

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel
Colombia
Parque Solar La Loma
Informe pruebas CNO 1223



CÓDIGO DE PROYECTO EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2024-0313
REVISIÓN A

15 abr. 24



Este documento **EE-EN-2024-0313-RA** fue preparado para Enel 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 15 páginas y ha sido guardado por última vez el 15/04/2024 por Dagoberto Martínez; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	15.4.2024	Para presentar	DM	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 remotas en modo control de tensión con estatismo	11
	3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva	11
	3.2.4 Recepción de consignas remotas en modo control de potencia reactiva	11
	3.2.5 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	12
	3.2.6 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	12
4	Conclusiones	13
5	Anexos	14
	5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión	14



1 Introducción

El presente informe resume los principales resultados de las pruebas realizadas en el Parque Solar La Loma 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. Las pruebas efectuadas en los modos de control de tensión con estatismo, control de reactiva, control de factor de potencia y consignas locales y remotas fueron realizadas entre los días 6 al 7 de marzo del 2024 y 11 al 14 de marzo del 2024.

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

Término	Descripción
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 Solar La Loma se encuentra emplazado en el municipio de El Paso, en el departamento de Cesar, Colombia y posee un total de 407316 módulos fotovoltaicos de 460 Wp, teniendo una potencia instalada en DC de 187.36 MW con una capacidad efectiva neta de 150 MW.

El parque dispone de 172 inversores fotovoltaicos Santerno SUNWAY TG1800 1500V TE - 680, de 1885 kVA @45°C de capacidad. La red colectora del parque está compuesta por once alimentadores en 33 kV que colectan la potencia generada por los inversores del parque. Cada unidad de conversión posee dos inversores y estos se conectan a un transformador de bloque tridevanado de 3.8 MVA, 0.68/33 kV que interconecta la salida en BT de dos inversores con la red de MT.

Cuenta con una capacidad en AC de 162.064 MVA, y se conecta al sistema mediante una línea de 1.2 km desde la subestación Matepalma 110kV hasta La Loma 110 kV. El mínimo técnico de la planta se define en 7.5 MW y el máximo declarado 150 MW.



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 nominal
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 nominal
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 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.	± 2 % del valor nominal

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



3.1.1 Pruebas control tensión sin estatismo

Se realiza un escalón descendente en potencia mínima y un escalón ascendente a una potencia mayor al 80% de la potencia nominal 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_La_Loma_RA.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	2.0	121	No	1.91	3.37
Descendente	2.0	7.5	No	0.8	1.92
Resumen tiempos				1.91	3.37

Tabla 3.2 – Respuesta del control de tensión



3.1.2 Pruebas control tensión con estatismo

Se realizaron escalones descendentes en potencia mínima y escalones ascendente a una potencia mayor al 80% 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_La_Loma_RA.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	120.0	No	1.95	5.73
Descendente	2	7.5	No	0.57	5.14
Resumen tiempos				1.95	5.73

Tabla 3.3 – Respuesta del control de tensión con estatismo

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Ajuste estatismo, relación Q/V	Estatismo calculado, relación Q/V
Ascendente	12.5	12.57
Descendente	12.5	12.47
Promedio estatismo		12.52

Tabla 3.4 – Estatismo calculado

Cabe destacar que el estatismo consignado en el PPC se calcula como el recíproco de la pendiente calculada a partir de los ensayos, es decir, $Est = \frac{1}{12.5} \times 100 = 8\%$.



3.1.3 Pruebas control potencia reactiva

Se realiza un escalón ascendente (región inductiva), un escalón descendente (región capacitiva) en potencia mínima, un escalón ascendente (región capacitiva) y un escalón descendente (región inductiva) en potencia máxima disponible durante la prueba. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo “anexo_3_acuerdo1223_La_Loma_RA.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	7.5	No	1.55	2.16
Descendente	2	124.0	No	1.33	1.93
Resumen tiempos				1.55	2.16

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	82.63	No	1.19	8.33
Descendente	2	121.4	No	0.5	3.81
Resumen tiempos				1.19	8.33

Tabla 3.6 – Respuesta del control de potencia reactiva región capacitiva



3.1.4 Pruebas control factor de potencia

Se realiza un escalón ascendente (región inductiva), un escalón descendente (región capacitiva) en una potencia mayor a la potencia mínima, un escalón ascendente (región capacitiva) y un escalón descendente (región inductiva) en potencia máxima disponible durante la prueba. La respuesta de la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva se muestran en el documento anexo “anexo_3_acuerdo1223_La_Loma_RA.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	7.5	No	1.79	6.57
Descendente	2	123.94	No	1.82	2.45
Resumen tiempos				1.82	6.57

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	82.63	No	1.95	4.71
Descendente	2	120.36	No	0.39	7.17
Resumen tiempos				1.95	7.17

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 11 de marzo de 2024, 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_La_Loma_RA.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 11 de marzo de 2024, 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_acuerdo1223_La_Loma_RA.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 11 de marzo de 2024, 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_La_Loma_RA.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 11 de marzo de 2024, 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_acuerdo1223_La_Loma_RA.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 11 de marzo de 2024, 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_La_Loma_RA.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 11 de marzo de 2024, 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_La_Loma_RA.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 1.91 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 3.37 s.
- El control de tensión con estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado 1.95 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 5.73 s.
- El control de potencia reactiva tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.55 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 8.33 s.
- El control de factor de potencia tiene un tiempo de respuesta aproximado de 1.95 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.17 s.
- El parque gestiona de manera adecuada la recepción de consignas locales y remotas.



5 Anexos

5.1 Rango parametrizable de estadismo en tensión

En la Figura 5.1 se muestra los valores configurables para el estadismo de tensión. Estos valores son tomados del documento "CO201_LaLoma_PPC_parameters.pdf", suministrado por el fabricante del PPC.



Project CO201 – EGP – La Loma (Colombia)

Enertronica Santerno certifies that the following parameters configured in the Power Plant Controller (PPC) have been implemented and tested in the renewable solar plant in La Loma, Colombia:

Active Power Ramp			
Range	Minimum	12000	kW/min
	Maximum	30000	kW/min
Current setting		21000	kW/min

Primary Frequency Statism			
Range	Minimum	2	%
	Maximum	6	%
Current setting		4	%

Frequency Dead-band			
Range	Minimum	0	mHz
	Maximum	120	mHz
Current setting		30	mHz

Primary Voltage Statism			
Range	Minimum	1	%
	Maximum	30	%
Current setting		8	%

Castel Guelfo
April 11, 2024

Technical Director
Giampaolo Sgubbi

Giampaolo Sgubbi



Enertronica Santerno S.p.A.
7, Via della Concia - 40023 Castel Guelfo (BO) Italy | Ph. +39 0542 489711
Share Capital €785,560.60 fully paid-up | Tax Id. no. and VAT no. 05151831210 | BO Reg. no. 536234
PEC: enertronica@pec.it | info@santerno.com | www.enertronicasanterno.it

Figura 5.1 - Rangos parametrizables de estadismo de tensión

El valor de banda muerta ajustado es de 0.0 kV y el valor de estadismo configurado es de 8%.

