



estudios en infraestructura
consultores

ENSAYOS Y HOMOLOGACION DEL MODELO DE PLANTA FOTOVOLTAICA JAMA (Etapa I y Etapa II). INFORME DE ENSAYOS Y HOMOLOGACION DE MODELO DINAMICO.

Preparado para:



Marzo, 2016

S 2014 - 16

Tabla de Contenidos

| | |
|--|-----------|
| SECCIÓN PRINCIPAL | 3 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.1. Objetivos | 3 |
| 1.2. Descripción del parque solar fotovoltaico | 3 |
| 2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EFECTUADOS | 7 |
| 2.1. Verificación de la curva P-Q | 7 |
| 2.2. Ensayos al control de potencia activa | 8 |
| 2.3. Ensayos al control de potencia reactiva / tensión | 11 |
| 2.4. Transitorios ante perturbaciones en la red..... | 15 |
| 2.5. Lógicas de corriente y LVRT | 15 |
| 3. CONCLUSIONES..... | 17 |

Índice de gráficos

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema tendido de Media Tensión..... | 4 |
| Figura 2 – Diagrama de bloques Control de planta | 6 |
| Figura 3 – Curva P-Q de la planta | 8 |
| Figura 4 – Ensayo potencia activa constante..... | 9 |
| Figura 5 – Ensayo reducción de potencia activa..... | 9 |
| Figura 6 – Ensayo incremento de potencia activa | 10 |
| Figura 7 – Figura reducción de potencia por sobrefrecuencia | 10 |
| Figura 8 – Limitación de potencia por sobrefrecuencia | 11 |
| Figura 9 – Ensayo modo control de potencia reactiva..... | 12 |
| Figura 10 – Ensayo modo control de tensión..... | 13 |
| Figura 11 – Ensayo modo control de factor de potencia | 14 |
| Figura 12 – Disparo de un colector..... | 15 |
| Figura 13 – Respuesta del inversor ante huecos de tensión. I..... | 16 |
| Figura 14 – Respuesta del inversor ante huecos de tensión. II..... | 16 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 – Características principal parque solar fotovoltaico..... | 4 |
| Tabla 2 – Características Inversor | 4 |
| Tabla 3 – Características Transformador de centro de transformación | 5 |
| Tabla 4 – Características Transformador de salida parque solar fotovoltaico | 5 |
| Tabla 5 – Resultados ensayo reducción de potencia por sobrefrecuencia | 11 |
| Tabla 6 – Resultados ensayo control de tensión..... | 12 |

SECCIÓN PRINCIPAL

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

En el presente informe se documentan los ensayos de campo realizados sobre el parque solar fotovoltaico Jama (Etapa I y II), llevados a cabo durante el día 24 de febrero de 2016.

De esta manera se han obtenido registros que muestran la respuesta en campo de los sistemas de control de tensión y potencia según lo requerido por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.

1.2. Descripción del parque solar fotovoltaico

1.2.1. Equipamiento

El parque solar fotovoltaico Jama se ubica en la región de Atacama, Chile, en las cercanías de la localidad de Calama. Actualmente está compuesto por dos etapas, Etapa I y Etapa II.

Etapa I cuenta con 110.400 módulos solares agrupados mediante quince (15) casetas de transformación en 23 kV, de 2.140 kW cada una, totalizando 32,1 MW a plena carga, siendo la potencia solar pico de 33,6 MW. Cada caseta de transformación se interconecta mediante cuatro (4) circuitos independientes. Los centros de transformación se interconectan entre sí y a la subestación mediante cables subterráneos de 23 kV de 240 mm².

Etapa II cuenta con 76.080 módulos solares agrupados mediante once (11) casetas de transformación en 23 kV, diez de 2.140 kW cada una y una caseta adicional de 1.070 kW, totalizando 22,47 MW a plena carga, siendo la potencia solar pico de 23,85 MW. Cada caseta de transformación se interconecta mediante tres (3) circuitos independientes. Los centros de transformación se interconectan entre sí y a la subestación mediante cables subterráneos de 23 kV de 240 mm².

La configuración descrita se muestra esquemáticamente en la Figura 1. En el grafico superior de esta se tiene la Etapa I y en la inferior la Etapa II.



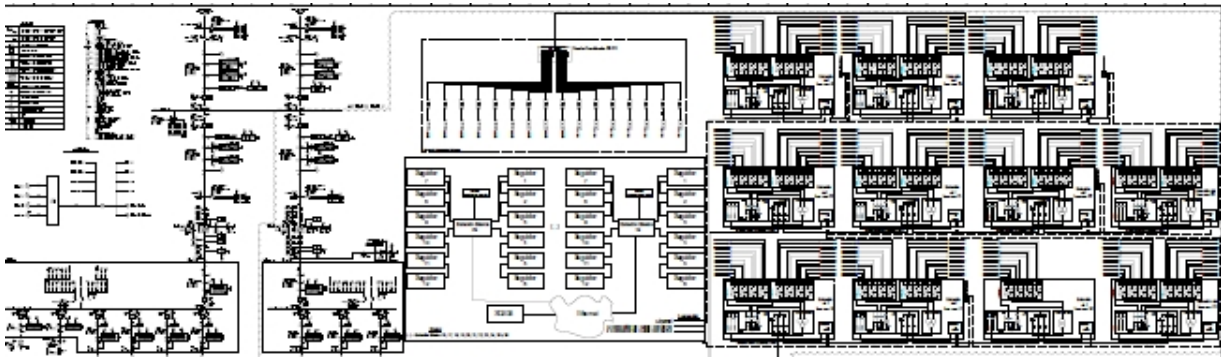


Figura 1 – Esquema tendido de Media Tensión.

Cada centro de transformación, cuenta con un transformador 0,42/23 kV (diez de 2.200 kVA y uno de 1.150 kVA) y dos inversores (Ingeteam 1000 TL X420 DC) DC/AC de PnAC=1.070 kW cada uno, los cuales entregan al sistema de corriente alterna la potencia colectada por los paneles fotovoltaicos asociados a los mismos.

En las siguientes tablas se resumen las principales características del parque solar fotovoltaico Jama Etapa I y II, de los inversores, los transformadores de cada CT y el transformador de salida de planta.

