

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel Green Power
Colombia
Parque Fotovoltaico Fundación
Informe pruebas CNO 1830



CÓDIGO DE PROYECTO	EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME	EE-EN-2024-1460
REVISIÓN	A

23 sep. 24



Este documento **EE-EN-2024-1460-RA** fue preparado para Enel Green Power por el Grupo Estudios Eléctricos.

Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

Ing. Claudio Celman

Sub-Gerente Dpto. Ensayos e Ingeniería
claudio.celman@estudios-electricos.com

Ing. Andrés Capalbo

Sub-Gerente Dpto. Ensayos e Ingeniería
andres.capalbo@estudios-electricos.com

Ing. Pablo Rifrani

Gerente Dpto. Ensayos e Ingeniería
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 16 páginas y ha sido guardado por última vez el 23/09/2024 por Gerardo Guzmán; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	23.09.24	Para revisión	GG	AdP	PR

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



ÍNDICE

1	Introducción.....	4
	1.1 Definiciones	4
2	Información de la central	5
3	Ensayos a nivel planta	6
	3.1 Pruebas de verificación de modos de control.....	6
	3.1.1 Pruebas control tensión sin estatismo.....	7
	3.1.2 Pruebas control tensión con estatismo	8
	3.1.3 Pruebas control potencia reactiva.....	9
	3.1.4 Pruebas control factor de potencia	11
	3.2 Pruebas de verificación de recepción de consignas.....	13
	3.2.1 Recepción de consignas locales en modo control de tensión con estatismo	13
	3.2.2 Recepción de consignas remotas en modo control de tensión con estatismo	13
	3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva	13
	3.2.4 Recepción de consignas remotas en modo control de potencia reactiva.....	13
	3.2.5 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	14
	3.2.6 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	14
4	Conclusiones	15
5	Anexos	16
	5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión.....	16



1 Introducción

El presente informe resume los principales hallazgos durante la realización de los ensayos los días 4, 5 y 10 de septiembre de 2024 en el Parque Fotovoltaico Fundación, de acuerdo con los requerimientos planteados por el acuerdo CNO 1830, para la verificación del control de tensión de las plantas eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al STN y STR.

Se incluyen la totalidad de las pruebas realizadas, así como observaciones pertinentes a considerar, además de la respuesta del sistema ante el cambio en la referencia de los diferentes lazos de control de potencia reactiva tensión.

1.1 Definiciones

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
PELEC	Potencia eléctrica (activa)
QELEC	Potencia reactiva
ETERM	Tensión de terminales
FREC	Frecuencia
V	Tensión (Modo de control)
Q	Potencia reactiva (Modo de control)
FP	Factor de potencia (Modo de control)
POI	Punto de Interconexión

Tabla 1.1 – Tabla de nomenclaturas

- **Tiempo de establecimiento (Te):** Tiempo que tarda la señal en alcanzar y mantenerse dentro de una banda de $\pm 3\%$ del delta de cambio esperado alrededor de su valor final, ante una entrada escalón.
- **Tiempo de respuesta inicial (Tr):** Tiempo que tarda la señal en alcanzar un $\pm 3\%$ del delta de cambio esperado alrededor de su valor inicial, ante una entrada escalón.



2 Información de la central

El Parque Fotovoltaico Fundación, propiedad de Enel Green Power, se encuentra ubicado en el municipio Pivijay departamento de Magdalena. Está constituido por quinientos sesenta y tres (563) inversores, cada inversor puede entregar 215 kVA. La potencia instalada total del parque es de 117 MW, declarando una potencia máxima de 90 MW en la S/E Fundación 110 kV.

El parque está conectado a la S/E Fundación 110 mediante una línea de 6.529 km desde la subestación Caraballo 110. Cabe destacar que el PPC controla la tensión y la potencia reactiva en este punto, es decir, en el punto de interconexión.

