

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel Green Power
Colombia
Parque Solar El Paso
Informe pruebas CNO 1223



CÓDIGO DE PROYECTO	EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME	EE-EN-2023-1406
REVISIÓN	C

20 oct. 23



Este documento **EE-EN-2023-1406-RC** 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 13 páginas y ha sido guardado por última vez el 08/03/2024 por Sergio Suárez; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	20.10.23	Para revisión	GG	AdP	PR
B	27.10.23	Comentarios Enel Green Power	GG	AdP	PR
C	08.03.24	Cambio medición en POI	SS	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.....	10
	3.2 Pruebas de verificación de recepción de consignas	11
	3.2.1 Recepción de consignas locales en modo control de tensión con estatismo	11
	3.2.2 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva	11
	3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	11
4	Conclusiones.....	12
5	Anexos	13
	5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión	13



1 Introducción

El presente informe resume los principales hallazgos durante la realización de los ensayos los días 28 y 29 de febrero de 2024 en el Parque Solar El Paso, de acuerdo con los requerimientos planteados por el acuerdo CNO 1223, 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 (T_e):** 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 (T_r):** 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 El Paso, propiedad de Enel Green Power, se encuentra ubicado en el municipio El Paso departamento de Cesar. Está constituido por catorce (14) unidades de conversión, las cuales poseen cuatro (4) inversores donde cada inversor puede entregar 1415 kVA, y se tienen dos (2) transformadores elevadores de 0.64/33 kV de 3 MVA por cada unidad de conversión. La potencia instalada total del parque es de 99.93 MWp, totalizando así una potencia de 67.92 MW en la S/E El Paso 110 kV.

El parque está conectado a la S/E El Paso 110 kV mediante una línea de 6.41 km desde la subestación Cuna 110 kV. El PPC controla en la S/E El Paso 110 kV, es decir, en el punto de interconexión.

Los datos de la central ensayada son los siguientes:

PF El Paso

Potencia Pico	99.93	MWp
Potencia en el POI	67.92	MW
Mínimo técnico	6.972	MW
Rango	61.128	MW
Inversores	56 inversores SIEL de 1.415 MVA	-

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 1223.

Modo de control	Número de escalones	Magnitud del escalón
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)	± 2 % del valor instantáneo
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.	± 2 % del valor instantáneo
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.	± 2 % del valor instantáneo
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.	± 2 % del valor instantáneo

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



3.1.1 Pruebas control tensión sin estatismo

El día 29 de febrero de 2024 se realiza un escalón de tensión descendente con el parque despachado en potencia mínima y un escalón de tensión ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando 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_acuerdo1223_diligenciado.xlsx” en las hojas *Reg_Mod. cont. tensión sin est.*, *Tiempos resp cont. sin est.* y *Gráficas cont. tension sin. est.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1223 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. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control V (PI)

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	56	No	1.756	6.311
Descendente	2	56	No	1.866	6.128
Resumen tiempos				1.866	6.311

Tabla 3.2 – Respuesta del control de tensión



3.1.2 Pruebas control tensión con estatismo

El día 29 de febrero de 2024 se realiza un escalón de tensión descendente con el parque despachado en potencia mínima y un escalón de tensión 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_acuerdo1223_diligenciado.xlsx*” en las hojas *Reg_Mod. cont. tensión con est.*, *Tiempos resp cont. con est.* y *Gráficas cont. tension con. est.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1223 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. 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 [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	56	No	0.443	6.664
Descendente	2	56	No	1.031	7.084
Resumen tiempos				1.031	7.084

Tabla 3.3 – Respuesta del control de tensión con estatismo

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Ajuste estatismo [MVar/kV]	Estatismo calculado [MVar/kV]
Ascendente	6.00	5.99
Descendente	6.00	5.71
Promedio estatismo		5.85

Tabla 3.4 – Estatismo calculado



3.1.3 Pruebas control potencia reactiva

El día 28 de febrero de 2024 se realiza un escalón descendente de potencia reactiva en la región inductiva y un escalón ascendente de potencia reactiva en la región capacitiva con el parque despachado en potencia máxima disponible y operando en modo control de potencia reactiva. El día 29 de febrero de 2024 se realiza un escalón ascendente de potencia reactiva en la región inductiva y un escalón descendente en la región capacitiva con el parque despachado en potencia mínima y operando en modo de control de potencia reactiva. 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. pot. react.*, *Tiempos resp_cont. pot. react.* y *Gráficas cont. pot. react.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1223 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. 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 [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	60	No	0.424	8.735
Descendente	2	60	No	0.135	7.782
Resumen tiempos				0.424	8.735

Tabla 3.5 – Respuesta del control de potencia reactiva región inductiva

Control potencia reactiva Q región capacitiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	60	No	0.111	9.431
Descendente	2	60	No	0.701	9.170
Resumen tiempos				0.701	9.431

Tabla 3.6 – Respuesta del control de potencia reactiva región capacitiva



3.1.4 Pruebas control factor de potencia

Los días 28 y 29 de febrero de 2024 se realiza un escalón ascendente de factor de potencia en la región capacitiva y un escalón descendente de factor de potencia en la región inductiva con el parque despachado en potencia máxima disponible y operando en modo control de factor de potencia. También, se realiza un escalón ascendente de factor de potencia en la región inductiva y un escalón descendente en la región capacitiva con el parque despachado en potencia mínima y operando en modo control de factor de potencia. 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.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1223 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. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

Control factor de potencia FP región inductiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	60	No	1.096	9.114
Descendente	2	60	No	0.700	8.460
Resumen tiempos				1.096	9.114

Tabla 3.7 – Respuesta del control de potencia reactiva región inductiva

Control factor de potencia FP región capacitiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	Pmax al inicio [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	2	60	No	0.672	7.679
Descendente	2	60	No	1.127	9.813
Resumen tiempos				1.127	9.813

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 7 de octubre 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_acuerdo1223_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 locales en modo control de potencia reactiva

El día 7 de octubre 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_acuerdo1223_diligenciado.xlsx*” en las hojas *Reg_Consignas pot. reac_L* y *Gráficas Consignas pot. reac_L*.

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

El día 7 de octubre 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_acuerdo1223_diligenciado.xlsx*” en las hojas *Reg_Consignas de fp_L* y *Gráficas Consignas de fp_L*.



4 Conclusiones

- El control de tensión sin estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.87 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 6.31 s.
- El control de tensión con estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado 1.03 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.08 s.
- El control de potencia reactiva tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.7 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 9.43 s.
- El control de fator de potencia tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.13 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 9.81 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 "COM2020-06-10 REV00 EL PASO PPC Block Diagram and parameters.pdf".

VOLTAGE DROOP	Setpoint [kV]	PID gains		Droop parameters	
		PD QBP	PD QT _i	Deadband [kV]	Slope [MVar/kV]
Min value	99	Same values as for Reactive Power		0	0
Max value	121			10	20

Figura 5.1 - Rangos parametrizables de estatismo de tensión

El valor de banda muerta ajustado es de 0.3 kV y el valor de estatismo configurado es de 6 MVar/kV.