

Cliente: Tinguiririca Energía

País: Chile

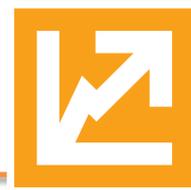
Proyecto: Verificación de SSCC - C.H. La Higuera U1

Descripción: Informe final de ensayos - Control de Tensión y Frecuencia

Código de Proyecto: EE-2021-142

Código de Informe: EE-EN-2022-0354

Revisión: A



Este documento EE-EN-2022-0354-RA fue preparado para Tinguiririca Energía por Estudios Eléctricos S.A. Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

Ing. Claudio Celman

Coordinador Dpto. Ensayos e Ingeniería
claudio.celman@estudios-electricos.com

Ing. Andrés Capalbo

Coordinador Dpto. Ensayos e Ingeniería
andres.capalbo@estudios-electricos.com

Ing. Pablo Rifrani

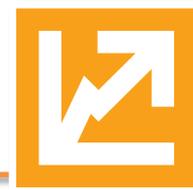
Gerente Dpto. Ensayos e Ingeniería
pablo.rifrani@estudios-electricos.com

www.estudios-electricos.com

Este documento contiene 122 páginas y ha sido guardado por última vez el 18/3/2022 por Franco Di Rosa. Sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

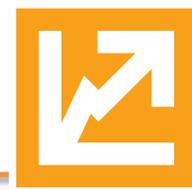
| Rev. | Fecha | Comentarios | Realizó | Revisó | Aprobó |
|------|-----------|------------------|---------|--------|--------|
| A | 18/3/2022 | Primera versión. | RP | AC | PR |
| | | | | | |
| | | | | | |

Todas las firmas digitales pueden ser validadas y autenticadas a través de la página web de Estudios Eléctricos: <http://www.estudios-electricos.com/certificados>.

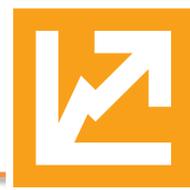


Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1 | Descripción del personal participante y fecha de ensayos | 7 |
| 1.2 | Nomenclatura..... | 8 |
| 2 | REQUERIMIENTO NORMATIVO..... | 9 |
| 2.1 | Control de tensión..... | 9 |
| 2.1.1 | Definición | 9 |
| 2.1.2 | Requerimientos asociados a la prestación | 9 |
| 2.2 | Control de frecuencia..... | 10 |
| 2.3 | Control terciario de frecuencia | 13 |
| 2.3.1 | Definición | 13 |
| 2.3.2 | Requerimientos asociados a la prestación | 13 |
| 3 | PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS..... | 14 |
| 3.1 | Procedimiento de pruebas..... | 14 |
| 3.2 | Instrumental utilizado para la adquisición de datos | 15 |
| 3.3 | Registro de señales con equipos de planta | 18 |
| 3.4 | Metodología general de los ensayos..... | 19 |
| 3.4.1 | Control de tensión..... | 19 |
| 3.4.2 | Control de frecuencia | 20 |
| 4 | EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN | 21 |
| 4.1 | Ensayos con la unidad en vacío (FSNL)..... | 22 |
| 4.1.1 | Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión | 22 |
| 4.1.2 | Determinación de los techos de excitación..... | 24 |
| 4.1.3 | Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobreflujo | 26 |
| 4.2 | Ensayos con la unidad conectada a la red..... | 28 |
| 4.2.1 | Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de subexcitación | 28 |
| 4.2.2 | Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobreexcitación | 31 |
| 4.3 | Análisis resultados pruebas dinámicas | 35 |
| 4.3.1 | Pruebas con la unidad en vacío..... | 35 |
| 4.3.2 | Pruebas con la unidad conectada a la red..... | 36 |
| 5 | ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA PQ TEÓRICO MÁXIMO | 37 |
| 5.1 | Puntos operativos alcanzados..... | 38 |



| | |
|---|-----------|
| 5.1.1 Análisis..... | 42 |
| 5.2 Curvas de capacidad..... | 44 |
| 5.2.1 Tensión en Terminales 0.95 p.u. | 46 |
| 5.2.2 Tensión en Terminales 1.00 p.u. | 47 |
| 5.2.3 Tensión en Terminales 1.05 p.u. | 48 |
| 5.2.4 Resumen de valores a informar | 49 |
| 5.2.5 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.95 p.u..... | 50 |
| 5.2.6 Ensayos de curva PQ para tensión de terminales 1.00 p.u. | 51 |
| 5.2.7 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.05 p.u..... | 52 |
| 6 ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE CONTROL TERCIARIO DE FRECUENCIA | 53 |
| 6.1 Reserva en giro..... | 53 |
| 6.1.1 Incrementos de carga de la unidad | 54 |
| 6.1.2 Bajada de carga de la unidad | 60 |
| 6.1.3 Análisis del control terciario de frecuencia reserva en giro | 66 |
| 6.2 Reserva en frío | 67 |
| 6.2.1 Análisis de control terciario de frecuencia reserva en frío..... | 70 |
| 7 ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN..... | 71 |
| 8 ANEXOS | 73 |
| 8.1 Verificación de curvas de capacidad en diferentes niveles de tensión..... | 73 |
| 8.1.1 Verificación curva PQ @ 0.95 p.u..... | 73 |
| 8.1.2 Verificación curva PQ @ 1.00 p.u..... | 80 |
| 8.1.3 Verificación curva PQ @ 1.05 p.u..... | 89 |
| 8.2 Datos característicos del generador | 98 |
| 8.3 Placa de transformador de excitación | 99 |
| 8.4 Placa de la turbina..... | 100 |
| 8.5 Curva de capacidad del generador | 101 |
| 8.6 Curva de saturación del generador..... | 102 |
| 8.7 Máxima y mínima tasa de toma y bajada de carga..... | 102 |
| 8.8 Protecciones de generador | 103 |
| 8.9 Diagrama de bloques del regulador de tensión | 105 |
| 8.10 Ajuste de limitadores | 108 |
| 8.11 Placa del transformador elevador..... | 110 |



| | |
|---|-----|
| 8.12 Placa del transformador de servicios auxiliares..... | 112 |
| 8.13 Valores de mínimo técnico y potencia máxima certificados por el CEN..... | 113 |
| 8.14 Archivos adjuntos entregados..... | 114 |
| 8.15 Acta de pruebas | 116 |
| 8.16 Certificado de calibración de equipamiento utilizado | 121 |



1 INTRODUCCIÓN

El presente documento resume los resultados del proceso de Verificación de Servicios Complementarios de la **Central Hidroeléctrica La Higuera Unidad 1**. Se incluyen, los servicios de **Control de Tensión** y **Control Terciario de Frecuencia** (reserva en giro y en frío) con el objeto de dar cumplimiento a las exigencias establecidas en la Norma Técnica de Servicios Complementarios vigente. Las verificaciones anteriormente señaladas se realizan siguiendo los lineamientos estipulados en las *“Guías de Verificación de Servicios Complementarios”* expedida por el Coordinador Eléctrico Nacional.

