

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Ventus
Colombia
Parque Fotovoltaico Palmira1
Informe pruebas CNO 1830

VENTUS

CÓDIGO DE PROYECTO EE-2022-029
CÓDIGO DE INFORME EE-EN-2024-1749
REVISIÓN A

15 nov. 24



Este documento **EE-EN-2024-1749-RA** fue preparado para Ventus 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 15/11/2024 por Dagoberto Martínez; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	15.11.2024	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 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	11
	3.2 Pruebas de verificación de recepción de consignas.....	13
	3.2.1 Recepción de consignas locales en modo control de tensión con estatismo	13
	3.2.2 Recepción de consignas remotas en modo control de tensión con estatismo	13
	3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva	13
	3.2.4 Recepción de consignas remotas en modo control de potencia reactiva.....	13
	3.2.5 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia	13
	3.2.6 Recepción de consignas remotas en modo control de factor de potencia.....	13
4	Conclusiones	14
5	Anexos	15
	5.1 Rango parametrizable de estatismo en tensión.....	15



1 Introducción

El presente informe resume los principales hallazgos durante la realización de los ensayos los días 7 y 8 de octubre de 2024 en el Parque Fotovoltaico Palmira1, de acuerdo con los requerimientos planteados por el acuerdo CNO 1830, para la verificación del control de tensión 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 de los diferentes lazos de control de potencia reactiva tensión.

1.1 Definiciones

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
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
POM	Punto de Medición

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 ± 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 ± 3 % del delta de cambio esperado alrededor de su valor inicial, ante una entrada escalón.



2 Información de la central

El Parque Fotovoltaico Palmira1, propiedad de CELSIA, se encuentra ubicado en el municipio de Palmira, departamento de Valle del Cauca, Colombia y posee una potencia instalada en DC (de sus siglas en inglés 'Direct Current') de 22.36 MW con una capacidad efectiva neta en el punto de medición POM de 19.9 MW; posee 104 inversores de 0.215 MVA de capacidad cada uno

El parque dispone de 4 estaciones de transformación que interconectan la red de BT con la de MT a través de un transformador de tres devanados de 6.5 MVA, 0.8/0.8/34.5 kV, donde cada devanado de baja tensión es conectado a un string de inversores. Los inversores que conforman los strings son marca HUAWEI modelo SUN2000-215KTL-H0 de 215 kVA de potencia aparente. La red colectora del parque está compuesta por un sólo alimentador en 34.5 kV que colectan la potencia generada por los inversores del parque. El parque se conecta al sistema a través de la S/E Guachal en 115 kV.

Los datos de la central ensayada son los siguientes:

Parque Solar Palmira 1

Potencia en el POM	19.9	MWp
Potencia en el POI	0	MW
Mínimo técnico	0.0	MW
Rango	18 ¹	MW
Inversores	104 inversores de 0.215 MVA cada uno	-

Tabla 2.1 – Datos de la central

¹ El rango de operación del parque se define en función de la carga típica conectada al parque, la cual toma toda la potencia generada del parque. Durante la visita se encontró que este rango esta entre 0 y 18 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 1830.

<i>Modo de control</i>	<i>Número de escalones</i>	<i>Magnitud del escalón</i>
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, excepto para los autogeneradores eólicos y solares que no entregan excedentes)	$\pm(1-5) \%$ en la tensión de referencia
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, excepto para los autogeneradores eólicos y solares que no entregan excedentes) 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.	$\pm(1-5) \%$ en la tensión de referencia
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, excepto para los autogeneradores eólicos y solares que no entregan excedentes) en la región inductiva y un escalón descendente a Pmin y un escalón ascendente a Pmax disponible durante la prueba en la región capacitiva.	$\pm(2-10) \%$ respecto a la potencia activa 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, excepto para los autogeneradores eólicos y solares que no entregan excedentes) en la región inductiva y un escalón descendente a Pmin y un escalón ascendente a Pmax disponible durante la prueba en la región capacitiva.	Realizar un cambio en el FP que origine una variación w_n la potencia reactiva que esté entre $\pm(2-20) \%$ de la potencia activa nominal

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



Para el caso de los autogeneradores eólicos y solares que no entregan excedentes la prueba se realizará entre el mínimo técnico a la salida de la planta y el valor de la carga al momento de la prueba, de tal manera que no se entreguen excedentes en el punto de conexión. En este caso la carga es la que está asociada al autogenerador bajo prueba.

3.1.1 Pruebas control tensión sin estatismo

Dada la baja influencia que la central de generación tiene sobre la estabilidad de la tensión en la SE Guachal 115 kV, debido a su alta capacidad de corto circuito, no fue posible realizar la sintonización del lazo de control de tensión sin estatismo. Esto debido a que ante el mínimo cambio en la referencia del lazo, la señal de control se satura, lo que provoca que la planta alcance los límites de su curva de capacidad sin afectar significativamente la tensión en el punto de interconexión, pero generando variaciones considerables en la tensión a nivel de 34.5 kV.

El ensayo presentado en las figuras del documento anexo “EE-2022-029_anexo_3_acuerdo_1830_Palmira 1” en las hojas *Reg. Mod. cont. tensión sin est.*, *Tiempos resp cont. sin est.*, *Gráficas cont. tensión sin. est.*, ilustra esta situación: ante un escalón descendente en la referencia de tensión del lazo de control, se observa un movimiento de aproximadamente 14.6 MVA_r, recorriendo toda la curva de capacidad sin provocar un cambio significativo en la tensión de 115 kV, que apenas varía un 0.26% respecto de la tensión nominal, lo cual podría ser atribuible a las variaciones naturales del sistema. Sin embargo, a nivel de 34.5 kV, la variación es de aproximadamente 8.4% de la tensión nominal, lo que podría comprometer la operación de la carga asociada al autogenerador.