Tabla 1 – Características principal parque solar fotovoltaico

| Planta | Jama Etapa I | Jama Etapa II |
|-------------------------------------|--------------|---------------|
| Potencia nominal de la planta (AC) | 32.100 kW | 22.470 kW |
| Potencia pico de la planta (DC) | 33.672 kW | 23.855 kW |
| Número total de módulos | 110.400 | 76.080 |
| Número de centros de transformación | 15 | 11 |
| Numero de inversores | 30 | 21 |
| Área del parque solar | 67,000 Ha | 67,838 Ha |

Tabla 2 – Características Inversor

| Planta | Jama Etapa I | Jama Etapa II |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|
| Marca y modelo | INGETEA 1000 TL X420 DC Indoor | |
| Potencia máxima DC | 1.414 kW | 1.414 kW |
| Intensidad máxima DC | 1.800 A | 1.800 A |
| Rango de tensión DC (mppt) | 607-820 V | 607-820 V |

| | | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Potencia nominal AC | 1070 kW | 1070 kW |
| Tensión de red AC | 420 V | 420 V |
| Intensidad nominal AC | 1.472 A | 1.472 A |
| Factor de potencia | AJUSTABLE | AJUSTABLE |
| Protección subtensión | 0,945 pu, 0,9 s | 0,945 pu, 0,9 s |
| Protección sobretensión | 1,07 pu, 1,9 s | 1,07 pu, 1,9 s |
| Protección subfrecuencia | 47,5 Hz,15 s | 47,5 Hz,15 s |
| Protección sobrefrecuencia | 51,5, instantáneo | 51,5, instantáneo |

Tabla 3 – Características Transformador de centro de transformación

| Planta | Jama Etapa I | Jama Etapa II | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Potencia | 15 x 2.150 kVA | 10 x 2.200 kVA | 1 x 1.150 kVA |
| Relación de transformación | 23/0,42/0,42 kV | 23/0,42/0,42 kV | 23/0,42 kV |
| Impedancia de cortocircuito | 6 % | 6 % | 6 % |
| Grupo de conexión | Dyn11yn11 | Dyn11yn11 | Dyn11 |
| Aislamiento | ACEITE | ACEITE | ACEITE |

Tabla 4 – Características Transformador de salida parque solar fotovoltaico

| Planta | Jama Etapa I | Jama Etapa II |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| Marca | SIEMENS | WEG |
| Potencia | 35 MVA (ONAF) | 25 MVA (ONAF) |
| Relación de transformación | 220/23 kV | 220/23 kV |
| Impedancia de cortocircuito | 12,21 % | 11,85 % |
| Grupo de conexión | YNd1 | YNd1 |
| Cambiador de tomas | ±10 x 1,25% | ±10 x 1,25% |
| Aislamiento | ACEITE | ACEITE |

1.2.2. Sistema de monitoreo y control

La planta cuenta con un sistema SCADA denominado INGECON EMS Plant Controller desarrollado por Ingeteam, el cual permite la comunicación, control y supervisión de todos los equipos componentes del parque solar. El sistema se comunica con los equipos, a nivel de campo,

mediante enlace Modbus TCP sobre red física de cobre y fibra óptica. Las medidas de tensión y corriente de la planta son tomadas de la barra de 220 kV de salida.

El sistema de control de planta, que permite operar el parque a través de una terminal de usuario mediante la aplicación WEB del SCADA, cuenta con los siguientes controles:

- Control de potencia activa:
 - Reserva de potencia activa: Este control limita la producción fotovoltaica a un valor inferior al nominal y siempre con una diferencia constante con la potencia disponible.
 - Potencia activa constante: permite mantener un nivel de potencia active constante en el punto de conexión durante el tiempo necesario
 - Control de rampa de subida y reducción de potencia: Permite regular la pendiente de la rampa de variación de potencia activa.
 - Regulación de frecuencia: Permite reducir la potencia entregada por los inversores a la red ante casos de sobrefrecuencia.
- Control de potencia reactiva/tensión:
 - Control de potencia reactiva: permite establecer una potencia reactiva constante en el punto de conexión de la planta
 - Control de tensión: permite regular la tensión en el punto de conexión, a través de variaciones de potencia reactiva según una curva Q-V o control PI.
 - Control de factor de potencia: Este modo de funcionamiento calcula instantáneamente el requisito de potencia reactiva necesario en el punto de conexión de manera que con la potencia activa instantánea, se obtenga en el punto de conexión un factor de potencia constante.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al control de planta implementado.

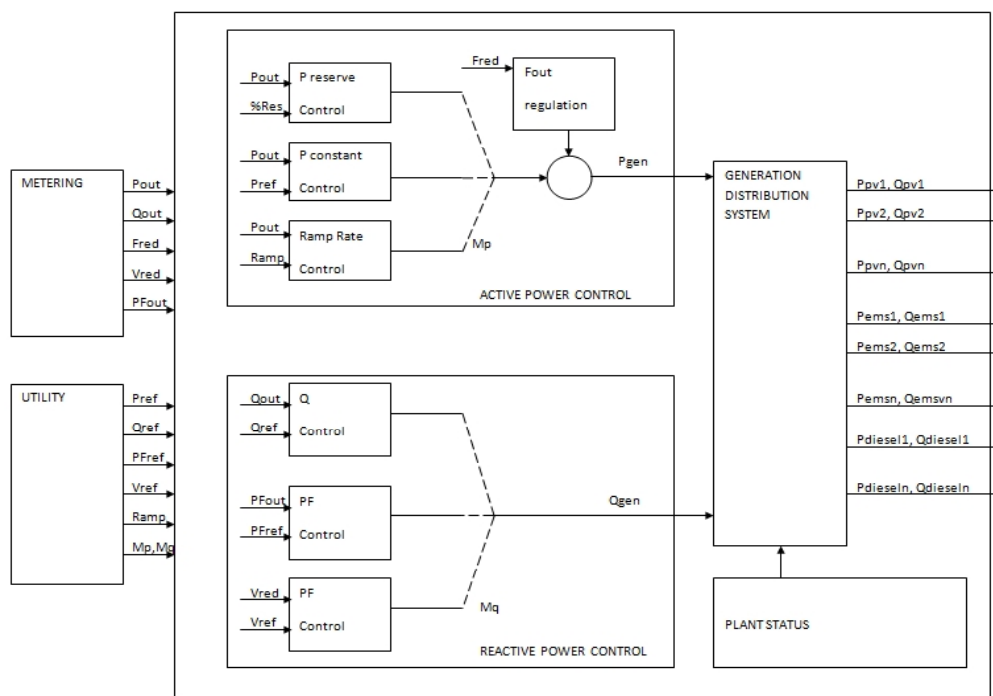


Figura 2 – Diagrama de bloques Control de planta

Actualmente, se encuentran disponibles los siguientes modos de control:

- Potencia activa constante.
- Regulación de frecuencia.
- Control de rampa.
- Control de tensión.
- Control de potencia reactiva.
- Control de factor de potencia.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EFECTUADOS

En una primera etapa se llevó a cabo el ensayo del parque solar fotovoltaico Jama Etapa I, durante el día 28 de setiembre, operando a una potencia máxima de 29,0 MW. Dado que la curva de operación del parque no cumplía con los requisitos determinados por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, se realizaron nuevas pruebas el día 15 de octubre, luego de una reprogramación del control de planta del parque en sus lazos de potencia activa y reactiva.

En una segunda etapa, se probaron las plantas Solar Jama Etapa I y Etapa II en conjunto, operando a una potencia máxima de 55 MW aproximadamente, con algunos intervalos de menor potencia debido a una irradiación solar intermitente producto de la nubosidad presente.

Las mediciones de tensión, potencia activa y reactiva se realizaron en el punto común de amos parques, en la salida de línea de 220 kV de la S/E Jama.

2.1. Verificación de la curva P-Q

El objetivo de este ensayo es variar el punto de operación del parque fotovoltaico para verificar el cumplimiento de la capacidad de absorción e inyección de potencia activa/reactiva en régimen permanente en el punto de conexión de la planta con la red de transmisión.

