



**ESTUDIOS  
ELECTRICOS**

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

Enel Green Power  
Colombia  
Parque Fotovoltaico Fundación  
Informe pruebas CNO 1223



**CÓDIGO DE PROYECTO** EE-2021-055  
**CÓDIGO DE INFORME** EE-EN-2024-0498  
**REVISIÓN** A

**2 may. 24**



Este documento **EE-EN-2024-0498-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](mailto:claudio.celman@estudios-electricos.com)

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

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

Informe realizado en colaboración con todas las empresas del grupo: **Estudios Eléctricos S.A., Estudios Eléctricos Chile, Estudios Eléctricos Colombia y Electrical Studies Corp.**

Este documento contiene 14 páginas y ha sido guardado por última vez el 02/05/2024 por Gerardo Guzmán; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

<b>Revisión</b>	<b>Fecha</b>	<b>Comentarios</b>	<b>Realizó</b>	<b>Revisó</b>	<b>Aprobó</b>
<b>A</b>	02.05.24	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

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
	1.1 Definiciones .....	4
<b>2</b>	<b>Información de la central</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Ensayos a nivel planta</b> .....	<b>6</b>
	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.....	12
	3.2.1 Recepción de consignas locales en modo control de tensión con estatismo.....	12
	3.2.2 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva .....	12
	3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia.....	12
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>14</b>
	5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión .....	14



# 1 Introducción

El presente informe resume los principales hallazgos durante la realización de los ensayos el día 29 de febrero de 2024 y los días 18 al 22 de abril de 2024 en el Parque Fotovoltaico Fundación, de acuerdo con los requerimientos planteados por el acuerdo CON 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

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

<b>Potencia Pico</b>	132.192	MWp
<b>Potencia en el POI</b>	90	MW
<b>Mínimo técnico</b>	1	MW
<b>Rango</b>	89	MW
<b>Inversores</b>	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 1223.

<b>Modo de control</b>	<b>Número de escalones</b>	<b>Magnitud del escalón</b>
<b>Control de tensión sin estatismo</b>	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
<b>Control de tensión con estatismo</b>	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
<b>Control de potencia reactiva</b>	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
<b>Control de factor de potencia</b>	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 18 de abril de 2023 se realiza un escalón descendente en potencia mínima y el día 19 de abril se realiza un escalón 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. tensión 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	80.37	No	0.68	7.51
Descendente	2	80.37	No	1.68	4.96
<b>Resumen tiempos</b>				<b>1.68</b>	<b>7.51</b>

Tabla 3.2 – Respuesta del control de tensión



### 3.1.2 Pruebas control tensión con estadismo

El día 18 de abril se realiza un escalón descendente en potencia mínima y el día 22 de abril se realiza un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de tensión con estadismo. 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. tensión 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 estadismo calculado por cada escalón y el promedio. Se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico.

**Control tensión con estadismo 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	82.27	No	0.29	5.79
Descendente	2	82.27	No	0.34	7.57
<b>Resumen tiempos</b>				<b>0.34</b>	<b>7.57</b>

Tabla 3.3 – Respuesta del control de tensión con estadismo

**Control tensión con estadismo Q(V)**

Tipo de escalón	Ajuste estadismo [%]	Estadismo calculado [%]
Ascendente	8.00	8.07
Descendente	8.00	7.96
<b>Promedio estadismo</b>		<b>8.02</b>

Tabla 3.4 – Estadismo calculado



### 3.1.3 Pruebas control potencia reactiva

El día 18 de abril se realiza un escalón descendente en potencia mínima y el día 19 de abril 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 18 de abril un escalón descendente en potencia mínima con la planta operando en modo control de potencia reactiva en la región capacitiva y el día 20 de abril 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\_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	82.29	No	0.86	3.27
Descendente	2	82.29	No	0.67	6.80
<b>Resumen tiempos</b>				<b>0.86</b>	<b>6.80</b>

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	82.29	No	0.40	7.03
Descendente	2	82.29	No	0.72	3.41
<b>Resumen tiempos</b>				<b>0.72</b>	<b>7.03</b>

Tabla 3.6 – Respuesta del control de potencia reactiva región capacitiva



### 3.1.4 Pruebas control factor de potencia

El día 18 de abril se realiza un escalón ascendente en potencia mínima en la región inductiva y un escalón descendente en la región inductiva con potencia máxima disponible durante la prueba con la planta operando en modo control de factor de potencia, se realiza también un escalón descendente en potencia mínima con la planta operando en modo control de factor de potencia en la región capacitiva y el día 22 de abril 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. 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	82.25	No	--	--
Descendente	2	82.25	No	0.53	6.34

Tabla 3.7 – Respuesta del control de factor de potencia 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	82.25	No	0.61	6.32
Descendente	2	82.25	No	--	--

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



Debido a que un escalón del 2 % de FP realizado en carga baja representa un cambio pequeño en la potencia reactiva, no es posible ubicar la respuesta final dentro de una banda del 3 % del delta y medir claramente los tiempos de respuesta y de establecimiento. Para medir estos tiempos se realizó un escalón de mayor tamaño en ambas regiones. 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.A.*, *Tiempos resp. cont. fp.A.* y *Gráficas cont. fp.A.* En la Tabla 3.9 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva con un escalón en la referencia de FP de -0.23 a -0.38 y en la Tabla 3.10 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva con un escalón en la referencia de FP de 0.23 a 0.38. En la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 se toman los tiempos de mayor valor como definitivos por ser el caso crítico para cada región.

#### 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	15	82.25	No	0.40	5.82

Tabla 3.9 – Respuesta del control de factor de potencia región inductiva escalón de -0.23 a -0.38

#### 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]
Descendente	15	82.25	No	0.06	6.40

Tabla 3.10 – Respuesta del control de factor de potencia región inductiva escalón de 0.23 a 0.38

#### 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	15	82.25	No	0.40	5.82
Descendente	2	82.25	No	0.53	6.34
<b>Resumen tiempos</b>				<b>0.53</b>	<b>6.34</b>

Tabla 3.11 – Respuesta general 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	82.25	No	0.61	6.32
Descendente	15	82.25	No	0.06	6.40
<b>Resumen tiempos</b>				<b>0.61</b>	<b>6.40</b>

Tabla 3.12 – Respuesta general 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\_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 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\_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 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\_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 1.68 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.51 s.
- El control de tensión con estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado 0.34 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.57 s.
- El control de potencia reactiva tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.86 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.03 s.
- El control de fator de potencia tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.61 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 6.40 s.
- El parque gestiona de manera adecuada la recepción de consignas de manera local.



## 5 Anexos

### 5.1 Rango parametrizable de estadismo en tensión

En la Figura 5.1 se muestra los valores configurables para el estadismo y la banda muerta del modo control de tensión con estadismo, 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 Frecuency Statism [%]	1%	7%	4%
Primary Frecuency regulation Deadband [mHz]	0 mHz	150 mHz	30 mHz
Active power ramp [kW/min]	5.000 kW/min	15.000 kW/min	12.600 kW/min

Figura 5.1 - Rangos parametrizables de estadismo de tensión

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