Los ensayos se realizaron siguiendo los procedimientos elaborados por Estudios Eléctricos S.A. y aprobado por el Coordinador Eléctrico Nacional, según documento *“EE-EN-2022-0019-RC_Procedimiento_Ensayos_SSCC_CH_La_Higuera_U1”*.

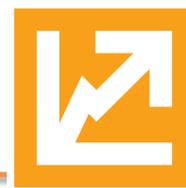
La verificación del Servicio Complementario de Control de Tensión se complementa con el informe de determinación de curvas PQ teóricas máximas de la unidad según documento *“EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1”* emitido en la etapa de análisis preliminar previo al desarrollo del procedimiento de ensayos.

La Central Hidroeléctrica La Higuera, ubicada en la comuna de San Fernando, región del Libertador Bernardo O’Higgins, se compone de dos (2) generadores sincrónicos, marca Power Machines modelo CB 433/190-10 YXJ4 de 91 MVA de potencia aparente nominal, impulsados cada uno por una turbina hidráulica del tipo Francis, marca Andritz Hydro modelo C320.01264.

El **regulador de tensión** de la unidad es marca Electrosila modelo AVR-2M y es completamente digital. Cuando la unidad se encuentra conectada a la red opera en modo **“control de tensión”**, el cual es el modo de operación normal del regulador.

El **regulador de velocidad** es marca Reivax modelo RVX, y es el encargado de regular todas las válvulas de control de la turbina. Cuando la unidad se encuentra conectada a la red opera en modo **“control de potencia”**, modo de operación normal del regulador.

La unidad se vincula al Sistema Eléctrico Nacional mediante un transformador elevador de relación 13.8 kV / (220 kV \pm 4 x 1.25%) de potencia nominal 91 MVA (ONAF).

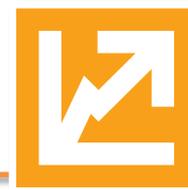


1.1 Descripción del personal participante y fecha de ensayos

| Empresa | Personal | Cargo/Puesto |
|----------------------|---------------------|----------------------------------|
| Estudios Eléctricos | Claudio Celman | Líder |
| Estudios Eléctricos | Iñaki Cubillos | Ingeniero de ensayos |
| Estudios Eléctricos | Fernando Montecinos | Ingeniero de ensayos |
| Estudios Eléctricos | Franco Di Rosa | Ingeniero de ensayos |
| Tinguiririca Energía | Cristopher López | Operaciones Tinguiririca Energía |
| Tinguiririca Energía | Claudio Rebolledo | Operaciones Tinguiririca Energía |

Tabla 1.1: Nómina de personal participante

Las pruebas se llevaron a cabo entre los días 7 de febrero y 9 de febrero de 2022.



1.2 Nomenclatura

| Tag | Descripción |
|----------------|--|
| ETERM | Tensión de terminales del generador |
| ITERM | Corriente de terminales del generador |
| EFD/VFD | Tensión de campo del generador / Tensión de campo de la excitatriz |
| IFD/IEX | Corriente de campo del generador / Corriente de campo de la excitatriz |
| PELEC | Potencia eléctrica activa generada |
| QELEC | Potencia eléctrica reactiva generada |
| FREC | Frecuencia eléctrica |
| SSAA | Servicios Auxiliares |
| AVR | Regulador de tensión |
| V/Hz | Limitador de sobre-flujo |
| OEL | Limitador de sobreexcitación |
| UEL | Limitador de subexcitación |
| SCL | Limitador de sobrecorriente estatórica |
| CEN | Coordinador Eléctrico Nacional |
| SEN | Sistema Eléctrico Nacional |
| SSCC | Servicios Complementarios |
| NT SSCC | Norma Técnica de Servicios Complementarios. |
| CT | Control de Tensión |
| CTFg | Control Terciario de Frecuencia reserva en giro |
| CTFf | Control Terciario de Frecuencia reserva en frío |
| TC | Transformador de Corriente |
| TP | Transformador de potencial |
| Pmax | Potencia activa bruta máxima de la unidad (140.6 MW) |
| Pmin | Potencia activa bruta correspondiente al mínimo técnico de la unidad (55 MW) |
| TA | 'Technical Assistant' |
| P1_CT | Despacho de la unidad a mínimo técnico (Pmin) |
| P2_CT | Despacho de la unidad a $(P5+2*P1) / 3$ |
| P3_CT | Despacho de la unidad a $(P5+P1) / 2$ |
| P4_CT | Despacho de la unidad a $(2*P5+P1) / 3$ |
| P5_CT | Despacho de la unidad a potencia máxima (Pmax) |

Tabla 1.2 – Nomenclatura empleada



2 REQUERIMIENTO NORMATIVO

2.1 Control de tensión

El objetivo de esta sección es citar los requerimientos mínimos que debe cumplir cada una de las instalaciones interconectadas al SEN para verificar las capacidades de prestar el servicio de control de tensión según la Norma Técnica de Servicios Complementarios (NT SSCC), y el Anexo Técnico “Verificación de Instalaciones para la Prestación de SSCC”.

2.1.1 Definición

Este servicio corresponde a acciones de control que permiten mantener la tensión de operación de las barras del sistema eléctrico en una banda predeterminada, dentro de los niveles admisibles establecidos en la normativa vigente. La naturaleza de la prestación de este servicio se considera local.

2.1.2 Requerimientos asociados a la prestación

Dependiendo de la naturaleza del equipamiento/unidad que preste este servicio complementario se distinguen diferentes tipos de requerimientos:

Unidades generadoras sincrónicas

- **Control de régimen permanente y dinámico:** Esta prestación corresponde a la actuación del controlador de tensión de una unidad generadora sobre la salida de la excitatriz, a través de la modificación de la corriente de campo, para contribuir a mantener la tensión de operación de una barra de referencia, en régimen permanente y ante la ocurrencia de contingencia, de acuerdo con la consigna previamente establecida por el Coordinador.

