.6	61.0	24.6	84.9	23.9	97%	85.7	24.7	100%	
P3	0.2	61	-24.6	60.9	-24.5	36.8	-24.2	98%	36.3	-24.6	100%	
P3	-0.7	61	67	53.9	74.1	121.4	67.5	91%	128	74.1	100%	(1)
P3	0.7	61	-47.5	61.1	-47.6	14.7	-46.4	98%	13.8	-47.3	99%	
P4	-0.2	41	24.6	41.0	24.6	64.9	23.9	97%	65.7	24.7	100%	
P4	0.2	41	-24.6	44.5	-28.1	16.7	-27.8	99%	16.3	-28.2	100%	
P4	-0.7	36	93	39.9	89.1	124.6	84.7	95%	131.2	91.3	100%	
P4	0.7	41	-27.5	54.3	-40.8	14.2	-40.1	98%	13.5	-40.8	100%	

Tabla 6: Resumen de resultados para las pruebas de escalones de frecuencia - Estatismo de 2%

Notas:

(1): Reserva esperada teórica limitada debido a menor disponibilidad de recurso primaro en el momento de ejecución de las pruebas.

Las columnas "P. inicial teórica" y "R. esperada teórica" representan la potencia inicial esperada si se considera una frecuencia sistémica de 50 Hz y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial teórica" para el escalón de frecuencia que se indica en la columna " Δ f aplicado".

Las columnas "P. inicial real" y "R. esperada real" representan la potencia inicial al inicio del escalón de frecuencia² y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial real" para el escalón de frecuencia que se indica en la columna " Δ f aplicado", al cual se le debe restar la variación de frecuencia del sistema en el instante que se aplica el escalón.

² Dado que el control primario de frecuencia se encuentra activo para la realización de las pruebas, la potencia de la planta al inicio del ensayo en algunos casos es distinta a la potencia solicitada a la planta según el setpoint debido a las variaciones naturales de frecuencia de la red.

En las columnas "P. final" y "R. efectiva entregada" se indica la potencia entregada y la reserva efectiva desplegada (diferencia entre "P. final" y "P. inicial real") ante el escalón de frecuencia aplicado, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos desde el instante en que se aplicó el escalón de frecuencia. Por su parte, la columna "% de la reserva esperada" indica la proporción de la reserva esperada real que fue entregada por la planta ante el escalón de frecuencia, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos.



Figura 15: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ± 0.2 Hz - Estatismo de 2%



Figura 16: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ±0.7 Hz - Estatismo de 2%

6.3.2 Estatismo configurado en 4%

Los puntos de despacho ensayados y la reserva esperada a desplegar de acuerdo a un estatismo de 4% se presentan en la Tabla 3 para las desviaciones de ± 0.2 Hz y ± 0.7 Hz. En la Figura 17 y Figura 18 se presentan los resultados de los ensayos y se destaca, para cada ensayo, los siguientes puntos:

- Instante de inicio del despliegue de la reserva.
- Instante de llegada de la potencia a la banda de establecimiento de ±10%.
- Instante de 10 segundos desde el inicio del despliegue de la reserva.

Dado que el modo control de frecuencia se encontraba activo para realizar este tipo de ensayos, la planta se encontraba constantemente variando su potencia en función de las desviaciones naturales de frecuencia de la red. Por lo tanto, en la ejecución de algunos de los ensayos la potencia de la planta al inicio del despliegue de la reserva fue levemente distinta al punto de setpoint inicial configurado.

En la Tabla 7 se resumen los principales resultados de las pruebas para el estatismo configurado.