En la Figura 3 se muestra la curva de operación de la planta en coordenadas P-Q, luego de la modificación introducida en el control de planta. Para obtener dicha curva se despachó la unidad en distintos valores de potencia activa y reactiva. Se observa que el control de planta permite que el parque entregue la máxima potencia reactiva, tanto cuando se encuentra despachado a mínima potencia activa como así también cuando se despacha a su valor nominal, para el plano de potencia reactiva positiva.

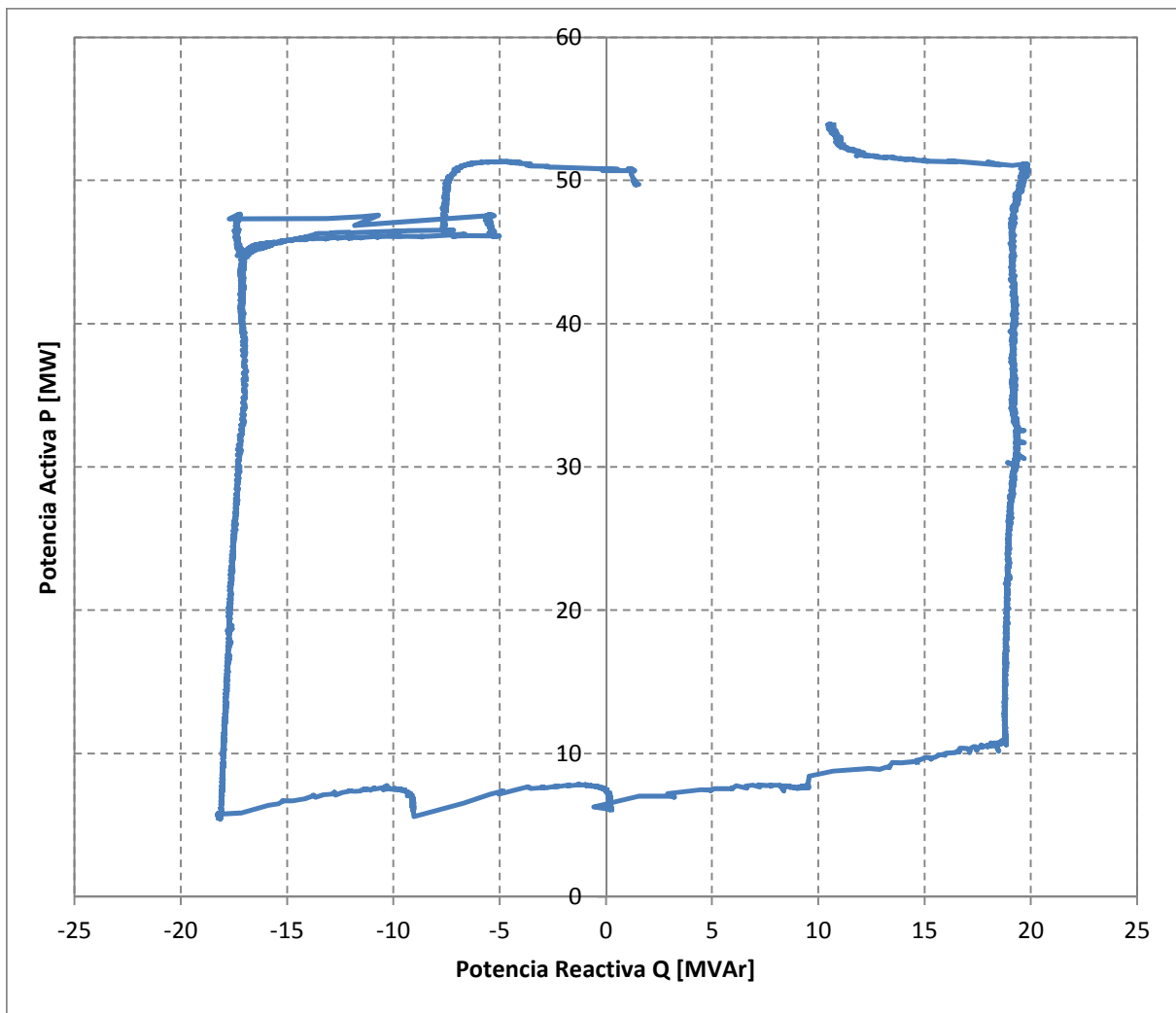


Figura 3 – Curva P-Q de la planta

2.2. Ensayos al control de potencia activa

2.2.1. Ensayo de potencia constante

Para la realización de este ensayo se despachó la planta a un valor de potencia fijo, limitado apenas por debajo de la potencia solar máxima, de manera de verificar que el control es capaz de mantener la potencia constante durante el tiempo solicitado. En la Figura 4 se observa el resultado del ensayo descrito, donde se aprecia que el control de potencia constante opera correctamente.

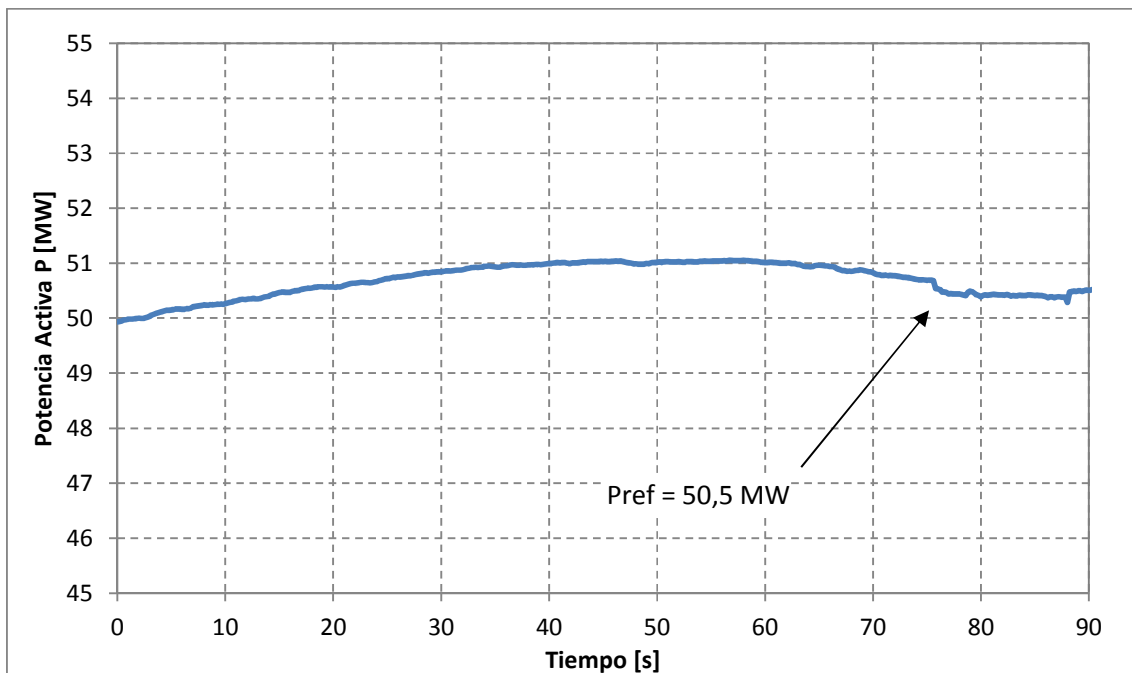


Figura 4 – Ensayo potencia activa constante

2.2.2. Ensayo de reducción y aumento de potencia activa

El objeto de este ensayo es verificar la capacidad del parque de aumentar o reducir la potencia activa en forma controlada.