Las unidades generadoras sincrónicas deberán operar de forma estable y permanente, entregando o absorbiendo reactivos, de acuerdo con los límites establecidos en sus diagramas PQ, considerando las exigencias descritas en la NTSyCS.

El sistema de excitación de una máquina sincrónica deberá cumplir con que el error en estado estacionario de la tensión de generación deberá ser inferior a 0.25% para cualquier cambio en la carga del generador, según el artículo 3-12 literal b) de la NTSyCS.



Las unidades generadoras sincrónicas pertenecientes a Centrales Eléctricas de potencia nominal total igual o mayor a 50 [MW] con dos o más unidades generadoras deberán tener un sistema de excitación que permita recibir una señal proveniente de un control conjunto de potencia reactiva/tensión, cuya función sea controlar la tensión en barras de alta tensión de la central a un valor ajustado por el operador y efectuar una distribución proporcional de la potencia reactiva entre las unidades generadoras que se encuentren operando, según el artículo 3-13 de la NTSyCS.

Este servicio podría ser prestado por otras instalaciones, en la medida que cumplan con los requisitos y exigencias técnicas definidos por el Coordinador.

2.2 Control de frecuencia

El objetivo de esta sección es citar los requerimientos mínimos que debe cumplir cada una de las instalaciones interconectadas al SEN para verificar las capacidades para prestar el servicio de control de frecuencia, específicamente control rápido de frecuencia (CRF), control primario de frecuencia (CPF), control secundario de frecuencia (CSF) y control terciario de frecuencia según la Norma Técnica de Servicios Complementarios (NTSSCC), y el Anexo Técnico “Verificación de Instalaciones para la Prestación de SSSC”.

En líneas generales, las instalaciones deberán ser a los menos capaces de:

- Operar de manera estable en forma permanente en el rango de frecuencia comprendido entre 49 y 51 Hz, para tensiones comprendidas entre 0.95 y 1.05 por unidad de la tensión nominal, medido en su punto de conexión en el caso de parques eólicos o solares, en cualquier nivel de potencia.
- No reducir en más de un 10% su potencia activa entregada en estado normal de operación al SEN en su punto de conexión para frecuencias estabilizadas en el rango de 47.5 Hz y 49.5 Hz.
- Soportar cambios de frecuencia de hasta 2 Hz/s sin desconectarse del SEN. Para ello, la tasa de cambio de la frecuencia debe ser medida durante un período de 500 ms, según lo señalado en el artículo 3-11 de la NTSyCS.



En la Figura 2.1 se muestra la interpretación temporal de como intervienen las diferentes subcategorías de SSCC referidas al control de frecuencia según el Coordinador:

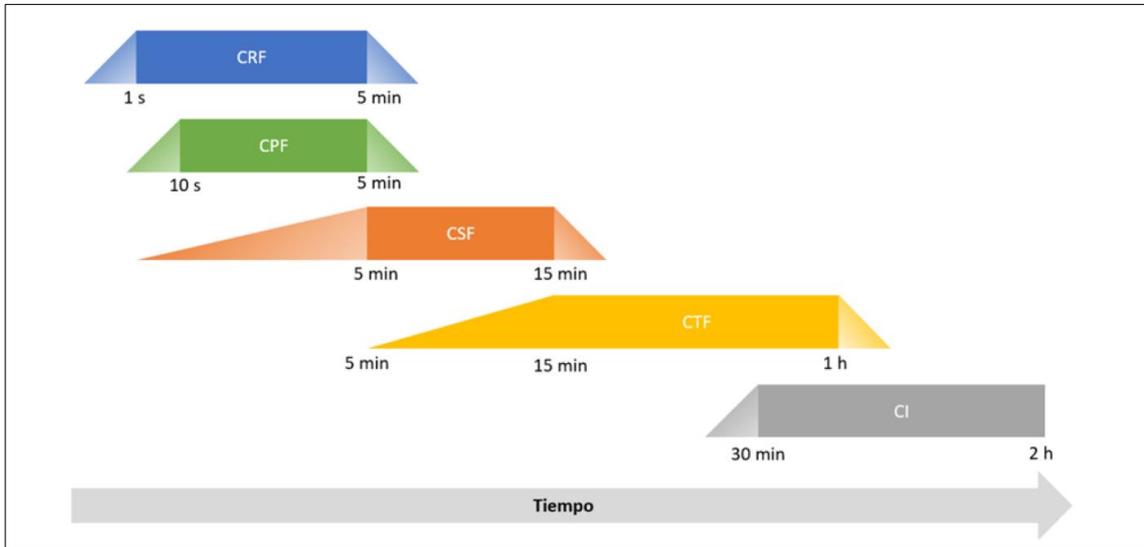


Figura 2.1: Control de Frecuencia – Subcategorías según intervalo temporal

En la Figura 2.2 se presenta la interpretación de los distintos tiempos involucrados en cada subcategoría de SSCC de control de frecuencia de manera referencial:

