



**ESTUDIOS
ELECTRICOS**

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Canadian Solar
Colombia
Parque Fotovoltaico Caracolí
Informe rampas operativas acuerdo
CNO 1826



CÓDIGO DE PROYECTO EE-2021-055
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2024-1607
REVISIÓN A

3 oct. 24



Este documento **EE-EN-2024-1607-RA** fue preparado para Canadian Solar 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 03/10/2024 por Jesús Mañozca; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	03.10.2024	Para revisión	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 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 el día 20 de septiembre de 2024 en el Parque Fotovoltaico Caracolí, de acuerdo con los requerimientos planteados por el Acuerdo CNO 1826, para la verificación de la característica de las rampas operativas de las plantas 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 Caracolí, propiedad de Canadian Solar, se ubica en el municipio de Soledad, departamento del Atlántico, Colombia. Está constituido por diecisiete (17) inversores SUNGROW SG3125HV-MV-30, cada inversor puede entregar 3437 kVA. La potencia instalada total del parque es de 50 MW.

El parque está conectado a la S/E Caracolí 110 kV mediante una línea de 6.59 km desde la subestación ubicada a la salida del parque solar Caracolí. 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:

Parque Fotovoltaico Caracolí		
Potencia Pico	56.07	MWp
Potencia en el POI	50.0	MW
Mínimo técnico	5	MW
Rango	45.0	MW
Inversores	SUNGROW SG3125HV-MV- 30,	-

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 parametrizable en la planta de generación es entre 4.75 MW/min y 9.5 MW/min, siendo 7 MW/min el valor de operación normal, correspondiente a 14 %Pnom/min. El valor intermedio entre 4.75 MW/min y 7 MW/min utilizado es de 5.55 MW/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 9.5 % Pn/min, esto es, 4.75 MW/min. Con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 20 de septiembre de 2024 a las 12:02 (UTC-5).

3.1.1.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 80 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_9.5_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_9.5_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	5.0	80,000	4,638	9,277
2	5,0	80,000	4,738	9,476
3	5.0	80,000	4,743	9,486
4	5,0	80,000	4,595	9,190
5	5.0	80,000	4,779	9,558
Promedio			4,699	9,397
Desviación estándar				0,078
Coeficiente de variación				0,017
Error entre valor ajustado y medido [%]				1.080

Tabla 3.2 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa mínima



3.1.1.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 80 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_9.5_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_9.5_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	4,000	80,000	-4,691	-9,381
2	4,000	80,000	-4,572	-9,144
3	4,000	80,000	-4,929	-9,858
4	4,000	80,000	-4,678	-9,355
5	4,000	80,000	-4,687	-9,374
Promedio			-4,711	-9,423
Desviación estándar				0,131
Coeficiente de variación				-0,028
Error entre valor ajustado y medido [%]				0,814

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 11.1 % Pn/min, es decir, 5.55 MW/min. Con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 20 de septiembre de 2024 a las 11:57 (UTC-5).

3.1.2.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 46.7 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo *"anexo_5_acuerdo1826_11.4_Caracolí_RA"* 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_acuerdo1826_11.4_Caracolí_RA"*.

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	7,000	46,667	5,341	10,683
2	7,000	46,667	5,643	11,285
3	7,000	46,667	5,747	11,493
4	7,000	46,667	5,613	11,227
5	7,000	46,667	5,654	11,308
Promedio			5,600	11,199
Desviación estándar				0,153
Coeficiente de variación				0,027
Error entre valor ajustado y medido [%]				0,892%

Tabla 3.4 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa intermedia



3.1.2.2 Escalones descendentes

Se realizaron cinco (5) escalones descendentes del 46.7 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_11.4_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_11.4_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	7,000	46,667	-5,702	-11,404
2	7,000	46,667	-5,989	-11,979
3	7,000	46,667	-5,715	-11,430
4	7,000	46,667	-5,533	-11,067
5	7,000	46,667	-5,851	-11,701
Promedio			-5,758	-11,516
Desviación estándar				0,171
Coeficiente de variación				-0,030
Error entre valor ajustado y medido [%]				1,020 %

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 7 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 20 de septiembre de 2024 a las 12:11 (UTC-5).

3.1.3.1 Escalones ascendentes

Se realizaron cinco (5) escalones ascendentes del 40 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo *"anexo_5_acuerdo1826_14_Caracolí_RA"* 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_acuerdo1826_14_Caracolí_RA"*.

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	8,000	40,000	6,906	13,812
2	8,000	40,000	7,024	14,048
3	8,000	40,000	6,963	13,925
4	8,000	40,000	6,936	13,871
5	8,000	40,000	6,887	13,775
Promedio			6,943	13,886
Desviación estándar				0,054
Coeficiente de variación				0,008
Error entre valor ajustado y medido [%]				0,812%

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 40 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_13_986_14_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_14_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	8,000	40,000	-6,919	-13,839
2	8,000	40,000	-6,866	-13,732
3	8,000	40,000	-6,881	-13,762
4	8,000	40,000	-6,920	-13,840
5	8,000	40,000	-6,865	-13,730
Promedio			-6,890	-13,781
Desviación estándar				0,028
Coeficiente de variación				-0,004
Error entre valor ajustado y medido [%]				1,566%

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 19 % Pn/min, esto es, 9.5 MW/min; con este valor de rampa se hicieron los siguientes escalones, el día 20 de septiembre de 2024 a las 12:18 (UTC-5).

3.1.4.1 Escalones ascendentes

Se realizaron un (1) escalón ascendente del 42.1 % y cuatro (4) del 50 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_19.0_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_19.0_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	16,000	42,105	9,406	18,812
2	10,000	50,000	9,393	18,785
3	10,000	50,000	9,344	18,688
4	10,000	50,000	9,322	18,645
5	10,000	50,000	9,330	18,660
Promedio			9,359	18,718
Desviación estándar				0,038
Coeficiente de variación				0,004
Error entre valor ajustado y medido [%]				1,485%

Tabla 3.8 – Resumen cálculo de rampas ascendentes – rampa máxima



3.1.4.2 Escalones descendentes

Se realizaron un (1) escalón descendente del 42.1 % y cuatro (4) del 50 % del tamaño del rango disponible. Se puede evidenciar la dinámica de la planta ante los escalones aplicados en archivo "anexo_5_acuerdo1826_19.0_Caracolí_RA" 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_acuerdo1826_19.0_Caracolí_RA".

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]	Tamaño del escalón [%]	Velocidad [MW/min]	Velocidad [%Pnom/min]
1	16,000	42,105	-9,392	-18,784
2	10,000	50,000	-9,443	-18,885
3	10,000	50,000	-9,363	-18,725
4	10,000	50,000	-9,319	-18,638
5	10,000	50,000	-9,300	-18,601
Promedio			-9,363	-18,727
Desviación estándar				0,057
Coeficiente de variación				-0,006
Error entre valor ajustado y medido [%]				1,438%

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 4.75 MW/min y 9.5 MW/min.