

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel Green Power
Colombia
Parque Solar El Paso
Informe rampas operativas acuerdo
CNO 1741



CÓDIGO DE PROYECTO EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2023-1387
REVISIÓN A

18 oct. 23



Este documento **EE-EN-2023-1387-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 15 páginas y ha sido guardado por última vez el 18/10/2023 por Gerardo Guzmán; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	18.10.2023	Comentario	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 la característica de rampas operativas	6
	3.1.1 Mínimo valor de rampa	7
	3.1.1.1 Escalones ascendentes	7
	3.1.1.2 Escalones descendentes	8
	3.1.2 Un valor intermedio entre el mínimo valor de rampa y el 14 % Pn/min.....	9
	3.1.2.1 Escalones ascendentes	9
	3.1.2.2 Escalones descendentes	10
	3.1.3 Rampa de 14 % Pn/min	11
	3.1.3.1 Escalones ascendentes	11
	3.1.3.2 Escalones descendentes	12
	3.1.4 Máximo valor de rampa.....	13
	3.1.4.1 Escalones ascendentes	13
	3.1.4.2 Escalones descendentes	14
4	Conclusiones	15



1 Introducción

El presente informe resume los principales hallazgos durante la realización de los ensayos los días 5, 6 y 7 de octubre de 2023 en Parque Solar El Paso, de acuerdo con los requerimientos planteados por el acuerdo CON 1741, para la verificación de la característica de las rampas operativas 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 del control de potencia activa.

1.1 Definiciones

Término	Descripción
PELEC	Potencia eléctrica (activa)
QELEC	Potencia reactiva
ETERM	Tensión de terminales
FREC	Frecuencia
POI	Punto de Interconexión

Tabla 1.1 – Tabla de nomenclaturas



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 MW, totalizando así una potencia de 67.92 MW en la S/E El Paso 110.

El parque está conectado a la S/E El Paso 110 mediante una línea de 6.41 km desde la subestación Cuna 110.

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 a la característica de las rampas operativas del parque.

3.1 Pruebas de verificación de la característica de rampas operativas

Los ensayos consistieron en pruebas dinámicas de cambio de consigna en la referencia de potencia activa, para diferentes ajustes de rampa como son: mínimo valor de rampa, un valor intermedio entre el mínimo valor de rampa y el 14% Pn/min considerando la granularidad del ajuste, el 14% Pn/min, y el máximo valor que alcance si este es superior al 14% Pn/min.

El rango de rampas en que puede parametrizarse la planta de generación es entre 5.00 MW/min y 15.00 MW/min, siendo 9.51 MW/min el valor de operación normal, correspondiente a 14 %Pnom/min. El valor intermedio entre 5 MW/min y 9.51 MW/min utilizado es de 7.5 MW/min

Se realizaron escalones de acuerdo con la Tabla 3.1, tal como lo establece el acuerdo CNO 1741.

Rango disponible de generación (Potencia máxima disponible al momento de la prueba – Mínimo técnico)	Tamaño del escalón
Hasta 20 MW	40 – 100 % del tamaño del rango
Mayor a 20 MW y hasta 50 MW	40 – 50 % del tamaño del rango
Mayor a 50 MW y hasta 100 MW	20 – 30 % del tamaño del rango
Mayor a 100 MW y hasta 200 MW	10 – 20 % del tamaño del rango
Mayor a 200 MW	5 – 10 % del tamaño del rango

Tabla 3.1 – Tamaño del escalón según rango de generación



3.1.1 Mínimo valor de rampa

El mínimo valor configurable de rampa corresponde al 7.36 % Pn/min, esto es, 5.00 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 5 de octubre de 2023 a las 15:29 (UTC-5).

3.1.1.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_5MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. toma carg”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_5MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.2 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones ascendentes y las rampas operativas.

Escalones ascendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	5.0	7.35
2	12.23	20.0	5.0	7.40
3	12.23	20.0	5.0	7.32
4	12.23	20.0	5.0	7.35
5	12.23	20.0	5.0	7.23
Promedio			5.0	7.33
Desviación estándar				0.042
Coeficiente de variación				0.0084
Error entre valor ajustado y medido [%]				0.39

Tabla 3.2 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa mínima



3.1.1.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_5MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. descarga”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_5MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.3 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones descendentes y las rampas operativas.

Escalones descendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	-5.1	-7.45
2	12.23	20.0	-5.0	-7.42
3	12.23	20.0	-5.0	-7.38
4	12.23	20.0	-5.0	-7.42
5	12.23	20.0	-4.9	-7.28
Promedio			-5.0	-7.39
Desviación estándar				0.044
Coeficiente de variación				-0.0088
Error entre valor ajustado y medido [%]				0.38

Tabla 3.3 – Resumen cálculo de rampas descendentes – rampa mínima



3.1.2 Un valor intermedio entre el mínimo valor de rampa y el 14 % Pn/min

El valor intermedio entre el mínimo valor de rampa y el 14 % Pn/min escogido corresponde al 11.04 % Pn/min, es decir, 7.50 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 5 de octubre de 2023 a las 14:46 (UTC-5).