Punto de Despacho	∆f aplicado [Hz]	P. Inicial teórica [MW]	R. esperada teórica [MW]	P. inicial real [MW]	R. esperada real [MW]	P. final (10seg) [MW]	R. efectiva entregada (10seg) [MW]	% de la reserva esperada	P. final (5min) [MW]	R. efectiva entregada (5min) [MW]	% de la reserva esperada	Comentarios
P1	-0.2	86.6	12.3	82.8	16.1	98.4	15.6	97%	98.9	16.1	100%	
P1	0.2	86.6	-12.3	84.2	-9.9	74.5	-9.7	98%	74.3	-9.9	100%	
P1	-0.7	86.6	46.5	86.5	46.6	128.9	42.4	91%	131.1	44.6	96%	(1)
P1	0.7	86.6	-46.5	82.7	-42.6	40.0	-42.7	100%	39	-43.7	100%	
P2	-0.2	85	12.3	85.1	12.2	96.9	11.8	97%	97.3	12.2	100%	
P2	0.2	85	-12.3	92.5	-19.8	73.1	-19.5	98%	72.7	-19.8	100%	
P2	-0.7	85	46.5	86.5	45.0	128.2	41.8	93%	131.9	45.4	100%	
P2	0.7	85	-46.5	88.2	-49.7	39.0	-49.2	99%	37.4	-50.8	100%	
P3	-0.2	61	12.3	59.0	14.3	73.1	14.1	98%	73.3	14.3	100%	
P3	0.2	61	-12.3	58.9	-10.2	48.8	-10.1	99%	48.7	-10.2	100%	
P3	-0.7	61	46.5	57.5	50.1	105.6	48.1	96%	108.6	51.2	100%	
P3	0.7	61	-46.5	60.4	-45.9	14.2	-46.3	100%	13.4	-47.0	100%	
P4	-0.2	41	12.3	41.6	11.7	53.0	11.4	97%	53.3	11.7	100%	
P4	0.2	41	-12.3	48.2	-19.5	28.9	-19.3	99%	28.7	-19.5	100%	
P4	-0.7	41	46.5	44.1	43.4	86.7	42.6	98%	88.6	44.5	100%	
P4	0.7	41	-27.5	41.5	-28.0	14.2	-27.2	97%	13.9	-27.6	99%	

Tabla 7: Resumen de resultados para las pruebas de escalones de frecuencia - Estatismo de 4%

Notas:

(1): Reserva esperada teórica limitada debido a menor disponibilidad de recurso primaro en el momento de ejecución de las pruebas.

Las columnas "P. inicial teórica" y "R. esperada teórica" representan la potencia inicial esperada si se considera una frecuencia sistémica de 50 Hz y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial teórica" para el escalón de frecuencia que se indica en la columna " Δ f aplicado".

Las columnas "P. inicial real" y "R. esperada real" representan la potencia inicial al inicio del escalón de frecuencia³ y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial real" para el escalón de frecuencia que se

³ Dado que el control primario de frecuencia se encuentra activo para la realización de las pruebas, la potencia de la planta al inicio del ensayo en algunos casos es distinta a la potencia solicitada a la planta según el setpoint debido a las variaciones naturales de frecuencia de la red.

indica en la columna " Δ f aplicado", al cual se le debe restar la variación de frecuencia del sistema en el instante que se aplica el escalón.

En las columnas "P. final" y "R. efectiva entregada" se indica la potencia entregada y la reserva efectiva desplegada (diferencia entre "P. final" y "P. inicial real") ante el escalón de frecuencia aplicado, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos desde el instante en que se aplicó el escalón de frecuencia. Por su parte, la columna "% de la reserva esperada" indica la proporción de la reserva esperada real que fue entregada por la planta ante el escalón de frecuencia, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos.



Figura 17: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ±0.2 Hz - Estatismo de 4%



Figura 18: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ±0.7 Hz - Estatismo de 4%

6.3.3 Estatismo configurado en 8%

Los puntos de despacho ensayados y la reserva esperada a desplegar de acuerdo a un estatismo de 4% se presentan en la Tabla 4 para las desviaciones de ± 0.2 Hz y ± 0.7 Hz. En la Figura 19 y Figura 20 se presentan los resultados de los ensayos y se destaca, para cada ensayo, los siguientes puntos:

- Instante de inicio del despliegue de la reserva.
- Instante de llegada de la potencia a la banda de establecimiento de ±10%.
- Instante de 10 segundos desde el inicio del despliegue de la reserva.

Dado que el modo control de frecuencia se encontraba activo para realizar este tipo de ensayos, la planta se encontraba constantemente variando su potencia en función de las desviaciones naturales de frecuencia de la red. Por lo tanto, en la ejecución de algunos de los ensayos la potencia de la planta al inicio del despliegue de la reserva fue levemente distinta al punto de setpoint inicial configurado.

En la Tabla 8 se resumen los principales resultados de las pruebas para el estatismo configurado.