En la Figura 5 y Figura 6 se muestra el ensayo de reducción e incremento de potencia activa respectivamente. En el primer caso, con el control de rampa activado, se modificó la referencia a 5,5 MW, reduciéndose la potencia según la tasa de variación configurada de -6 MW/min. En el caso del aumento de potencia se incrementó el setpoint desde el mínimo de potencia de la planta hasta el máximo disponible, verificándose nuevamente una tasa de variación de 6 MW/min.

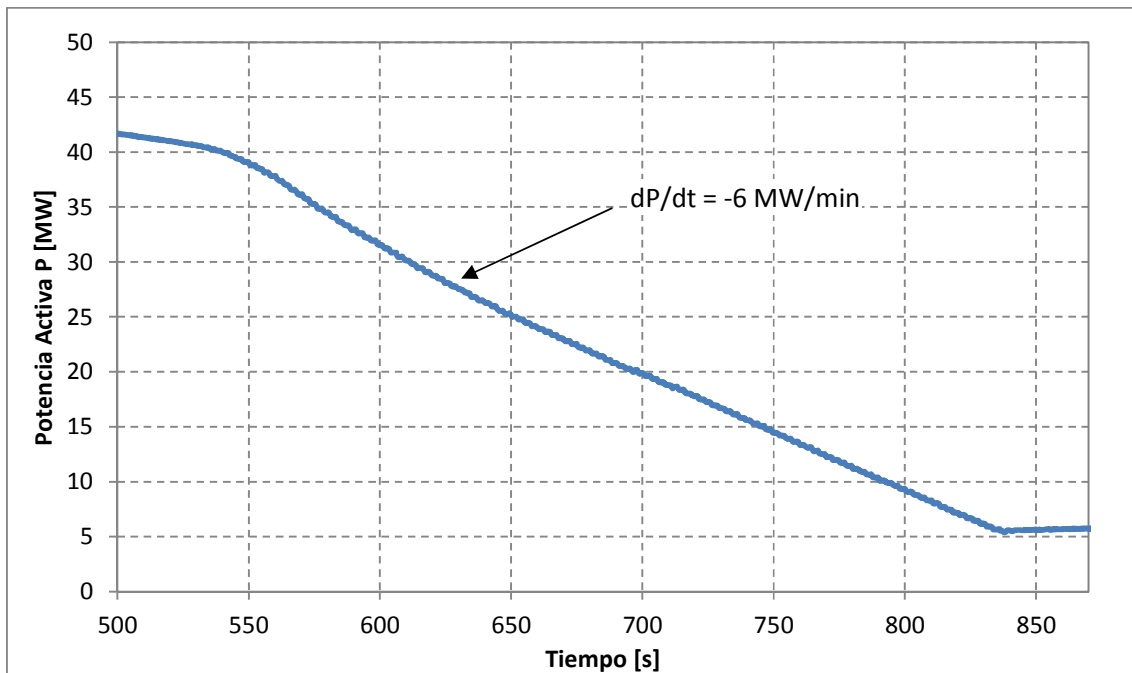


Figura 5 – Ensayo reducción de potencia activa

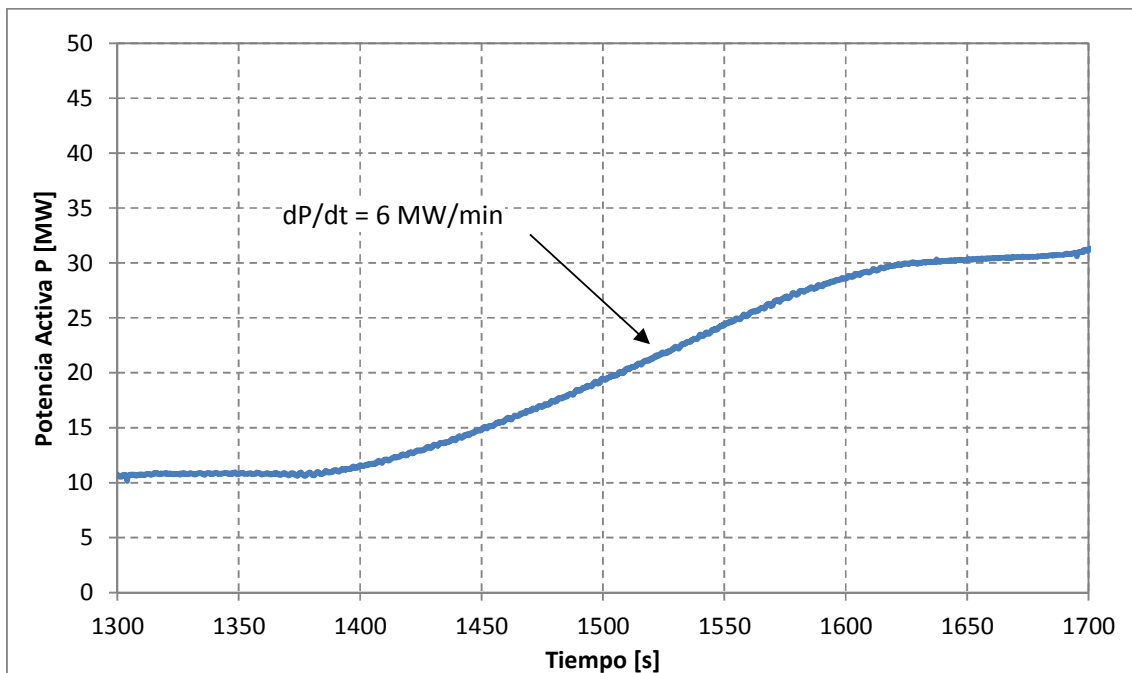


Figura 6 – Ensayo incremento de potencia activa

2.2.3. Ensayo de control primario de frecuencia

En la Figura 7 se muestran los valores umbrales de frecuencia de reducción de potencia y los porcentajes de decremento configurados. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de reducción de potencia por sobrefrecuencia, a partir de la inyección de valores de frecuencia ficticios en el control de planta. En la Figura 8 se muestra gráficamente la reducción de potencia para cada señal de sobrefrecuencia inyectada, observándose que el control funciona adecuadamente.

