

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel
Colombia
Parque Solar La Loma
Informe rampas operativas acuerdo
CNO 1826



CÓDIGO DE PROYECTO EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2024-0312
REVISIÓN B

9 may. 24



Este documento **EE-EN-2024-0312-RB** 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 16 páginas y ha sido guardado por última vez el 09/05/2024 por Julián Arismendy; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	15.4.2024	Comentario	DM	AdP	PR
B	9.5.2024	Actualización acuerdo CNO 1826	JM	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
5	Anexos	16
	5.1 Rango parametrizable de rampas operativas.....	16



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 1826, 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 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 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 8 %Pn/min (mínima rampa) y 20 %Pn/min (máxima rampa). El valor nominal es de 14 %Pn/min y valor intermedio se selecciona en 10 %Pn/min.

Se realizaron escalones de acuerdo con la Tabla 3.1, tal como lo establece el acuerdo CNO 1826.

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 8% Pn/min.

3.1.1.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (4) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango disponible de generación y un (1) escalón ascendente del 10% del tamaño del rango en función a la potencia disponible al momento de la prueba. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en el archivo “anexo_5_acuerdo_1826_8_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_8_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	10,100	50,500	20,000	11,748	7,832
2	10,100	50,500	20,000	11,849	7,899
3	10,100	50,500	20,000	11,861	7,908
4	10,100	50,500	20,000	11,711	7,807
5	11,550	115,500	10,000	12,070	8,046
Promedio				11,848	7,899
Desviación estándar					0,140
Coeficiente de variación					0,012
Error entre valor ajustado y medido [%]					1.268

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 disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en el archivo “anexo_5_acuerdo_1826_8_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_8_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	10,100	50,500	20,000	-11,966	-7,977
2	10,100	50,500	20,000	-11,808	-7,872
3	10,100	50,500	20,000	-11,867	-7,912
4	10,100	50,500	20,000	-11,938	-7,958
5	10,100	50,500	20,000	-11,692	-7,794
Promedio				-11,854	-7,903
Desviación estándar					0,110
Coeficiente de variación					-0,009
Error entre valor ajustado y medido [%]					1,215%

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 10% Pn/min.

3.1.2.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_10_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_10_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	13,500	67,500	20,000	14,603	9,735
2	13,500	67,500	20,000	14,967	9,978
3	13,500	67,500	20,000	14,673	9,782
4	13,500	67,500	20,000	14,784	9,856
5	13,500	67,500	20,000	14,738	9,825
Promedio				14,753	9,835
Desviación estándar					0,138
Coeficiente de variación					0,009
Error entre valor ajustado y medido [%]					1,647

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 disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_10_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_10_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	13,500	67,500	20,000	-15,047	-10,031
2	13,500	67,500	20,000	-14,930	-9,953
3	13,500	67,500	20,000	-14,768	-9,845
4	13,500	67,500	20,000	-14,954	-9,970
5	13,500	67,500	20,000	-14,717	-9,811
Promedio				-14,883	-9,922
Desviación estándar					0,137
Coeficiente de variación					-0,009
Error entre valor ajustado y medido [%]					0,779

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 es el ajuste de rampa nominal de la planta.

3.1.3.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_14_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_14_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	13,500	67,500	20,000	20,885	13,924
2	13,500	67,500	20,000	20,801	13,867
3	13,500	67,500	20,000	20,729	13,819
4	13,500	67,500	20,000	20,691	13,794
5	13,500	67,500	20,000	20,568	13,712
Promedio				20,735	13,823
Desviación estándar					0,119
Coeficiente de variación					0,006
Error entre valor ajustado y medido [%]					1,263

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 disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_14_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_14_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	13,500	67,500	20,000	-20,916	-13,944
2	13,500	67,500	20,000	-20,674	-13,783
3	13,500	67,500	20,000	-21,094	-14,063
4	13,500	67,500	20,000	-20,553	-13,702
5	13,500	67,500	20,000	-20,960	-13,973
Promedio				-20,840	-13,893
Desviación estándar					0,221
Coeficiente de variación					-0,011
Error entre valor ajustado y medido [%]					0,764

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 20 % Pn/min.

3.1.4.1 Escalones ascendentes

Se realizaron dos (2) escalones ascendentes del 40 % y tres (3) escalones ascendentes del 20 % del tamaño del rango en función a la potencia disponible al momento de la prueba. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_20_La_Loma_RB.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_acuerdo_1826_20_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	17,000	42,500	40,00	29,152	19,435
2	17,000	42,500	40,00	29,543	19,695
3	10,100	50,500	20,00	29,757	19,838
4	10,100	50,500	20,00	30,519	20,346
5	10,100	50,500	20,00	29,808	19,872
Promedio				29,756	19,837
Desviación estándar					0,499
Coeficiente de variación					0,017
Error entre valor ajustado y medido [%]					0,814

Tabla 3.8 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa máxima



3.1.4.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 40 % del tamaño del rango disponible de generación. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo “anexo_5_acuerdo_1826_20_La_Loma_RBxlsx” 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_acuerdo_1826_20_La_Loma_RB_registros”.

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1826, 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]	Potencia Disponible [MW]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	17,000	42,500	40,000	-29,983	-19,989
2	17,000	42,500	40,000	-30,955	-20,636
3	17,000	42,500	40,000	-29,378	-19,585
4	17,000	42,500	40,000	-29,608	-19,738
5	17,000	42,500	40,000	-29,827	-19,884
Promedio				-29,950	-19,967
Desviación estándar					0,606
Coeficiente de variación					-0,020
Error entre valor ajustado y medido [%]					0,166

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 8%P_{nom}/min y 20%P_{nom}/min.



5 Anexos

5.1 Rango parametrizable de rampas operativas

En la Figura 5.1 se muestra los valores configurables para las rampas operativas; los valores mostrados son tomados del documento “CO201_LaLoma_PPC_parameters.pdf”, suministrado por el fabricante.



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. Rango parametrizable de rampas operativas

El valor nominal de rampas configurado es de 14 %Pn/min y el rango configurable es de 8% Pn – 20% Pn.