Dunto do	Afaplicado	P. Inicial	R. esperada	P. inicial	R. esperada	P. final	R. efectiva	% de la	P. final	R. efectiva	% de la	
Puillo de		teórica	teórica	real	real	(10seg)	entregada (10seg)	reserva	(5min)	entregada (5min)	reserva	Comentarios
Despacho	[[[2]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	esperada	[MW]	[MW]	esperada	
P1	-0.2	110	6.2	110.1	6.1	115.7	5.6	92%	116.2	6.1	100%	
P1	0.2	110	-6.2	109.0	-5.2	104.2	-4.8	93%	103.8	-5.2	100%	
P1	-0.7	110	21.6	112.6	19.0	129.8	17.2	90%	131.6	19.0	100%	(1)
P1	0.7	110	-23.3	110.9	-24.2	87.5	-23.4	97%	86.2	-24.7	100%	
P2	-0.2	86.6	6.2	87.8	5.0	92.6	4.8	96%	92.8	5.0	100%	
P2	0.2	86.6	-6.2	84.2	-3.8	80.5	-3.6	96%	80.4	-3.8	100%	
P2	-0.7	86.6	23.3	87.0	22.9	109.1	22.1	97%	110.4	23.4	100%	
P2	0.7	86.6	-23.3	86.6	-23.3	63.4	-23.2	100%	62.8	-23.8	100%	
P3	-0.2	61	6.2	61.4	5.8	67.2	5.8	100%	67.2	5.8	100%	
P3	0.2	61	-6.2	59.1	-4.3	55.0	-4.2	96%	54.8	-4.3	100%	
P3	-0.7	61	23.3	61.0	23.3	84.1	23.1	99%	84.8	23.8	100%	
P3	0.7	61	-23.3	60.2	-22.5	37.6	-22.6	100%	37.2	-23.0	100%	
P4	-0.2	41	6.2	39.5	7.7	47.2	7.6	99%	47.2	7.7	100%	
P4	0.2	41	-6.2	41.1	-6.3	34.9	-6.3	99%	34.8	-6.3	100%	
P4	-0.7	41	23.3	39.9	24.4	64.0	24.1	99%	64.8	24.9	100%	
P4	0.7	41	-23.3	42.8	-25.1	17.5	-25.3	100%	17.2	-25.6	100%	

Tabla 8: Resumen de resultados para las pruebas de escalones de frecuencia - Estatismo de 8%

Notas:

(1): Reserva esperada teórica limitada debido a menor disponibilidad de recurso primaro en el momento de ejecución de las pruebas.

Las columnas "P. inicial teórica" y "R. esperada teórica" representan la potencia inicial esperada si se considera una frecuencia sistémica de 50 Hz y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial teórica" para el escalón de frecuencia que se indica en la columna " Δ f aplicado".

Las columnas "P. inicial real" y "R. esperada real" representan la potencia inicial al inicio del escalón de frecuencia⁴ y la reserva esperada respecto del punto "P. inicial real" para el escalón de frecuencia que se indica en la columna " Δ f aplicado", al cual se le debe restar la variación de frecuencia del sistema en el instante que se aplica el escalón.

⁴ Dado que el control primario de frecuencia se encuentra activo para la realización de las pruebas, la potencia de la planta al inicio del ensayo en algunos casos es distinta a la potencia solicitada a la planta según el setpoint debido a las variaciones naturales de frecuencia de la red.

En las columnas "P. final" y "R. efectiva entregada" se indica la potencia entregada y la reserva efectiva desplegada (diferencia entre "P. final" y "P. inicial real") ante el escalón de frecuencia aplicado, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos desde el instante en que se aplicó el escalón de frecuencia. Por su parte, la columna "% de la reserva esperada" indica la proporción de la reserva esperada real que fue entregada por la planta ante el escalón de frecuencia, medido a los 10 segundos y a los 5 minutos.



Figura 19: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ±0.2 Hz - Estatismo de 8%



Figura 20: Ensayos de escalón de frecuencia - Escalones de ±0.7 Hz - Estatismo de 8%

6.3.4 Resumen y comentarios a los ensayos de escalones de frecuencia

Los resultados de los ensayos de escalones de frecuencia ante los diferentes estatismos configurados en la planta se presentan en la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8.