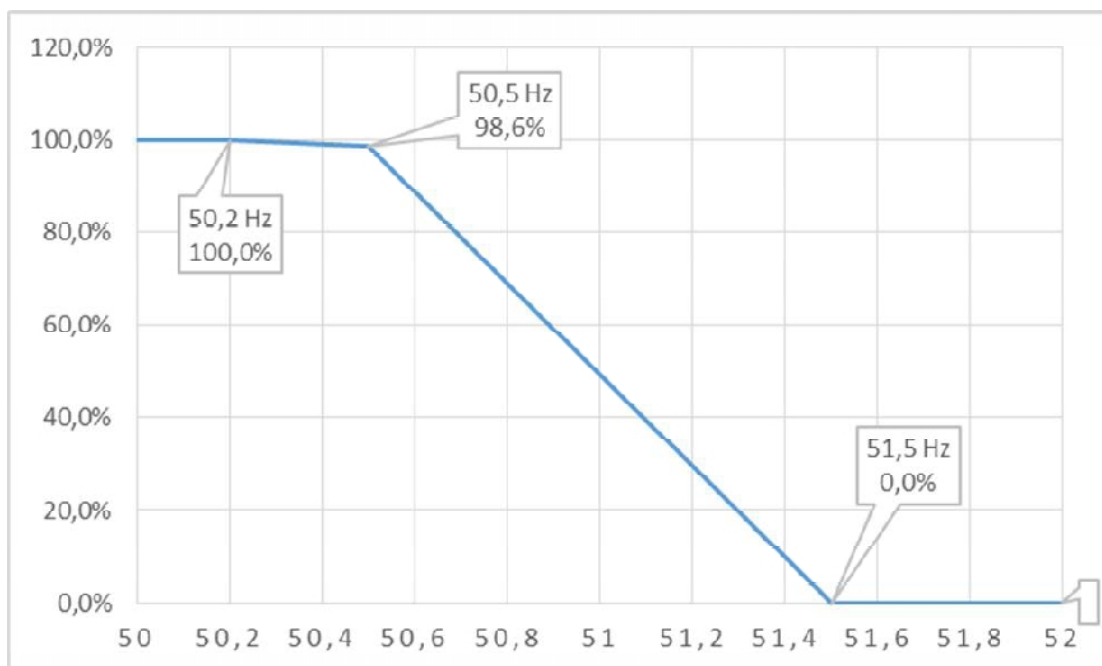


Figura 7 – Figura reducción de potencia por sobrefrecuencia

Tabla 5 – Resultados ensayo reducción de potencia por sobrefrecuencia

| Frecuencia (Hz) | Porcentaje de la potencia inyectada | Potencia inyectada teórica que se tiene que cumplir (MW) | Potencia inyectada medida en J1 (MW) |
|-----------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 50,00 | 100,0% | máx | 51,5 MW |
| 50,75 | 74,0% | 38,11 MW | 38,15 MW |
| 51,00 | 49,3% | 25,39 MW | 25,73 MW |
| 51,25 | 24,65% | 12,69 MW | 13,06 MW |
| 50,00 | 100,0% | máx | 32 MW |

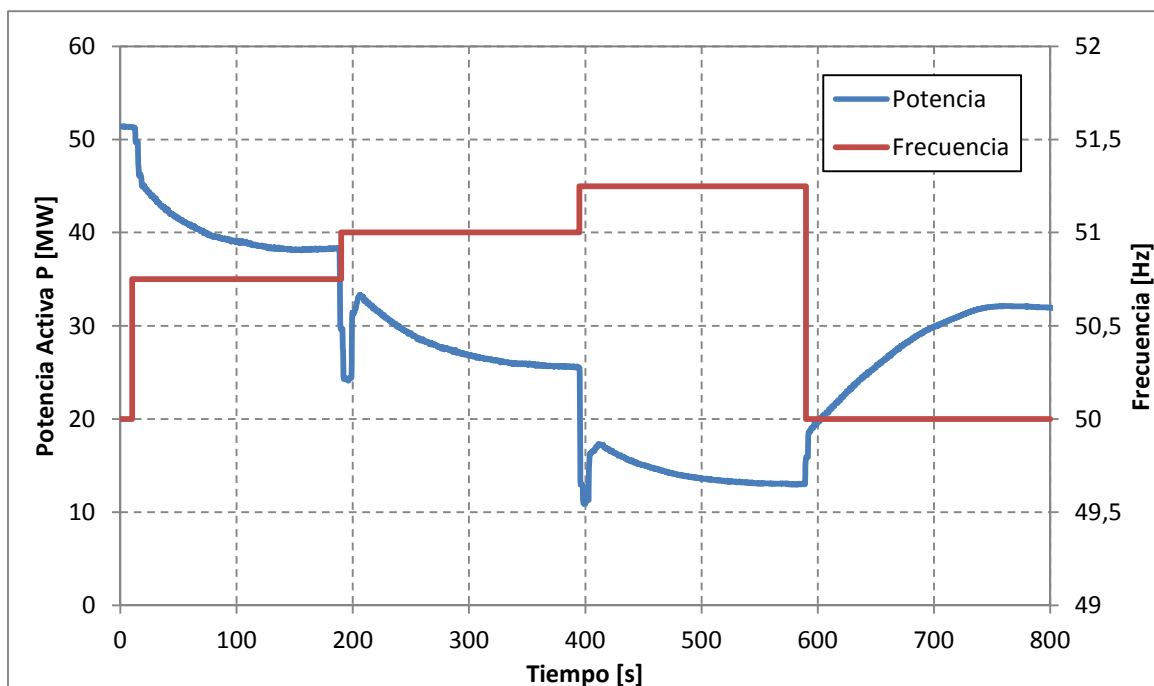


Figura 8 – Limitación de potencia por sobrefrecuencia

2.3. Ensayos al control de potencia reactiva / tensión

El objetivo de este ensayo es verificar el desempeño del control de tensión y su sistema de regulación de potencia reactiva.

2.3.1. Ensayo en modo control de potencia reactiva

Para la realización de este ensayo se activó el modo de control de potencia reactiva, modificándose el setpoint desde -18 MVar a 18 MVar, recorriendo el rango completo de aporte de potencia reactiva en escalones de ± 9 MVar, según lo mostrado en la Figura 9.

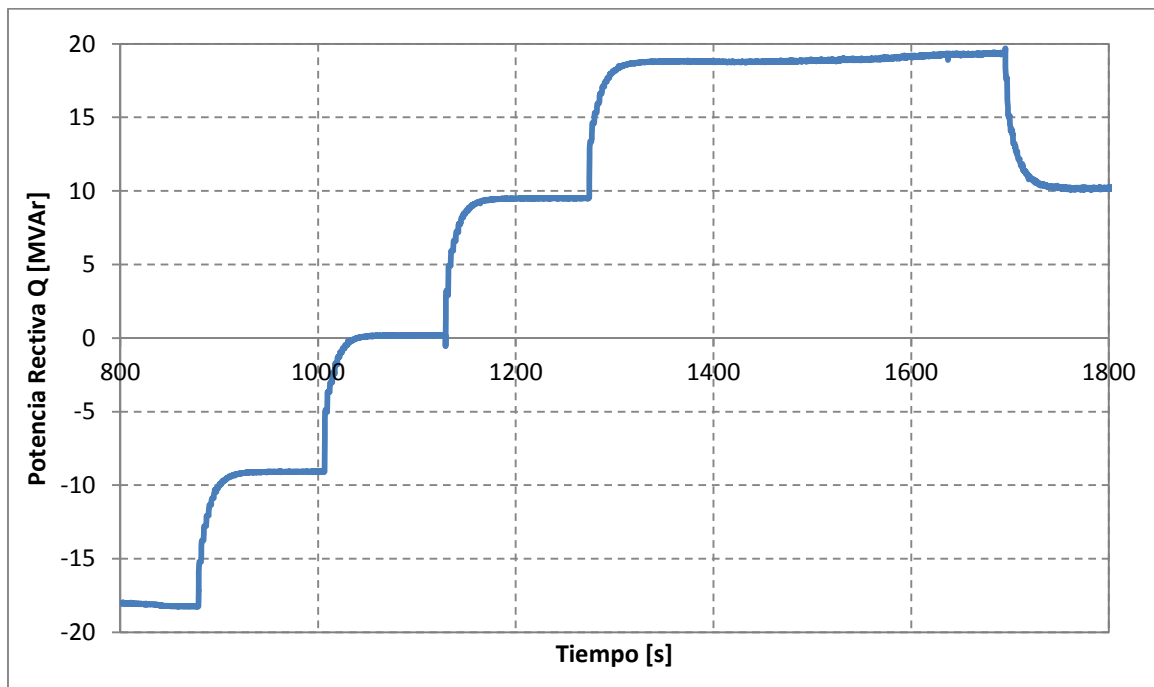


Figura 9 – Ensayo modo control de potencia reactiva.