Por lo anterior, no es factible llevar a cabo la sintonización del lazo de control de tensión sin estatismo y se decide no realizar más ensayos, con el fin de evitar posibles contingencias que puedan afectar la carga del cliente.



3.1.2 Pruebas control tensión con estatismo

El día 7 y 8 de octubre se realiza un escalón descendente en potencia mínima y un escalón ascendente en potencia máxima disponible durante la prueba 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_acuerdo1830__Caracolí_RA" en las hojas *Reg_Mod. cont. tensión con est.*, *Tiempos resp cont. con est.*, *Gráficas cont. tension con. est.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 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 y en la Tabla 3.3 se especifica el estatismo calculado por cada escalón y el promedio

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	1.13	12.6	No	0.22	8.62
Descendente	1.13	0.035	No	0.11	7.32
Resumen tiempos				0.22	8.62

Tabla 3.2 – Respuesta del control de tensión con estatismo

Control tensión con estatismo Q(V)

Tipo de escalón	Ajuste estatismo [%]	Estatismo calculado [%]
Ascendente	5.00	4.9
Descendente	5.00	4.8
Promedio estatismo		4.8

Tabla 3.3 – Estatismo calculado



3.1.3 Pruebas control potencia reactiva

El día 7 de septiembre se realiza un escalón descendente en potencia mínima y 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 7 de septiembre un escalón descendente en potencia mínima con la planta operando en modo control de potencia reactiva en la región capacitiva y 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_acuerdo1830_Caracolí_RA" en las hojas *Reg_Mod. cont. pot. react.*, *Tiempos resp. cont. pot. react.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 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 3.4 y en la Tabla 3.5 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva y capacitiva respectivamente.

Control potencia reactiva Q región inductiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	9.05	0.05	No	0.31	8.7
Descendente	9.05	18.58	No	0.51	8.22
Resumen tiempos				0.51	8.7

Tabla 3.4 – Respuesta del control de potencia reactiva región inductiva



Control potencia reactiva Q región capacitiva

Tipo de escalón	Tamaño del escalón [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	9.05	18.6	No	0.37	7.83
Descendente	9.05	0.06	No	0.22	8.5
Resumen tiempos				0.37	8.5

Tabla 3.5 – Respuesta del control de potencia reactiva región capacitiva



3.1.4 Pruebas control factor de potencia

El día 8 de octubre se realiza un escalón ascendente en potencia mínima en la región inductiva, un escalón descendente en potencia mínima en la región capacitiva con la planta operando en modo control de factor de potencia, 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 y un escalón descendente en potencia máxima disponible durante la prueba en la región inductiva. 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.*

Tal como se especifica en el acuerdo CNO 1830 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 3.6 y en la Tabla 3.7 se especifican los tiempos de respuesta y establecimiento obtenidos para la región inductiva y capacitiva respectivamente.

Control factor de potencia FP región inductiva

Tipo de escalón	ΔQ [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	9.49	0.17	No	0.23	8.0
Descendente	8.42	14.8	No	0.38	7.4
Resumen tiempos				0.38	8.0

Tabla 3.6 – Respuesta del control de factor de potencia región inductiva



Control factor de potencia FP región capacitiva

Tipo de escalón	ΔQ [%]	P [MW]	Respuesta oscilatoria en Q	Tiempo de respuesta [s]	Tiempo de establecimiento [s]
Ascendente	9.25	12.3	No	0.36	8.15
Descendente	9.60	0.02	No	0.26	8.07
Resumen tiempos				0.36	8.15

Tabla 3.7 – 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 21 de octubre 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 *"EE-2022-029_anexo_2_acuerdo_1830_Palmira 1"* en las hojas *Reg_Consignas tensión_local* y *Gráficas Consignas tensión_L*.

3.2.2 Recepción de consignas remotas en modo control de tensión con estatismo

Este tipo de consignas no son requeridas para plantas autogeneradoras sin entrega de excedentes.

3.2.3 Recepción de consignas locales en modo control de potencia reactiva

El día 21 de octubre 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 *"EE-2022-029_anexo_2_acuerdo_1830_Palmira 1"* 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

Este tipo de consignas no son requeridas para plantas autogeneradoras sin entrega de excedentes.

3.2.5 Recepción de consignas locales en modo control de factor de potencia

El día 21 de octubre 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 *"EE-2022-029_anexo_2_acuerdo_1830_Palmira 1"* en las hojas *Reg_Consignas de fp_L* y *Gráficas Consignas de fp_L*.

3.2.6 Recepción de consignas remotas en modo control de factor de potencia

Este tipo de consignas no son requeridas para plantas autogeneradoras sin entrega de excedentes.



4 Conclusiones

- El control de tensión sin estatismo no fue posible ensayarlo debido a restricciones operativas y posibles riesgos sobre la carga asociada al autogenerador.
- El control de tensión con estatismo tiene un tiempo de respuesta aproximado 0.165 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.97 s.
- El control de potencia reactiva tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.352 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 8.31 s.
- El control de factor de potencia tiene un tiempo de respuesta aproximado de 0.3 s y un tiempo de establecimiento aproximado de 7.9 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.

4. Tabla de rangos operativos

Rangos de Operación		
CONTROL DE TENSIÓN CON ESTADISMO		
Descripción	Rango	Unidad
Estadismo de tensión	2 – 10	%
Banda muerta de tensión	0 – 2	%
CONTROL DE POTENCIA ACTIVA CON COMPENSACIÓN DE FRECUENCIA		
Descripción	Rango	Unidad
Estadismo de frecuencia	2 – 6	%
Banda muerta de frecuencia	0 – 120	mHz
Rampas	10 – 50	%Pn/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 5%.