Respecto de los ensayos, se tienen las siguientes observaciones:

- En el caso de desviaciones de frecuencia ante condiciones de operación normal (ensayos de 0.2 Hz) la central Luz del Norte es capaz de entregar, al menos, el 88% de la reserva comprometida para CPF en 10 segundos desde el inicio de la activación y, al menos, el 99% de la reserva comprometida para CPF en 5 minutos desde el inicio de la activación.
- En el caso de desviaciones de frecuencia ante condiciones de contingencia (ensayos de 0.7 Hz) la central Luz del Norte es capaz de entregar, al menos, el 90% de la reserva comprometida para CPF en 10 segundos desde el inicio de la activación y, al menos, el 95% de la reserva comprometida para CPF en 5 minutos desde el inicio de la activación.
- 3. Debido a la variabilidad de la frecuencia durante el día de realización de los ensayos, se presentaron diferencias entre los puntos esperados de setpoint y los puntos de despacho reales en el instante en que se ejecutaron algunos ensayos.

Los montos de reserva esperados fueron corregidos de acuerdo a las desviaciones que se registraron.

4. El control primario de frecuencia de Luz del Norte responde de acuerdo a lo esperado para las desviaciones de frecuencia ensayadas.

6.4 Determinación del retardo inicial del sistema de control de frecuencia y tiempo de establecimiento

A partir de los registros asociados a los ensayos de escalón indicados en la sección 6.3 se determina el tiempo de inicio de activación y el tiempo de establecimiento de la respuesta de Luz del Norte. Se utilizará además la señal de setpoint del controlador de la planta obtenida desde el sistema SCADA.

En la Figura 21 y Figura 22 se ejemplifica la metodología de cálculo propuesta en base a lo indicado por el Coordinador en los instructivos técnicos.

Caso 1



Escalón -0.2 Hz (P3=61 MW) - Estatismo 2% - Tiempos

Figura 21: Determinación del tiempo de inicio de activación y del tiempo de establecimiento - Caso 1.

Dado que el SCADA cuenta con una resolución de muestreo máxima de 1 segundo, no es posible obtener el instante exacto donde ocurre la instrucción de desviación de frecuencia. Sin embargo, se puede tomar como criterio conservador que la instrucción fue enviada el segundo anterior al instante en que fue detectada por el SCADA. Para el ejemplo particular que se ilustra en la Figura 21, se considerará que el Timestamp de envío de instrucción es 16:46:55.00, lo que resultaría en un tiempo de inicio de activación de 0.2 segundos y un tiempo de establecimiento de 5.2 segundos.

El objetivo de estas mediciones es verificar que:

- El tiempo de inicio de activación es menor a 2 segundos, y
- El tiempo de establecimiento es menor a 30 segundos⁵.

Se considera entonces que la aproximación cumple el objetivo de determinar que la respuesta de Luz del Norte cumple las exigencias de la NTSyCS si en los resultados obtenidos se verifica lo indicado en los puntos anteriores.

⁵ Se considera este tiempo para que sea homologable a lo exigido a centrales térmicas o hidráulicas, ya que no existe un requerimiento para centrales solares en la NTSyCS.

Caso 2



Escalón +0.7 Hz (P2=86.6 MW) - Estatismo 2% - Tiempos

Figura 22: Determinación del tiempo de inicio de activación y del tiempo de establecimiento - Caso 2.

Dado que el SCADA cuenta con una resolución de muestreo máxima de 1 segundo, no es posible obtener el instante exacto donde ocurre la instrucción de desviación de frecuencia. Sin embargo, se puede tomar como criterio conservador que la instrucción fue enviada el segundo anterior al instante en que fue detectada por el SCADA. Para el ejemplo particular que se ilustra en la Figura 22, se considerará que el Timestamp de envío de instrucción es 11:44:11.00, lo que resultaría en un tiempo de inicio de activación de 1.44 segundos y un tiempo de establecimiento de 7.84 segundos.

El objetivo de estas mediciones es verificar que:

- El tiempo de inicio de activación es menor a 2 segundos, y
- El tiempo de establecimiento es menor a 30 segundos⁶.

Se considera entonces que la aproximación cumple el objetivo de determinar que la respuesta de Luz del Norte cumple las exigencias de la NTSyCS si en los resultados obtenidos se verifica lo indicado en los puntos anteriores.

Resultados

Los resultados de las mediciones de acuerdo a los criterios indicados en esta sección se presentan en la Tabla 9.

⁶ Se considera este tiempo para que sea homologable a lo exigido a centrales térmicas o hidráulicas, ya que no existe un requerimiento para centrales solares en la NTSyCS.