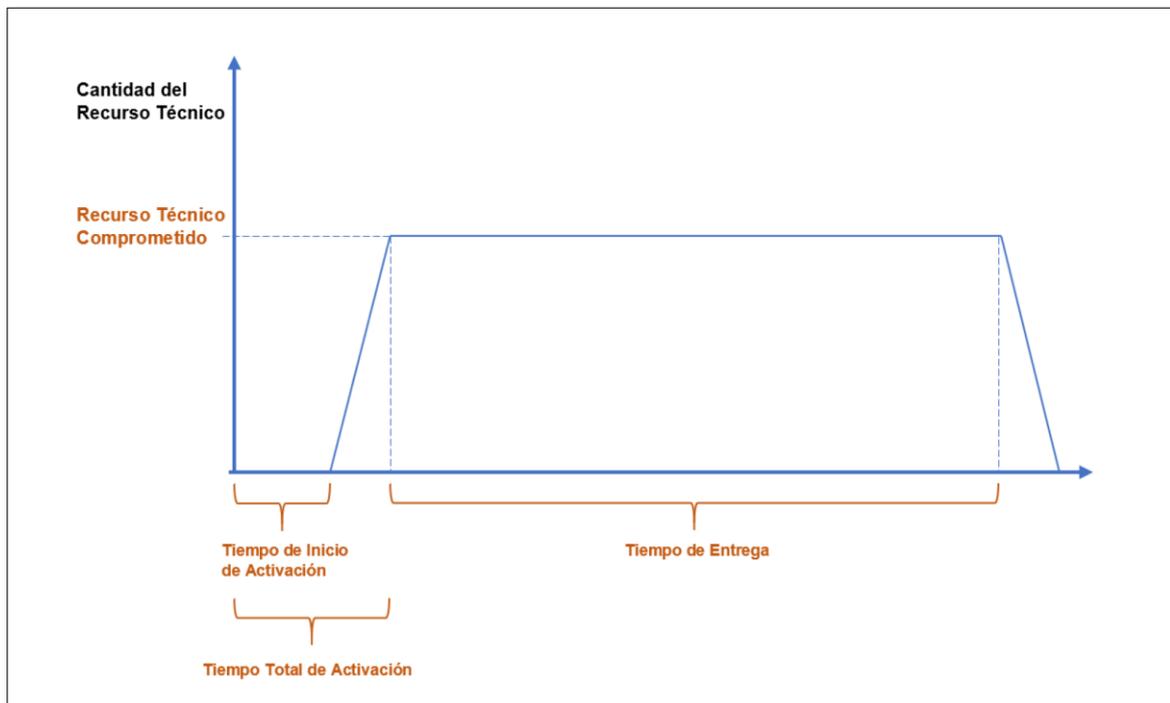


Figura 2.2: Control de Frecuencia – Subcategorías según intervalo temporal



Donde:

- **Tiempo de inicio de activación:** Período en que se inicia la prestación del “Recurso Técnico Comprometido”, contado desde que es requerido el respectivo Servicio Complementario. Se entenderá que el respectivo Servicio Complementario es requerido cuando se produzca una condición operativa en el SEN, que active automatismos locales; a través del envío de la consigna tratándose de servicios automáticos centralizados; o desde la instrucción, en la operación en tiempo real, del Coordinador tratándose de Servicios Complementarios cuyo modo de activación no es mediante automatismos, según corresponda.
- **Tiempo total de activación:** Período en que se entrega la totalidad del “Recurso Técnico Comprometido”, incluyendo el “Tiempo de inicio de activación”.
- **Tiempo de entrega:** Período en que las instalaciones deberán ser capaces de mantener el total del “Recurso Técnico Comprometido”, contando desde el momento en que transcurrió el “Tiempo total de activación”.

Lo presentado anteriormente en ambas figuras se puede resumir en la siguiente tabla:

| Subcategoría | Modo de activación | Tiempo de inicio de activación | Tiempo total de activación | Mínimo tiempo de entrega | Máximo tiempo de entrega |
|--------------|--|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| CRF | Automático local | - | 1 s | 5 min | - |
| CPF | Automático local | - | 10 s | 5 min | - |
| CSF | Automático centralizado | - | 5 min | 15 min | - |
| CTF | Por instrucción, en la operación en tiempo real, del CEN | 5 min | 15 min | - | 1 hs |
| CI | Por instrucción, en la operación en tiempo real, del CEN | - | 30 min | 2 hs | - |

Figura 2.3: Tiempos comprometidos por subcategoría – SSCC Control de Frecuencia



2.3 Control terciario de frecuencia

2.3.1 Definición

Corresponde a acciones de control activadas por instrucción del Coordinador en la operación en tiempo real, destinadas a restablecer las reservas del Control Secundario de Frecuencia o incorporar reservas adicionales con el objeto de preparar el SEN para responder a desequilibrios respecto de los cuales las reservas por otras categorías de Control de Frecuencia sean insuficientes.

Esta categoría de servicio considera las subcategorías de Control Terciario por Subfrecuencia (CTF+) y de Control Terciario por Sobrefrecuencia (CTF-).

El Tiempo de Inicio de Activación del CTF será de cinco (5) minutos a partir de la instrucción del Coordinador, y su máximo Tiempo de Entrega será de una (1) hora.

2.3.2 Requerimientos asociados a la prestación

Dentro de las consideraciones que se deberán tomar para la prestación de este servicio, y para mantener la coherencia con la cadena de reservas que se da entre los distintos controles, se deberá considerar el 100% de la entrega de reserva comprometida en un tiempo máximo de quince (15) minutos, medidos desde que el Coordinador entrega la instrucción al Centro de Control, de manera que el CTF reemplace la acción ejercida previamente por el CSF.

En el caso que este servicio sea prestado por usuarios finales, éstos deberán cumplir con los siguientes requisitos adicionales:

- a) Integrar al SCADA del Coordinador las señales de Potencia Activa, Potencia Reactiva, Tensión y Frecuencia en la barra de retiro.
- b) Disponer de un Centro de Control validado por el Coordinador, que permita cumplir las instrucciones dadas por el Coordinador en los tiempos que el servicio requiere.
- c) En el caso que uno o más usuarios finales participen de la prestación del servicio a través de un Agregador, este último deberá cumplir con los requisitos anteriores, de modo de realizar las labores de comunicación, entrega de información y coordinación de las acciones necesarias para la correcta prestación del servicio correspondiente.



3 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 Procedimiento de pruebas

El procedimiento implementado se diseñó en base al análisis de las características y capacidades de la **Central Hidroeléctrica La Higuera Unidad 1** detallado en el informe de determinación de curvas PQ teóricas máximas de la unidad según el documento **“EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1”**.

El procedimiento de pruebas se informa en el documento técnico: **“EE-EN-2022-0019-RC_Procedimiento_Ensayos_SSCC_CH_La_Higuera_U1”**.

Dicho procedimiento fue elaborado por Estudios Eléctricos S.A. y aprobado por el Coordinador Eléctrico Nacional. En dicho documento se analiza la factibilidad de llegar a los límites de subexcitación y sobreexcitación de la unidad y se define el plan de acción de trabajo.

Las pruebas realizadas en la unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera se llevaron a cabo de acuerdo con el procedimiento ya mencionado. Algunas de las pruebas realizadas sufrieron variaciones en terreno. Dichas variaciones con respecto al procedimiento se detallan en la sección correspondiente a cada prueba.



3.2 Instrumental utilizado para la adquisición de datos

Para realizar los ensayos se utilizó un equipo de adquisición de datos (propiedad de EE). Sus principales características se presentan en la Tabla 3.1.

| Denominación | Canales | Tasa de muestreo | Bits de resolución | N serie |
|---------------------|---------|------------------|--------------------|-------------|
| Adquisidor de datos | 16 | 0.1 – 10 kHz | 16 bits | EEEQ2010244 |

Tabla 3.1 – Característica de los equipos de adquisición

Se mide tensión y corriente en terminales del generador, y adicionalmente tensión y corriente de excitación. El adquisidor calcula indirectamente la potencia activa y reactiva en bornes, y la frecuencia eléctrica. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.1, en la Figura 3.2 y en la Figura 3.3.