Los datos de la central ensayada son los siguientes:

PF Fundación

Potencia Pico	132.192	MWp
Potencia en el POI	99.9	MW
Mínimo técnico	1	MW
Rango	98.9	MW
Inversores	HUAWEI SUN2000-215KTL-H0	-

Tabla 2.1 – Datos de la central



3 Ensayos a nivel planta

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

3.1 Pruebas de verificación de modos de control

Los ensayos consistieron en pruebas dinámicas de respuesta al escalón a los distintos modos de control implementados por el control conjunto de planta.

Se realizaron escalones de acuerdo con la Tabla 3.1, tal como lo establece el acuerdo CNO 1830.

<i>Modo de control</i>	<i>Número de escalones</i>	<i>Magnitud del escalón</i>
Control de tensión sin estatismo	Un escalón descendente en Pmin y un escalón ascendente a la Pmax disponible durante la prueba (Debe ser igual o superior al 80 % de la potencia nominal de la planta)	$\pm(1-5) \%$ en la tensión de referencia
Control de tensión con estatismo	Un escalón descendente en Pmin y un escalón ascendente a la Pmax disponible durante la prueba (Debe ser igual o superior al 80 % de la potencia nominal de la planta) en un valor medio del rango configurable del estatismo. Se debe reportar un documento del fabricante que especifique el rango en el que se puede configurar el estatismo. En caso de que no esté disponible se debe realizar adicionalmente la prueba en el mínimo y el máximo valor configurable del estatismo. En las pruebas se debe verificar que se obtiene la respuesta esperada según el estatismo definido para ello se debe calcular la relación entre la potencia reactiva y la tensión.	$\pm(1-5) \%$ en la tensión de referencia
Control de potencia reactiva	Un escalón ascendente en Pmin y un escalón descendente a la Pmax disponible durante la prueba (Debe ser igual o superior al 80 % de la potencia nominal de la planta) en la región inductiva y un escalón descendente a Pmin y un escalón ascendente a Pmax disponible durante la prueba en la región capacitiva.	$\pm(2-10) \%$ respecto a la potencia activa nominal
Control de factor de potencia	Un escalón ascendente en Pmin y un escalón descendente a la Pmax disponible durante la prueba (Debe ser igual o superior al 80 % de la potencia nominal de la planta) en la región inductiva y un escalón descendente a Pmin y un escalón ascendente a Pmax disponible durante la prueba en la región capacitiva.	Realizar un cambio en el FP que origine una variación en la potencia reactiva que esté entre $\pm(2-20) \%$ de la potencia activa nominal

Tabla 3.1 – Escalones realizados para la verificación de los modos de control



3.1.1 Pruebas control tensión sin estatismo

El día 04 de septiembre de 2023 se realiza un escalón descendente en potencia mínima y el día 10 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando y un escalón descendente en potencia de 10.5 MW en modo control de tensión sin estatismo. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "anexo_3_acuerdo1830_diligenciado.xlsx" en las hojas *Reg_Mod. cont. tensión sin est.*, *Tiempos resp cont. sin est.*, *Gráficas cont. tensión sin est.*, *Reg_Mod. cont. tensión sin es.A.*, *Tiempos resp cont. sin es.A* y *Gráficas cont. tensión sin es.A*.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 el tiempo de respuesta inicial y de establecimiento es calculado teniendo en cuenta el registro de potencia reactiva medida en el punto de interconexión a partir del cambio de referencia de tensión, en la Tabla 3.2 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos. La planta se limita en ± 1 MVar ante escalones del 1 % en la referencia de tensión, por lo que no es posible medir tiempos con escalones de tal tamaño en potencia mínima. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control V (PI)

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2.00	82.0	No	1.21	8.52
Descendente	-1.00	1.0	No	--	--
Descendente	-2.00	10.5	No	1.11	5.82
Resumen tiempos				1.21	8.52