3.1.2.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_7.5MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. toma carg”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_7.5MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.4 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones ascendentes y las rampas operativas.

Escalones ascendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	7.4	10.86
2	12.23	20.0	7.5	11.02
3	12.23	20.0	7.4	10.89
4	12.23	20.0	7.4	10.86
5	12.23	20.0	7.4	10.92
Promedio			7.4	10.91
Desviación estándar				0.046
Coeficiente de variación				0.0062
Error entre valor ajustado y medido [%]				1.20

Tabla 3.4 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa intermedia



3.1.2.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_7.5MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. descarga”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_7.5MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.5 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones descendentes y las rampas operativas.

Escalones descendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	-7.4	-10.93
2	12.23	20.0	-7.5	-11.05
3	12.23	20.0	-7.5	-11.00
4	12.23	20.0	-7.4	-10.88
5	12.23	20.0	-7.5	-11.05
Promedio			-7.5	-10.98
Desviación estándar				0.050
Coeficiente de variación				-0.0066
Error entre valor ajustado y medido [%]				0.55

Tabla 3.5 – Resumen cálculo de rampas descendentes – rampa intermedia



3.1.3 Rampa de 14 % Pn/min

El valor de rampa de 14 % Pn/min corresponde a 9.51 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 6 de octubre de 2023 a las 15:01 (UTC-5).

3.1.3.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_9.51MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. toma carg”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_9.51MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.6 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones ascendentes y las rampas operativas.

Escalones ascendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	9.47	13.94
2	12.23	20.0	9.47	13.94
3	12.23	20.0	9.27	13.65
4	12.23	20.0	9.18	13.52
5	12.23	20.0	9.51	14.00
Promedio			9.38	13.81
Desviación estándar				0.145
Coeficiente de variación				0.015
Error entre valor ajustado y medido [%]				1.38

Tabla 3.6 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa 14 % Pn/min



3.1.3.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_9.51MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. descarga”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_9.51MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.7 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones descendentes y las rampas operativas.

Escalones descendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	-9.45	-13.91
2	12.23	20.0	-9.48	-13.96
3	12.23	20.0	-9.45	-13.91
4	12.23	20.0	-9.31	-13.71
5	12.23	20.0	-9.40	-13.84
Promedio			-9.42	-13.87
Desviación estándar				0.066
Coeficiente de variación				-0.0070
Error entre valor ajustado y medido [%]				0.96

Tabla 3.7 – Resumen cálculo de rampas descendentes – rampa 14 % Pn/min



3.1.4 Máximo valor de rampa

El máximo valor de rampa configurable corresponde al 22.08 % Pn/min, esto es, 15.00 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 7 de octubre de 2023 a las 08:00 (UTC-5).

3.1.4.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_15MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. toma carg”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_15MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.8 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones ascendentes y las rampas operativas.

Escalones ascendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	14.83	21.83
2	12.23	20.0	14.81	21.80
3	12.23	20.0	15.61	22.99
4	12.23	20.0	14.62	21.53
5	12.23	20.0	14.74	21.71
Promedio			14.92	21.97
Desviación estándar				0.39
Coeficiente de variación				0.026
Error entre valor ajustado y medido [%]				0.51

Tabla 3.8 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa máxima



3.1.4.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 20 % del tamaño del rango. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo1741_15MW_min.xlsx” en la hoja “Gráficas cálculo vel. descarga”. Los registros en formato .txt de las variables medidas durante el ensayo se presenta en el archivo anexo “anexo_5_acuerdo1741_15MW_min_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1741, en la Tabla 3.9 se presentan los cálculos correspondientes a los escalones descendentes y las rampas operativas.

Escalones descendentes

Número del escalón	Tamaño del escalón [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	12.23	20.0	-14.77	-21.74
2	12.23	20.0	-14.61	-21.51
3	12.23	20.0	-14.62	-21.53
4	12.23	20.0	-14.89	-21.93
5	12.23	20.0	-14.86	-21.88
Promedio			-14.75	-21.72
Desviación estándar				0.13
Coeficiente de variación				-0.0089
Error entre valor ajustado y medido [%]				1.66

Tabla 3.9 – Resumen cálculo de rampas descendentes – rampa máxima



4 Conclusiones

- Las rampas operativas son estables para los diferentes valores configurados para los ensayos, dentro del rango configurable.
- El valor del coeficiente de variación de las rampas siempre es inferior al 15 %.
- La diferencia entre el promedio de los valores de rampa obtenidos y el valor de rampa ajustada es siempre menor al 2 %.
- El rango parametrizable de las rampas es entre 5 MW/min y 15 MW/min.