2.3.1. Ensayo en modo control de tensión

En este caso se activó el modo de control de tensión y se modificó la referencia de tensión en escalones de 5% entre 224,47 kV (1,02 pu), 235,7 kV (1,07 pu) y 213,2 kV (0,97 pu). Se aprecia que la tensión de la barra varía de acuerdo una pendiente de curva Q/V configurada en un valor de 11% y una banda muerta de 0,5%. Esta constante se interpreta según lo siguiente: Por cada 11% de error de tensión (diferencia entre la referencia de tensión y valor real de tensión leído) se introduce el 100% de potencia reactiva (55 MVar) de reactiva de manera que con un 5% de error de tensión se inyecta una potencia reactiva de 25 MVar aproximadamente. Se aprecia en la Figura 10, que la inyección/absorción de potencia reactiva para distintos valores de error de tensión responde según la constante descrita:

Tabla 6 – Resultados ensayo control de tensión

| Setpoint [pu] | Tensión final registrada [pu] | Potencia Reactiva según curva VQ [pu] | Potencia Reactiva registrada [pu] |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1,02 | 1,025 | 0 | 0 |
| 1,07 | 1,037 | 0,25 | 0,256 |
| 0,97 | 1,013 | -0,30 | -0,264 |

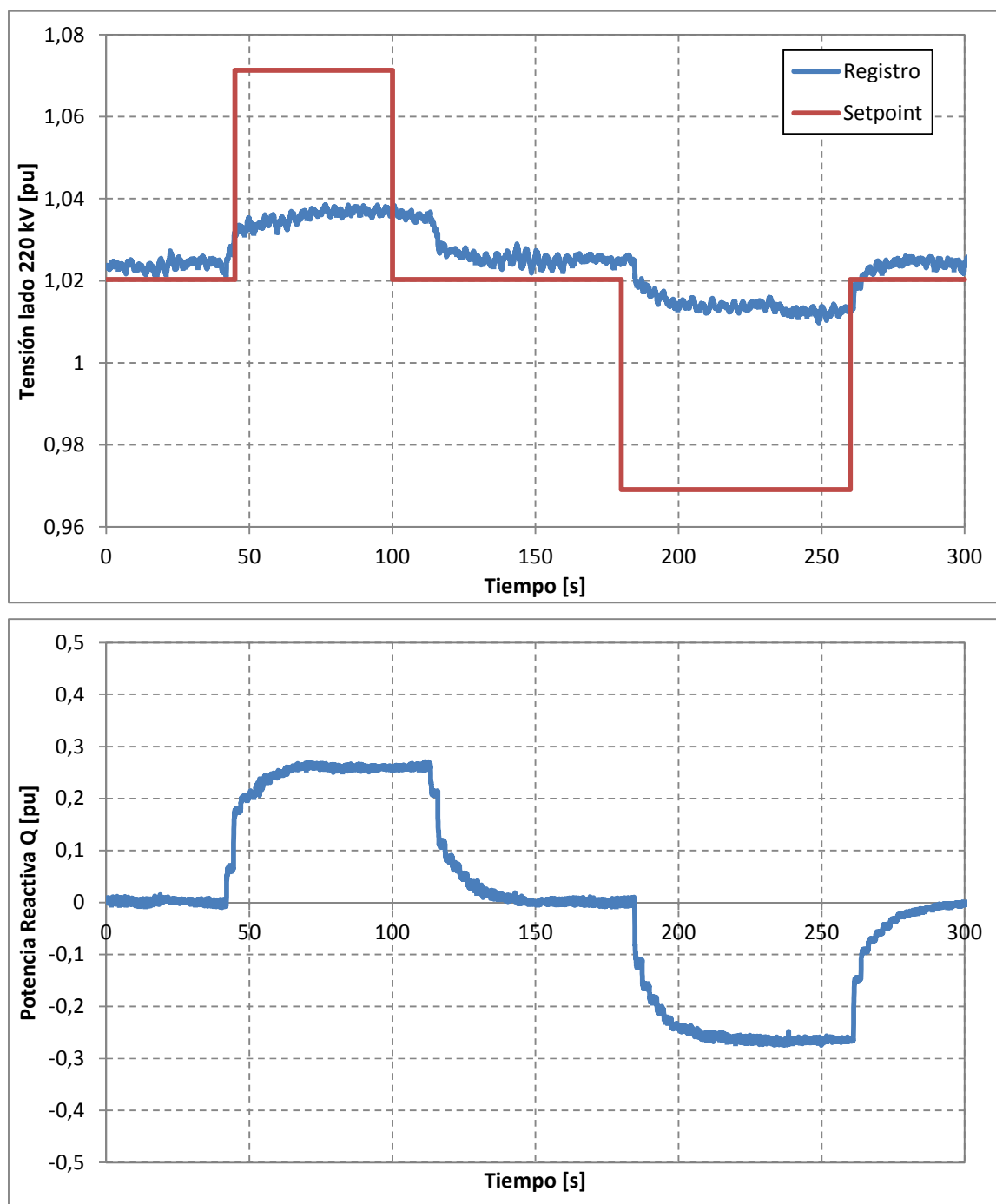


Figura 10 – Ensayo modo control de tensión.

2.3.2. Ensayo en modo control de factor de potencia

La prueba del modo de control de factor de potencia se aprecia en la Figura 11.