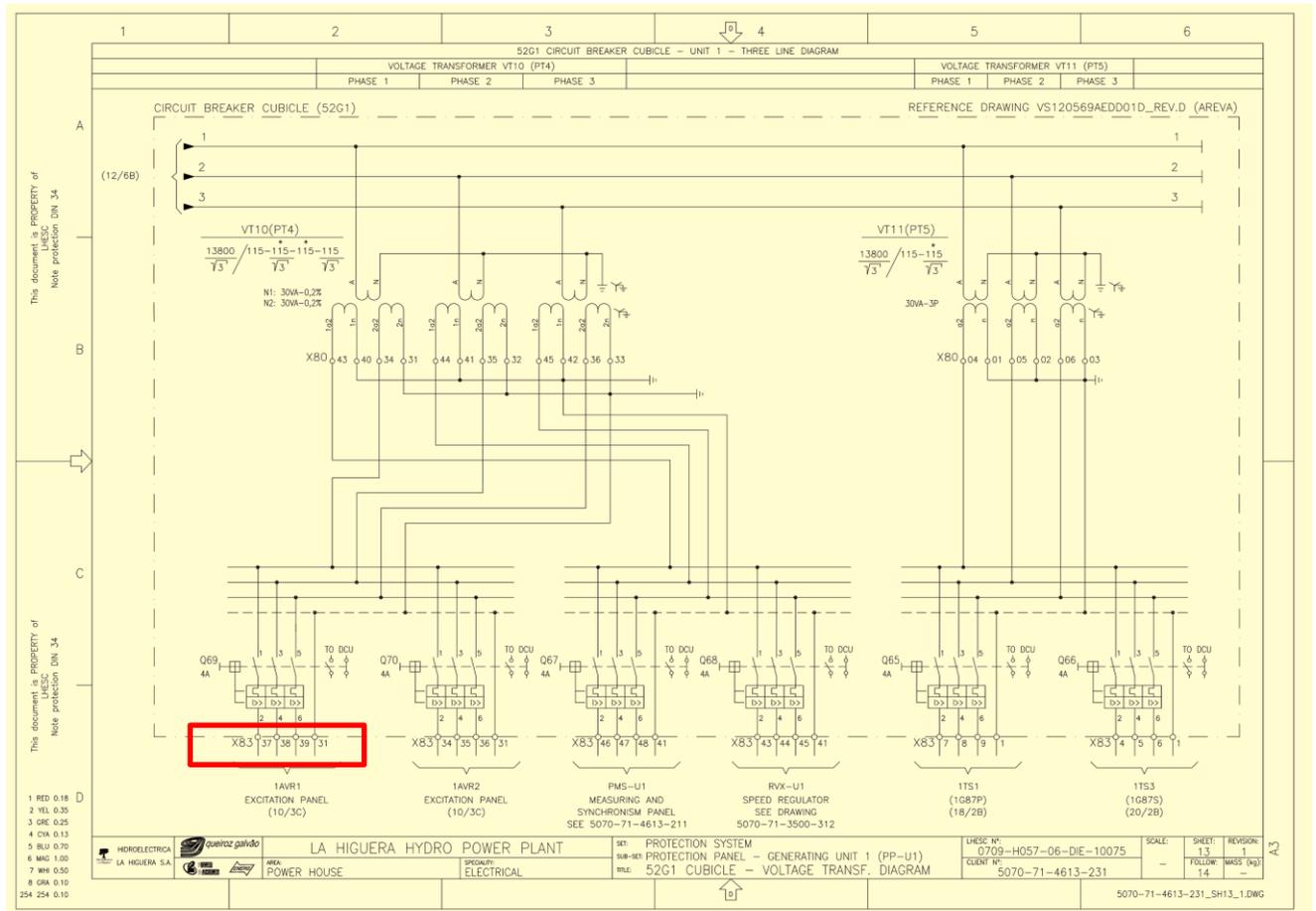


Figura 3.1: Puntos de conexión de tensión de terminales de la unidad 1

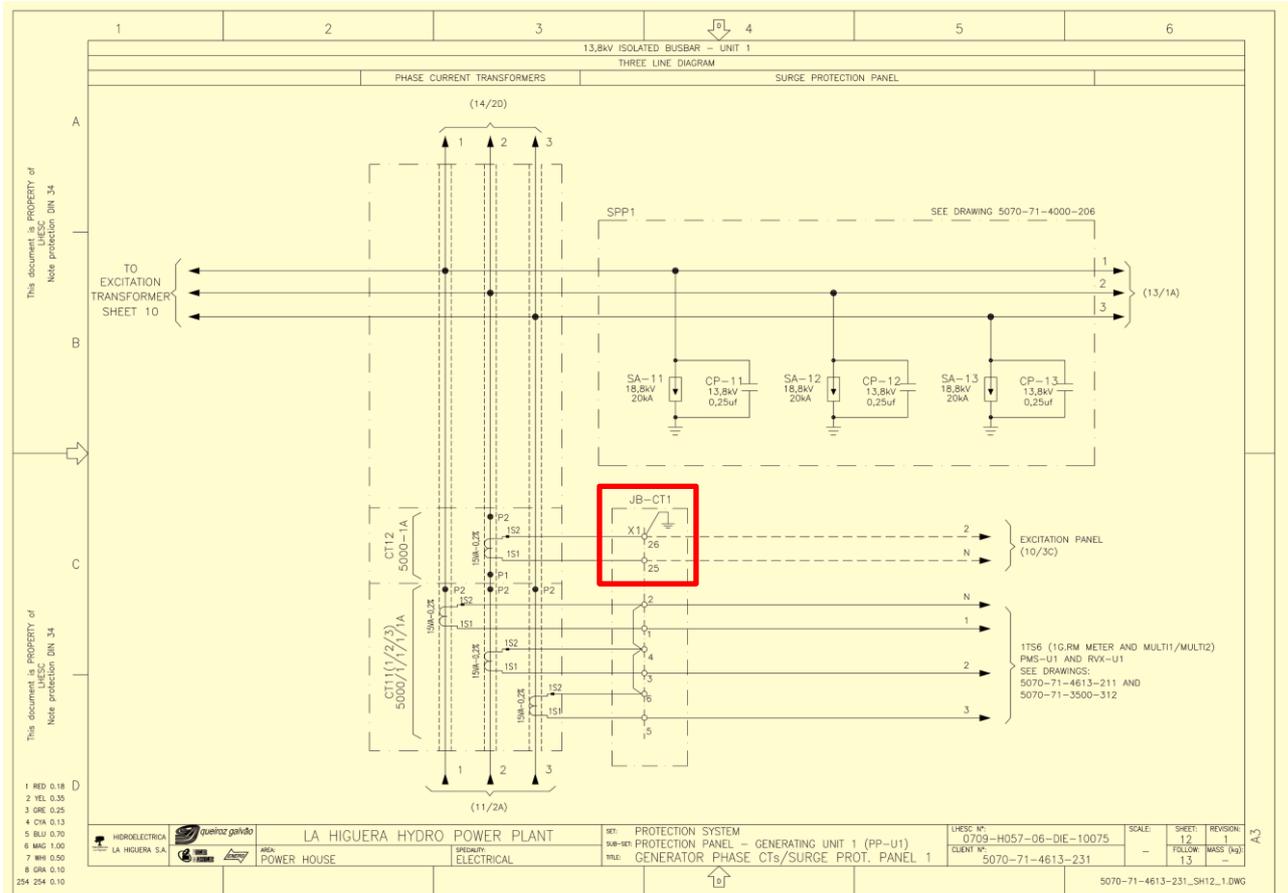


Figura 3.2: Puntos de conexión de corriente de terminales de la unidad 1

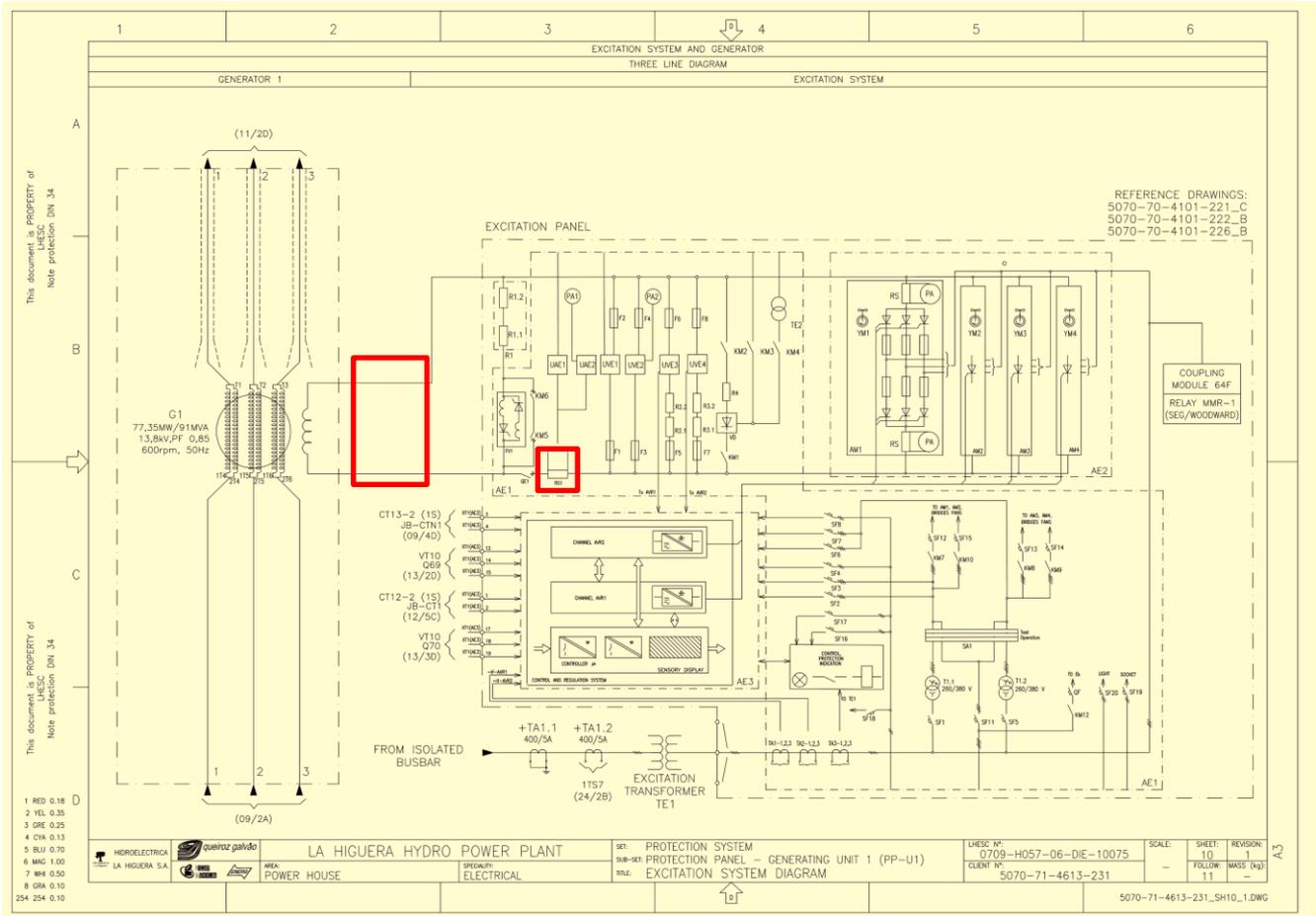


Figura 3.3: Puntos de conexión de tensión y corriente de campo en la unidad 1



3.3 Registro de señales con equipos de planta

Adicionalmente, se registran señales de interés con el sistema de adquisición de planta, el cual posee una tasa de muestreo de una (1) muestra por segundo. Los registros son exportados en formato .CSV.

Las señales registradas son:

1. Potencia activa en bornes del generador.
2. Potencia reactiva en bornes del generador.
3. Tensión de terminales del generador.
4. Corriente de terminales del generador.
5. Tensión de campo.
6. Corriente de campo.
7. Frecuencia eléctrica.