		т	iempo de	Activació	n	Tiempo de Establecimiento				
			(seg)				(S	eg)		
Escalón de Frecuencia [Hz]		-0.2 Hz	0.2 Hz	-0.7 Hz	0.7 Hz	-0.2 Hz	0.2 Hz	-0.7 Hz	0.7 Hz	
ala	P1	0.60	0.02	0.42	0.02	12.60	5.74	3.20	9.84	
20 ² 10	P2	0.30	0.10	0.12	1.44	8.94	5.98	4.62	9.28	
* atisn.	P3	0.20	1.00	0.82	0.92	5.20	5.68	0.82	6.96	
43	P4	0.12	0.46	0.50	0.58	5.64	5.84	10.10	7.34	
.1.	P1	0.92	1.12	0.82	1.04	7.32	5.22	5.76	6.52	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	P2	0.56	1.14	1.30	0.72	5.48	8.38	11.30	7.54	
* atist.	P3	1.00	0.74	0.60	0.88	5.92	4.26	5.80	6.88	
45	P4	0.22	0.46	0.92	1.16	1.52	6.16	5.18	5.86	
ala	P1	0.18	0.46	1.00	1.04	7.78	6.70	8.46	7.94	
	P2	0.36	0.64	1.20	0.84	4.54	2.98	7.06	5.90	
xatist.	P3	0.26	0.74	0.72	0.76	4.26	3.18	5.64	5.32	
45	P4	0.08	0.34	0.10	0.34	4.88	4.88	5.72	5.18	

Tabla 9: Tiempos de activación y tiempos de establecimiento - Ensayos de escalón de frecuencia.

De acuerdo a la metodología utilizada para la medición de tiempos de activación y tiempos de aporte, Luz del Norte cumple con la exigencia asociada a tiempos de activación y tiempos de establecimiento indicada en la NTSyCS.

6.5 Resumen de aportes al CPF

En la Tabla 10 se resume, para cada estatismo configurado, el aporte obtenido frente a perturbaciones en la frecuencia de distinta amplitud.

		Ap (orte a los [M % de la reserva	10 segund W] comprometida	los)	A (porte a lo [M] % de la reserva	s 5 minute W] comprometida	DS a)
Escalón de l	Frecuencia [Hz]	-0.2 Hz	0.2 Hz	-0.7 Hz	0.7 Hz	-0.2 Hz	0.2 Hz	-0.7 Hz	0.7 Hz
	D1	21.6	-24.3	18.1	-88.1	24.5	-25.0	17.7	-96.6
	PI	(88%)	(97%)	(100%)	(93%)	(100%)	(100%)	(97%)	(100%)
	50	22.5	-27.9	39.5	-69.9	24.6	-28.7	39.0	-72.9
de	FZ	(92%)	(97%)	(100%)	(95%)	(100%)	(100%)	(98%)	(99%)
20 ² 10	20	23.9	-24.2	67.5	-46.4	24.7	-24.6	74.1	-47.3
xatist.	гэ	(97%)	(98%)	(91%)	(97%)	(100%)	(100%)	(100%)	(99%)
45	D4	23.9	-27.8	84.7	-40.1	24.7	-28.2	91.3	-40.8
	P4	(97%)	(98%)	(95%)	(98%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
	Máximo Aporte	23.9	-27.9	84.7	-88.1	24.7	-28.7	91.3	-96.6
		15.6	-9.7	42.4	-42.7	16.1	-9.9	44.6	-43.7
	P1	(96%)	(97%)	(90%)	(100%)	(100%)	(100%)	(95%)	(100%)
		11.8	-19.5	41.8	-49.2	12.2	-19.8	45.4	-50.8
ala	PZ	(96%)	(98%)	(92%)	(99%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	50	14.1	-10.1	48.1	-46.3	14.3	-10.2	51.2	-47.0
* atist	P3	(98%)	(99%)	(96%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
45	D4	11.4	-19.3	42.6	-27.2	11.7	-19.5	44.5	-27.6
	P4	(97%)	(98%)	(98%)	(97%)	(100%)	(100%)	(100%)	(98%)
	Máximo Aporte	15.6	-19.5	48.1	-49.2	16.1	-19.8	51.2	-50.8
		5.6	-4.8	17.2	-23.4	6.1	-5.2	19.0	-24.7
	P1	(92%)	(92%)	(90%)	(96%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
		4.8	-3.6	22.1	-23.2	5.0	-3.8	23.4	-23.8
1-	P2	(95%)	(96%)	(96%)	(99%)	(100%)	(99%)	(100%)	(100%)
29 ⁶ /2		5.8	-4.2	23.1	-22.6	5.8	-4.3	23.8	-23.0
x atisf.	P3	(100%)	(96%)	(99%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
45	D4	7.6	-6.3	24.1	-25.3	7.7	-6.3	24.9	-25.6
	P4	(99%)	(99%)	(98%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
	Máximo Aporte	7.6	-6.3	24.1	-25.3	7.7	-6.3	24.9	-25.6