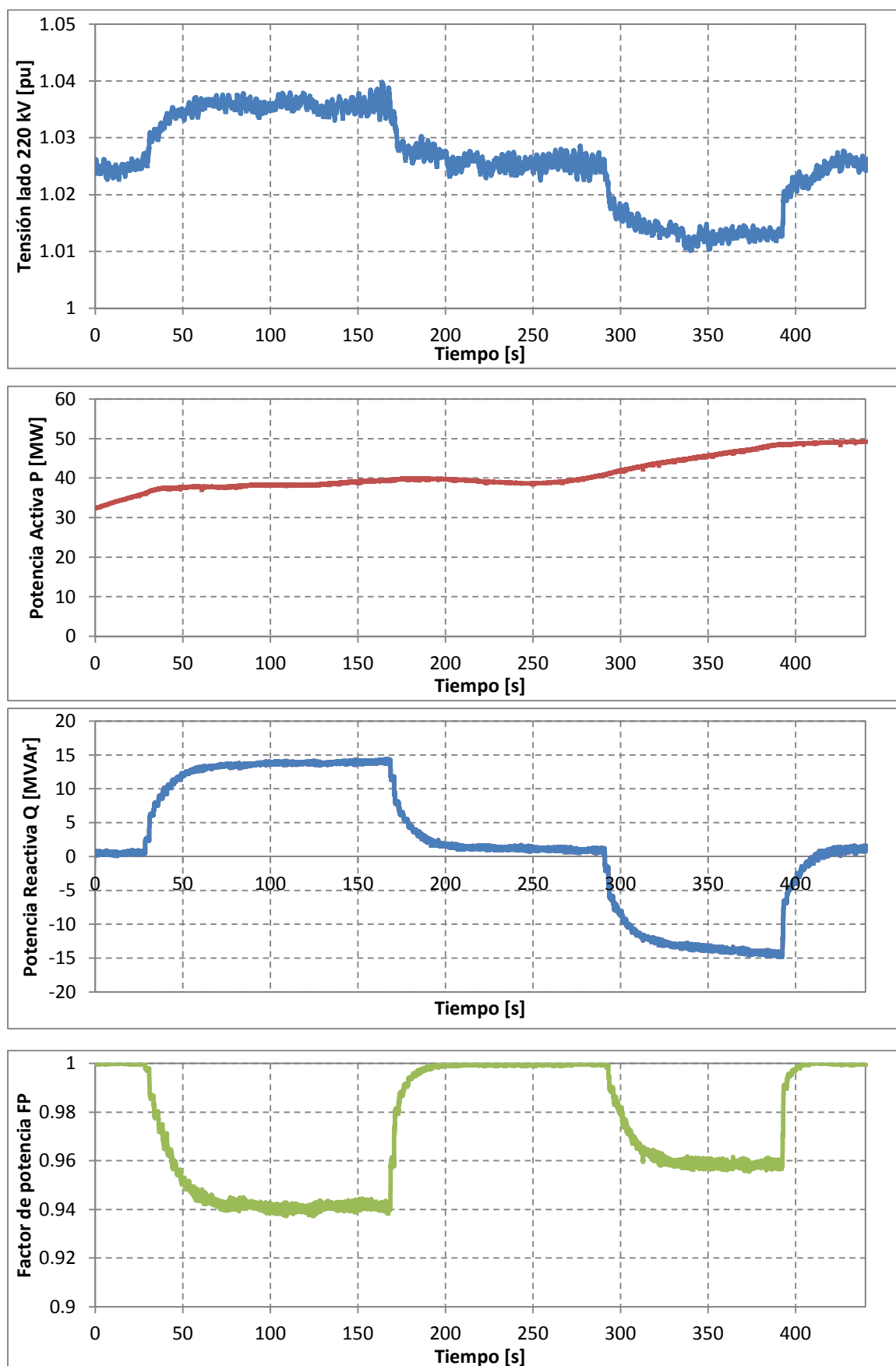


Figura 11 – Ensayo modo control de factor de potencia

2.4. Transitorios ante perturbaciones en la red

El objetivo de este ensayo es registrar el desempeño dinámico de la central ante eventos de maniobra o perturbaciones en la red eléctrica. Se desconectó una de las cuatro ramas colectoras del parque Jama Etapa I. En la Figura 12 se muestra la tensión, potencia reactiva y activa en la barra de 220 kV. A partir de la desconexión se observa un descenso intempestivo de la potencia registrada a la salida del parque. Esta permanece estable, sin observarse transitorios no amortiguados.

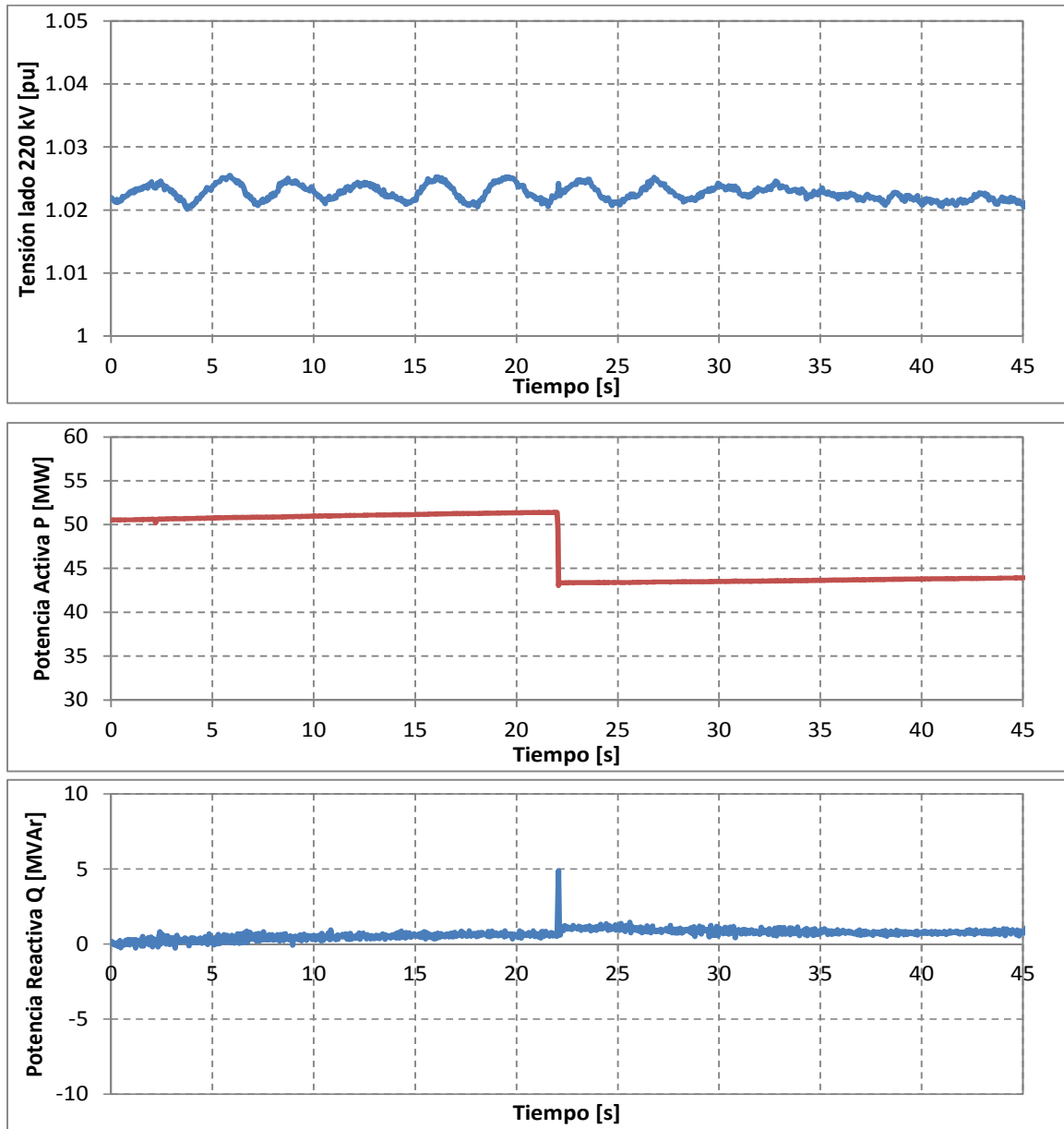


Figura 12 – Disparo de un colector

2.5. Lógicas de corriente y LVRT

En la Figura 13 y Figura 14 se muestra, según la información provista, el desempeño del modelo equivalente del inversor y su lógica de LVRT asociada, ante la simulación de un hueco de tensión en el punto de conexión del parque según lo exigido por el artículo 3-7 de la norma técnica. Según la Figura 13 se observa que el inversor es capaz de operar a lo largo de la curva de tensión sin desconectarse del sistema. Adicionalmente en la Figura 14 se muestra la tensión en

bornes del inversor, con lo que se verifica la activación del control de tensión cumpliendo con el suministro de potencia reactiva de un 2% de I_{nom} por cada 1% de $\Delta U/U_{nom}$. Se destaca que estas figuras corresponden a información recibida y no a simulaciones realizadas durante el presente estudio.