3.4 Metodología general de los ensayos

3.4.1 Control de tensión

Para realizar los ensayos correspondientes al control de tensión, se realizan escalones en la referencia de tensión de la unidad 1. Lo anterior se logra mediante la interfaz de control del AVR. En la Figura 3.4 se puede apreciar los valores base de los parámetros del AVR-2M de Electrosila.

| Nº | PARAMETER | VALUE | LIMIT |
|----|--|-------|-------|
| 1 | Rated rotor current , A | 1260 | |
| 2 | Rated rotor voltage , V | 130 | |
| 3 | Setting of thyristor monitoring, A | 500 | |
| 4 | Setting of cooling system monitoring, A | 500 | |
| 5 | Minimum thyristor current , A | 5 | |
| 6 | Thyristor current nonsymmetry, % | 10 | |
| 7 | Thyristor current unbalance, % | 15 | |
| 8 | Rated generator active power, MW | 77 | |
| 9 | Rated generator reactive power, MVar | 48 | |
| 10 | Rated stator current , A | 3807 | |
| 11 | Rated stator voltage , V | 13800 | |
| 12 | Delay of discrete input signals reading, ms | 200 | |
| 13 | Delay of thyristor monitoring, ms | 3000 | |
| 14 | Delay of RC-circuits monitoring, ms | 2000 | |
| 15 | Delay of SF DC monitoring in AVR supply circuit, s | 5 | |
| 16 | Delay of pressure transducers monitoring, ms | 5000 | |
| 17 | Delay of fan supply voltage monitoring, ms | 5000 | |
| 18 | Voltage of pressure transducers monitoring, % | 80 | |

The screenshot shows a control interface with a table of parameters and a control panel below it. The control panel includes buttons for 'Ug' and 'Var' for AVR 1, and 'If' and 'PF' for AVR 2. There are also indicators for 'REGULATOR Ug' and 'RS485 FAULT FAILURE' for both AVR units.

Figura 3.4: Interfaz de control del AVR



3.4.2 Control de frecuencia

Para realizar los ensayos correspondientes al control de frecuencia, se realizan cambios de consigna en la referencia del lazo de potencia de la unidad 1. Lo anterior se logra mediante la interfaz de control del GOV.

Por otro lado, para la realización de la prueba del control de frecuencia reserva en frío, se procedió al registro de las principales variables eléctricas desde el envío de la señal de sincronización de la unidad desde el estado de apagado hasta alcanzar su estado de mínimo técnico.



4 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN

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 de la unidad.

Se utilizan los siguientes despachos de potencia activa al ensayar.

| Punto de ensayo | Despacho de Potencia Activa [MW] |
|------------------------|---|
| P1_CT | 18.0 |
| P3_CT | 52.7 |
| P5_CT | 85.4 |

Tabla 4.1: Estados de carga ensayados

Los ensayos consisten en pruebas dinámicas de respuesta al escalón a los distintos limitadores de la unidad. Vale la aclaración que la unidad cuenta con las funciones de limitación de sub-excitación, sobre-excitación y sobreflujo. La Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 resumen los ensayos realizados en la unidad 1, tanto en vacío como conectada a la red.

| Pruebas en vacío |
|--|
| Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión |
| Techos de excitación |
| Respuesta del limitador de sobreflujo (V/Hz) |

Tabla 4.2: Distribución de las pruebas en vacío

| Despacho de Potencia Activa | Pruebas en carga |
|------------------------------------|-------------------------------|
| P1_CT | Limitador UEL y Limitador OEL |
| P3_CT | Limitador UEL y Limitador OEL |
| P5_CT | Limitador UEL y Limitador OEL |

Tabla 4.3: Distribución de las pruebas en carga



4.1 Ensayos con la unidad en vacío (FSNL)

Con la unidad operando en vacío, se aplican cambios de tipo escalón de diversas amplitudes¹ en la referencia de tensión del AVR. Esto se lleva a cabo mediante el software de mantenimiento del propio regulador (ver Figura 3.4). La duración de los escalones es tal, que permita el establecimiento de las principales magnitudes en bornes de la unidad.

4.1.1 Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión

A partir de un estado de operación con tensión nominal y velocidad rotacional nominal, se miden los requerimientos establecidos el artículo 3-12 de la NTSyCS. Para ello se aplica un escalón de amplitud 5% en la referencia de tensión del AVR de la unidad durante 20 segundos.

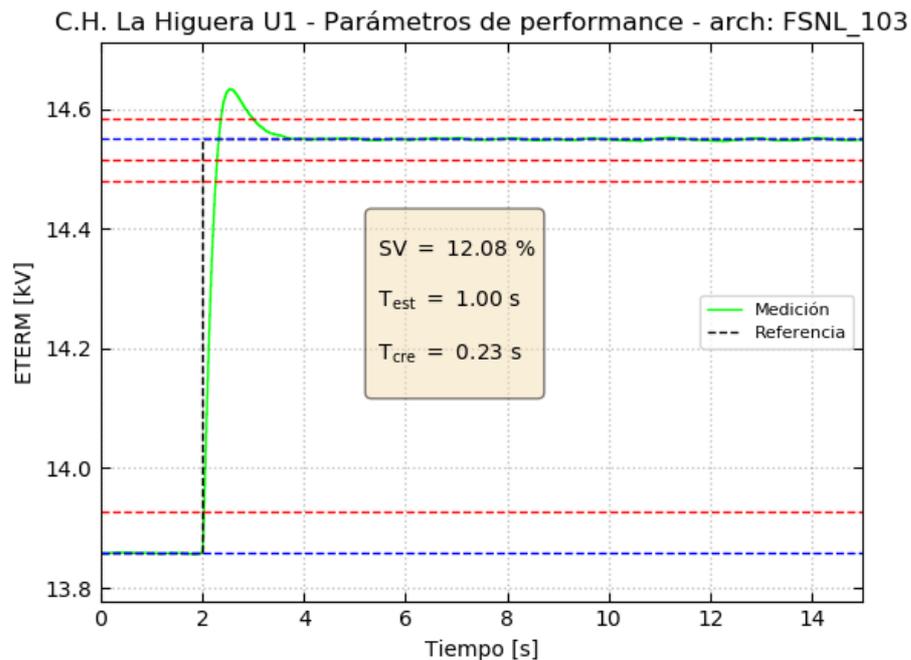


Figura 4.1: Parámetros de performance – $ETERM_o=1.0 pu$ – Step = 5%

¹ La tensión nominal de terminales de la unidad es de 13.8 kV.



| Parámetro | Valor Medido | Requerimiento Normativo |
|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| Sobreoscilación | 12.08 % | < 15% |
| Tiempo de crecimiento | 230 ms | < 400 ms |
| Tiempo de establecimiento | 1 seg | < 1.5 seg |
| Error estacionario ² | 0% | < 0.25% |