Tabla 10: Resumen de aportes al CPF de Luz del Norte.

El porcentaje que se indica en la Tabla 10 debajo de cada aporte representa la "eficiencia" en la entrega, medido como el cociente entre: 1) la cantidad de MW entregados a los 10 segundos o 5 minutos (según corresponda); y 2) la cantidad de MW máximos exigibles de acuerdo a la magnitud de desviación de la frecuencia.

De acuerdo a los ensayos realizados, el máximo aporte de Luz del Norte para desviaciones de frecuencia de operación normal (0.2 Hz), con estatismo 2% y banda muerta 25 mHz, corresponde a:

23.9 MW (con eficiencia de 97%) para desviaciones negativas de frecuencia y 27.9 MW (con eficiencia de 97%) para desviaciones positivas de frecuencia, a los 10 segundos desde la activación del servicio.

24.7 MW (con eficiencia de 100%) para desviaciones negativas de frecuencia y 28.7 MW (con eficiencia de 100%) para desviaciones positivas de frecuencia, a los 5 minutos desde la activación del servicio.

De acuerdo a los ensayos realizados, el máximo aporte de Luz del Norte para desviaciones de frecuencia en estado de contingencia (0.7 Hz), con estatismo 2% y banda muerta 25 mHz, corresponde a:

- 84.7 MW (con eficiencia de 95%) para desviaciones negativas de frecuencia y 88.1 MW (con eficiencia de 93%) para desviaciones positivas de frecuencia, a los 10 segundos desde la activación del servicio.
- 91.3 MW (con eficiencia de 100%) para desviaciones negativas de frecuencia y 96.6 MW (con eficiencia de 100%) para desviaciones positivas de frecuencia, a los 5 minutos desde la activación del servicio.

7 Conclusiones

Respecto de los ensayos para la verificación del Servicio Complementario de Control Primario de Frecuencia, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se concluye que el resultado de los ensayos fue satisfactorio, pues fue posible ensayar los distintos valores de banda muerta exigidos por la NT y la respuesta de Luz del Norte ante escalones de frecuencia para distintos valores de estatismo configurado.
- Durante las pruebas, el máximo tiempo de activación medido fue de 1.44 segundos y el máximo tiempo de establecimiento fue de 12.6 segundos. Dado que los tiempos exigidos por la NTSyCS son 2 segundos y 30 segundos, respectivamente, se verifica que Luz del Norte cumple con las exigencias en estos aspectos.
- Ante desviaciones de frecuencia en condiciones de operación normal, se comprobó satisfactoriamente mediante las pruebas que Luz del Norte puede entregar una reserva de CPF de 24.6 MW con una eficiencia de, al menos, 88% respecto del aporte de 10 segundos y 99% respecto del aporte de 5 minutos.
- Ante desviaciones de frecuencia en condiciones de contingencia, se comprobó satisfactoriamente mediante las pruebas que Luz del Norte puede entregar una reserva de CPF de 93 MW con una eficiencia de, al menos, 90% respecto del aporte de 10 segundos y 97% respecto del aporte de 5 minutos.

 Durante los ensayos de rampa de subida de carga, el día de los ensayos de CTF, ocurrió una pérdida del lazo de control de la planta. El sistema SCADA pasó de modo "Closed Loop" a modo "Open Loop" de manera no anticipada. Por seguridad ante este tipo de eventos, la planta toma parámetros de referencia asociados a configuraciones predeterminadas y no considera las instrucciones de control del sistema SCADA.