Asimismo se hace notar que no es posible realizar las pruebas en campo correspondientes a la generación de un hueco de tensión, pues esto supone la realización de un cortocircuito en la red.

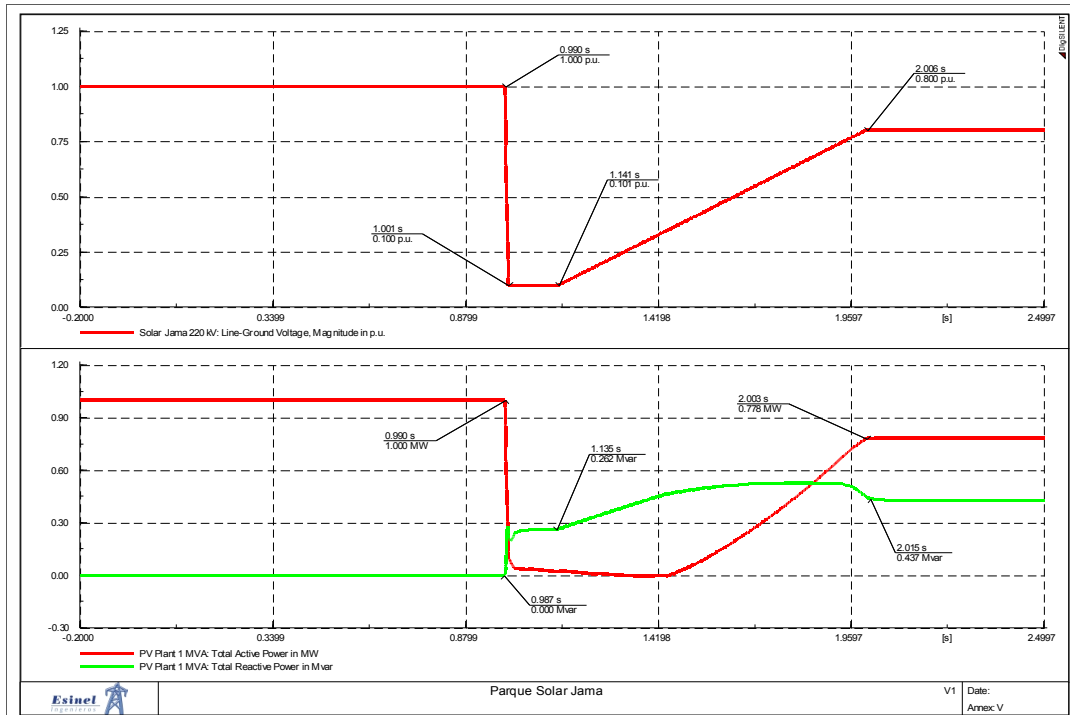


Figura 13 – Respuesta del inversor ante huecos de tensión. I

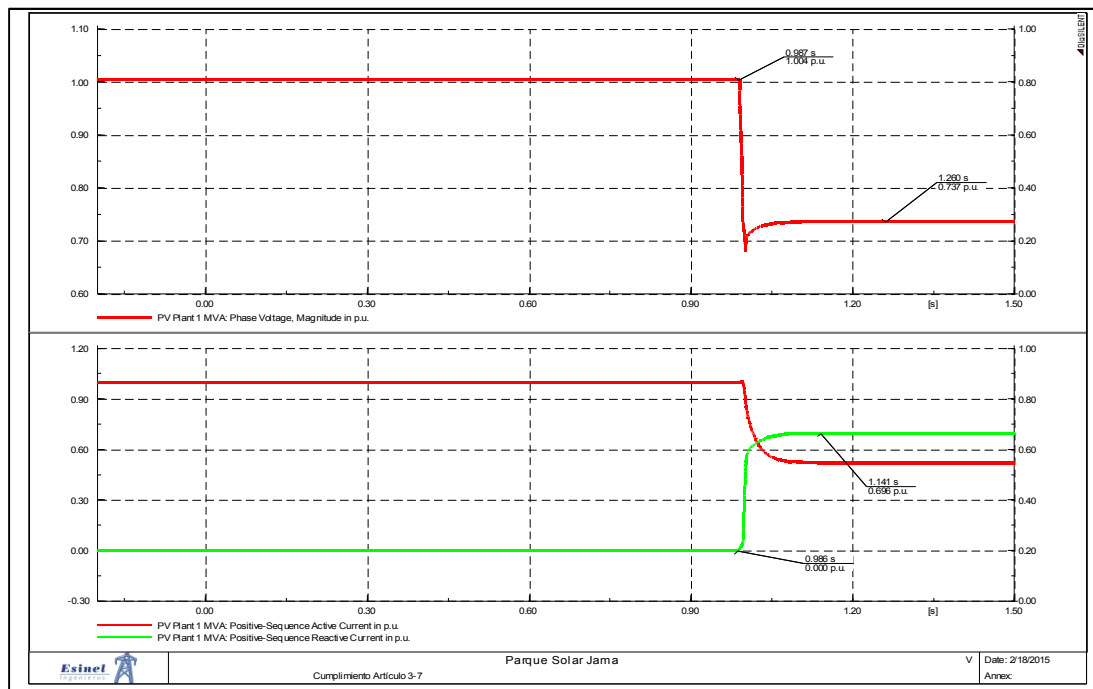


Figura 14 – Respuesta del inversor ante huecos de tensión. II

3. CONCLUSIONES

El resultado de las pruebas realizadas fue satisfactorio. Los ensayos llevados a cabo fueron ejecutados de acuerdo al protocolo confeccionado de acuerdo a los requerimientos de la Norma Técnica.

- Se probó la curva P-Q del parque (Etapa I y II) verificándose el cumplimiento del mínimo reactivo a inyectar/absorbe establecido en la Norma Técnica.
- Se probó el control de limitación de potencia activa y reducción controlada por sobrefrecuencia, verificándose el correcto funcionamiento de acuerdo a la curva de estatismo programada.
- Se probaron los controles de potencia reactiva-tensión y factor de potencia.
- Se realizó el disparo de un colector para observar el desempeño del parque ante dicha perturbación.
- Se deja constancia, que la única prueba no realizada fue la aplicación de un hueco de tensión en campo, ante la imposibilidad de realizar perturbaciones (cortocircuitos) en el sistema. Dado que no se cuenta con las pruebas de este ensayo por parte del fabricante, se incluye en el informe la información de simulación disponible al respecto.