Tabla 3.2 – Respuesta del control de tensión



3.1.2 Pruebas control tensión con estatismo

El día 4 de septiembre se realiza un escalón descendente en potencia mínima y en 10.05 MW y el día 10 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de tensión con estatismo. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "anexo_3_acuerdo1830_diligenciado.xlsx" en las hojas *Reg_Mod. cont. tensión con est.*, *Tiempos resp cont. con est.*, *Gráficas cont. tension con. est.*, *Reg_Mod. cont. tensión con es.A*, *Tiempos resp _est. cont. con es.A* y *Gráficas cont. tens con. es.A*.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 el tiempo de respuesta inicial y de establecimiento es calculado teniendo en cuenta el registro de potencia reactiva medida en el punto de interconexión a partir del cambio de referencia de tensión, en la Tabla 3.3 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos y en la Tabla 3.4 se especifica el estatismo calculado por cada escalón y el promedio. La planta se limita en ± 1 MVar ante escalones del 1 % en la referencia de tensión, por lo que no es posible medir tiempos con escalones de tal tamaño en potencia mínima. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	4.09	82.0	No	1.23	8.48
Descendente	-1.00	1.0	No	--	--
Descendente	-4.09	10.05	No	1.34	4.52
Resumen tiempos				1.34	8.48

Tabla 3.3 – Respuesta del control de tensión con estatismo

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Ajuste estatismo [%]	Estatismo calculado [%]
Ascendente	8.00	8.00
Descendente	8.00	--
Descendente	8.00	7.98
Promedio estatismo		7.99

Tabla 3.4 – Estatismo calculado



3.1.3 Pruebas control potencia reactiva

El día 4 de septiembre se realiza un escalón descendente en potencia mínima y en 10.05 MW y el día 10 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de potencia reactiva en la región inductiva, se realiza también el día 4 de septiembre un escalón descendente en potencia mínima y en 10.05 MW con la planta operando en modo control de potencia reactiva en la región capacitiva y el día 10 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de potencia reactiva en la región capacitiva. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "anexo_3_acuerdo1830_diligenciado.xlsx" en las hojas *Reg_Mod. cont. pot. react.*, *Tiempos resp_cont. pot. react.*, *Gráficas cont. pot. React.*, *Reg_Mod. cont. pot. react.A*, *Tiempos resp_cont. pot. react.A* y *Gráficas cont. pot. React.A*.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 el tiempo de respuesta inicial y de establecimiento es calculado teniendo en cuenta el registro de potencia reactiva medida en el punto de interconexión a partir del cambio de referencia potencia reactiva, en la Tabla 3.5 y en la Tabla 3.6 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva y capacitiva respectivamente. La planta se limita en ± 1 MVar ante escalones del 2 % en la referencia de potencia reactiva, por lo que no es posible medir tiempos con escalones de tal tamaño. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control potencia reactiva Q región inductiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2.00	1.0	No	--	--
Ascendente	2.00	10.05	No	0.27	4.32
Descendente	-5.00	82.0	No	0.68	9.35
Resumen tiempos				0.68	9.35

Tabla 3.5 – Respuesta del control de potencia reactiva región inductiva



Control potencia reactiva Q región capacitiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	5.00	82.00	No	0.94	4.81
Descendente	-2.00	1.00	No	--	--
Descendente	-5.01	10.05	No	0.42	2.26
Resumen tiempos				0.94	4.81

Tabla 3.6 – Respuesta del control de potencia reactiva región capacitiva



3.1.4 Pruebas control factor de potencia

El día 4 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia mínima y en 10.05 MW en la región inductiva, un escalón descendente en potencia mínima y en 10.05 MW en la región capacitiva con la planta operando en modo control de factor de potencia, el día 10 de septiembre se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de factor de potencia en la región capacitiva y un escalón descendente en potencia máxima disponible durante la prueba en la región inductiva. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "anexo_3_acuerdo1223_diligenciado.xlsx" en las hojas *Reg_Mod. cont. fp.*, *Tiempos resp. cont. fp.* y *Gráficas cont. fp.*, *Reg_Mod. cont. fp.A*, *Tiempos resp. cont. fp.A* y *Gráficas cont. fp.A*.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 el tiempo de respuesta inicial y de establecimiento es calculado teniendo en cuenta el registro de potencia reactiva medida en el punto de interconexión a partir del cambio de referencia potencia reactiva, en la Tabla 3.7 y en la Tabla 3.8 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva y capacitiva respectivamente. La planta se limita en ± 1 MVar ante escalones que muevan el 2% de la potencia reactiva respecto a la potencia nominal, por lo que no es posible medir tiempos con escalones de tal tamaño. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control factor de potencia FP región inductiva