Este tipo de eventos:

- Podría significar un desempeño insuficiente si ocurre durante la entrega del CPF.
- Podría llevar al sistema a un estado de alerta o emergencia por el potencial desbalance entre oferta y demanda debido a la entrega de un CPF que no corresponde a la desviación de frecuencia que se está intentando de corregir mediante la acción de control.

Mediante los ensayos, se verifica que Luz del Norte es apto técnicamente para entregar el Servicio Complementario de Control Primario de Frecuencia. Sin embargo, es deseable que se corrija el error asociado a comunicaciones internas de la planta (indicado en el último punto de las conclusiones) para asegurar el desempeño correcto en la entrega del servicio.

8 Actas de pruebas

Se entregan archivos Excel correspondiente a las Actas de Prueba de los ensayos de los días 13-12-2022 y 14-12-2022.

9 Anexos

9.1 Anexo 1

Capacidad mínima técnica del parque fotovoltaico Luz del Norte.

La planta dispone de una configuración de control sobre los inversores que implica que un pequeño grupo se encuentra siempre generando a su potencia máxima disponible y fuera del modo "curtailment", estos se llaman inversores de referencia y representan el 9,88% de la potencia máxima disponible en cada instante.

Para recortes de generación con ocasión de la provisión de servicios complementarios u otros motivos que sean ordenados por el Coordinador, la planta no podrá bajar a menos de la potencia de estos inversores de referencia.

La metodología proviene del artículo *"Highly Accurate Method for Real-Time Active Power Reserve Estimation for Utility-Scale PV Power Plants"*⁷. La implementación de esta metodología en la planta se ilustra en la siguiente figura:

LDN total inverters: 172

Reference Inverters: 17 (9,88% of the plant capacity)

Block 01	Block 02	Block 03	Block 04
PCS-04-B	PCS-03-B	PCS-01-B	PCS-07-A
PCS-07-B	PCS-05-B	PCS-03-B	PCS-09-A
PCS-15-B	PCS-10-B	PCS-13-A	PCS-15-A
PCS-17-B	PCS-19-B	PCS-18-A	PCS-17-A
			PCS-19-A

 $N_{total} = 172$





Figure 1. Reference Inverters (Yellow).

$$\begin{split} P_{total.max}^{est} &= 6* \left(P_{PCS-19-B}^{Block\,02} + P_{PCS-19-A}^{Block\,04} \right) + 8* \left(P_{PCS-09-A}^{Block\,04} \right) + 10* \left(P_{PCS-04-B}^{Block\,01} + P_{PCS-01-B}^{Block\,03} + P_{PCS-13-A}^{Block\,02} + P_{PCS-05-B}^{Block\,02} + P_{PCS-10-B}^{Block\,02} + P_{PCS-17-A}^{Block\,04} \right) \\ &+ 12* \left(P_{PCS-07-B}^{Block\,01} + P_{PCS-15-B}^{Block\,01} + P_{PCS-17-B}^{Block\,02} + P_{PCS-18-A}^{Block\,03} + P_{PCS-07-A}^{Block\,04} + P_{PCS-15-A}^{Block\,04} \right) \\ &+ P_{PCS-15-A}^{Block\,04} + P_{PCS-15-A}^{Block\,04} + P_{PCS-15-A}^{Block\,04} + P_{PCS-15-A}^{Block\,04} \right) \end{split}$$

Figura 23: Metodología de inversores de referencia en planta Luz del Norte.

⁷ Gevorgian, Vahan. Highly Accurate Method for Real-Time Active Power Reserve Estimation for Utility-Scale Photovoltaic Power Plants. United States. <u>https://doi.org/10.2172/1505550</u>

9.2 Anexo 2

Placa característica de los inversores (Fuente: "319_Informe de Validacion NT PV LDN.pdf").

Technical Data	Sunny Central 800CP XT	
Input (DC)		
Max. DC power (@ cos φ =1)	898 kW	
Min. input voltage / max. input voltage	500 V / 1,000 V	
U _{Mee in} at I _{Mee} < I _{DC-re}	530 V	
MPP voltage range (@ 25°C / @ 50°C at 50 Hz) ^{1,2}	641 to 850 V / 583 to 850 V	
MPP voltage range (@ 25°C / @ 50°C at 60 Hz) ^{1,2}	641 to 850 V / 583 to 850 V	
Rated input voltage	641 V	
Max. input current	1,400 A	
Number of independent MPP inputs	1	
Number of DC inputs	9 / 32 (Optiprotect)	
Output (AC)		
Rated power (@ 25°C) / nominal AC power (@ 50°C)	880 kVA / 800 kVA	
Nominal AC voltage / nominal AC voltage range	360 V / 324 to 414 V	
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / 47 to 63 Hz	
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 360 V	
Max. output current / max. total harmonic distortion	1,411 A / 0.03	
Power factor at rated power / displacement power factor adjustable	1 / 0.9 leading to 0.9 lagging	
Feed-in phases / connection phases	3/3	
Efficiency ³		
Max. efficiency / European efficiency / CEC efficiency	98.6% / 98.4% / 98.5%	
Protective devices		
Input-side disconnection device	Motor-driven load-break switch / circuit break	er (Optiprot
Output-side disconnection device	AC circuit breaker	
DC overvoltage protection	Type I surge arrester	
Lightning protection (according to IEC 62305-1)	Lightning Protection Level III	
Stand-alone grid detection active / passive	• /-	
Grid monitoring	•	
Ground fault monitoring / remote-controlled ground fault monitoring	0/0	
Insulation monitoring	0	
Surge arrester for auxiliary power supply	•	
Protection class (according to IEC 62103) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	1/11	

General data		
Dimensions (W / H / D)	2,562 / 2,272 / 956 mm (101 / 89 / 38 inches)	
Weight in kg	1,900 kg / 4,200 lb	
Operating temperature range	-25 to +62°C / -13 to +144°F	
Noise emission ⁴	61 dB(A)	
Max. self-consumption (operation) ⁵ / self-consumption (night)	1,900 W / < 100 W	
External auxiliary supply voltage	230 / 400 V (3 / N / PE)	
Cooling concept	OptiCool	
Degree of protection: electronics / connection area (according to IEC 60529) /	IP54 / IP43 / 4C2, 4S2	
according to IEC 60721-3-4		
Application in unprotected outdoor environments / indoor	• / 0	
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	15 to 95%	
Maximum operating altitude above MSL 2,000 m / 4,000 m	•/ 0	
Fresh air consumption (inverter)	3,000 m³/h	
Features		
DC connection / AC connection	Ring terminal lug / screw terminal (Optiprotect) / ring terminal lug	
Display	HMI touch display	
Communication / protocols	Ethernet (optical fiber optional), Modbus	
Communication with Sunny String-Monitor	RS485 / none (Optiprotect)	
SC-COM / Plant monitoring	● / ○ (via Sunny Portal)	
Color enclosure / door / base / roof	RAL 9016 / 9016 / 7004 / 7004	
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 years	•/0/0/0/0	
Configurable grid management functions	Power reduction, reactive power setpoint, dynamic grid support (e.g. LVRT)	
Certificates and approvals (more available on request)	EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EMC conformity, CE conformity,	
	BDEW-MSRL / FGW / TR8 ⁶ , Arrêté du 23/04/08, R.D. 1663 / 2000,	
 Standard features Optional features Not available 	R.D. 661 / 2007, P.O. 12.3 / IEEE 15477	
Type designation	SC 800CP-10	

1) At 1.05 $U_{AC, num}$ and cos $\phi = 1$ 2) Further AC voltages, DC voltages and power classes can be configured (for more detailed information, see technical information "Innovations_CP" at www.SMA.de)

3) Efficiency measured without internal power supply

4) Sound pressure level at a distance of 10 m

5) Self-consumption at rated operation

6) With complete dynamic grid support

7) Designed and type-tested in accordance with IEEE 1547, serial tests optional available

9.3 Anexo 3

Se adjuntan como anexo los siguientes archivos:

- Base de datos DIgSILENT "LdN_model.pfd"
- Documento "Reference Inverters V4.pdf"
- Documento "PQ_PFV LUZ DEL NORTE.pdf"
- Documento "TL2988-A11-R03 Nameplate.pdf"
- Documento "EE-EN-2016-0142-RA_Informe_de_Validacion_NT_PV_Luz_del_Norte.pdf"
- Documento "pmu010000-sp-en-20210416-pmu-datasheet.pdf"
- Documento "INSTALACION BANCO DE CONDENSADORES LDN 06.04.16.pdf"
- Documento "DiagramaPQ_TMax.pdf"
- Archivo "DiagramaPQ_TMax.csv"