Tipo de escalón	ΔQ [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	1.93	1.00	No	--	--
Ascendente	4.83	10.05	No	1.39	4.67
Descendente	-5.27	82.00	No	1.70	5.32
Resumen tiempos				1.70	5.32

Tabla 3.7 – Respuesta del control de factor de potencia región inductiva



Control factor de potencia FP región capacitiva

Tipo de escalón	ΔQ [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	5.29	82.00	No	1.32	3.24
Descendente	-1.95	1.00	No	--	--
Descendente	-4.80	10.05	No	1.56	3.60
Resumen tiempos				1.56	3.60

Tabla 3.8 – Respuesta del control de factor de potencia región capacitiva



3.2 Pruebas de verificación de recepción de consignas

3.2.1 Recepción de consignas locales en modo control de tensión con estatismo

El día 29 de febrero se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de tensión con estatismo con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo local. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo *"anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx"* en las hojas *Reg_Consignas tensión_local* y *Gráficas Consignas tensión_L*.

Cabe mencionar que la tensión no llega al valor de consigna debido a que el control de tensión con estatismo realiza un aporte fijo de potencia reactiva en función de la desviación en tensión con respecto a la tensión de referencia.

3.2.2 Recepción de consignas remotas en modo control de tensión con estatismo

El día 04 de junio se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de tensión con estatismo con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo remoto. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo *"anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx"* en las hojas *Reg_Consignas tensión_remota* y *Gráficas Consignas tensión_R*.

Cabe mencionar que la tensión no llega al valor de consigna debido a que el control de tensión con estatismo realiza un aporte fijo de potencia reactiva en función de la desviación en tensión con respecto a la tensión de referencia.

3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva

El día 29 de febrero se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de potencia reactiva con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo local. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo *"anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx"* en las hojas *Reg_Consignas pot. reac_L* y *Gráficas Consignas pot. reac_L*.

3.2.4 Recepción de consignas remotas en modo control de potencia reactiva

El día 04 de junio se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de potencia reactiva con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo remoto. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo *"anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx"* en las hojas *Reg_Consignas pot. reac_R* y *Gráficas Consignas pot. reac_R*.



3.2.5 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia

El día 29 de febrero se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de factor de potencia con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo local. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "*anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx*" en las hojas *Reg_Consignas de fp_L* y *Gráficas Consignas de fp_L*.

3.2.6 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia

El día 04 de junio se realizan escalones ascendentes y descendentes en la referencia del control de factor de potencia con el ánimo de verificar que la planta recibe y gestiona las consignas aplicadas de modo remoto. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo "*anexo_2_acuerdo1830_diligenciado.xlsx*" en las hojas *Reg_Consignas de fp_R* y *Gráficas Consignas de fp_R*.



4 Conclusiones

- El control de tensión sin estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.21 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 8.52 s.
- El control de tensión con estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado 1.34 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 8.58 s.
- El control de potencia reactiva tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.94 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 9.35 s.
- El control de factor de potencia tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.70 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 5.32 s.
- El parque gestiona de manera adecuada la recepción de consignas de manera local y remota.



5 Anexos

5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión

En la Figura 5.1 se muestra los valores configurables para el estatismo y la banda muerta del modo control de tensión con estatismo, los valores mostrados son tomados del documento "Fundación_GPM PPC certificate_EN.pdf".

Parameter	Range		Current Settings
	Minimum	Maximum	
Primary Voltage Statism [%]	4%	24%	8%
Primary Voltage regulation Deadband [V]	0 V	1,2 V	0 V
Primary Frequency Statism [%]	1%	7%	4%
Primary Frequency regulation Deadband [mHz]	0 mHz	150 mHz	30 mHz
Active power ramp [kW/min]	5.000 kW/min	15.000 kW/min	13.986 kW/min

Figura 5.1 - Rangos parametrizables de estatismo de tensión

El valor de banda muerta ajustado es de 0 kV y el valor de estatismo configurado es de 8%.