Tabla 4.4: Análisis de requerimiento establecidos por NTS&CS

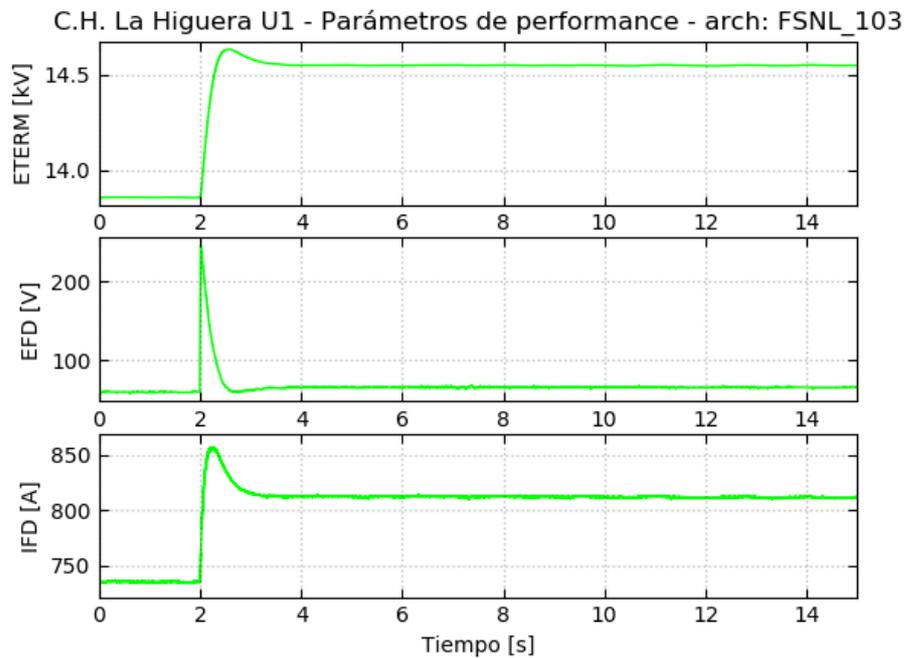


Figura 4.2: Respuesta en vacío – Step = 5%

² Dado que el AVR cuenta con acción integral en su lazo principal de control, el error estacionario resulta nulo, dando cumplimiento a lo exigido por la normativa.



4.1.2 Determinación de los techos de excitación

A los efectos de verificar los techos de excitación, se registra la respuesta dinámica del AVR ante la aplicación de un escalón del 12% durante aproximadamente 5 segundos en la consigna del regulador de tensión con la unidad operando en vacío.

En la Figura 4.3 se muestra la respuesta de la unidad ante un escalón de gran magnitud con el objetivo de determinar los techos de excitación.

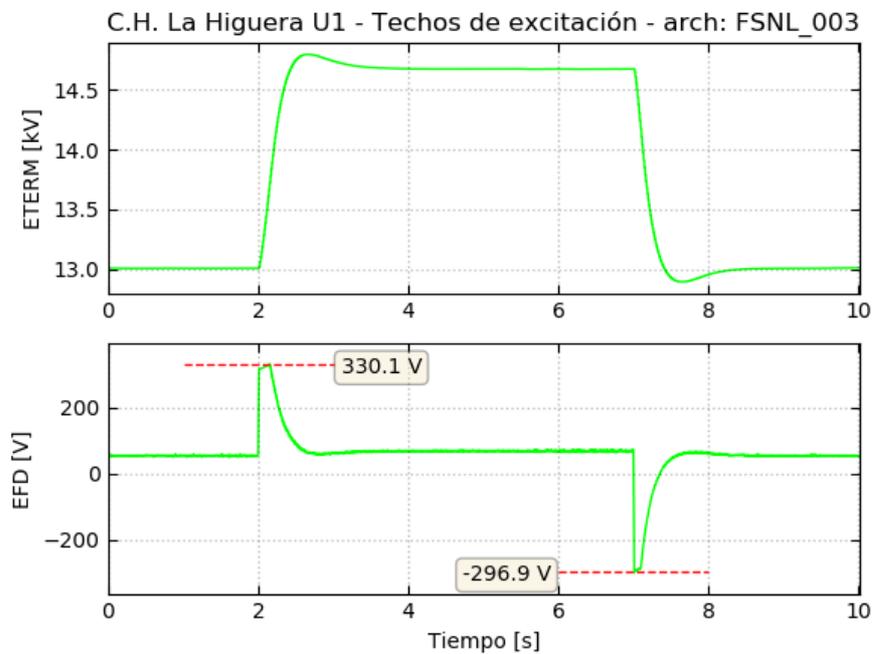


Figura 4.3: Techos de excitación – $ETERM_o = 0.934 pu$ – Step = 12%

A partir de la Figura 4.3 se tiene que los valores alcanzados son:

| Parámetro | Valor Medido [V] |
|----------------|------------------|
| Techo positivo | 330.1 |
| Techo negativo | -296.9 |

Tabla 4.5: Techos de excitación



Comparación teórica

De acuerdo con la información proporcionada por el Coordinado, el transformador de excitación está tomado de la salida de tensión de la propia unidad.

Teóricamente el voltaje del lado de continua, luego del proceso de rectificación, está dado por:

$$V_{CC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = 1.35 * V_{LL}$$

Donde V_{LL} simboliza la tensión AC del lado secundario del transformador de excitación. Según datos del fabricante (ver Figura 8.46), la tensión nominal mencionada es 260 V. Por lo que se obtiene:

$$V_{CC} = 1.35 * 260 V = 351 V$$

Como se puede observar, el valor obtenido durante los ensayos se aproxima al valor teórico determinado a partir de los datos característicos del transformador de excitación.



4.1.3 Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobreflujo

La actuación del limitador comienza cuando la frecuencia del generador es menor que la variable de umbral "FVHz" y el valor máximo de referencia de tensión "MaxSetUg" disminuye proporcionalmente con la frecuencia según la ganancia KVHz.

De esta manera, la salida del limitador modula la máxima tensión de referencia para el AVR.

Durante los ensayos, para lograr la actuación del limitador, se utilizó un ajuste reducido de los parámetros del limitador, los cuales pueden verse en la Tabla 4.5

| Variable | Ajuste permanente | Ajuste para la prueba |
|----------|-------------------|-----------------------|
| MaxSetUg | 109% | 105% |
| FVHz | 49.6 Hz | 50 Hz |
| KVHz | 2%/Hz | 5%/Hz |

Tabla 4.5 - Ajustes transitorios del limitador V/Hz

Dada la estructura del limitador, la cual responde ante variaciones en la frecuencia, se realizó el ensayo variando la velocidad del generador para ver la limitación actuando sobre la tensión de terminales.

Para lograr la actuación del limitador, se procedió a variar 1 Hz la frecuencia, observando la disminución de tensión en bornes de la unidad.

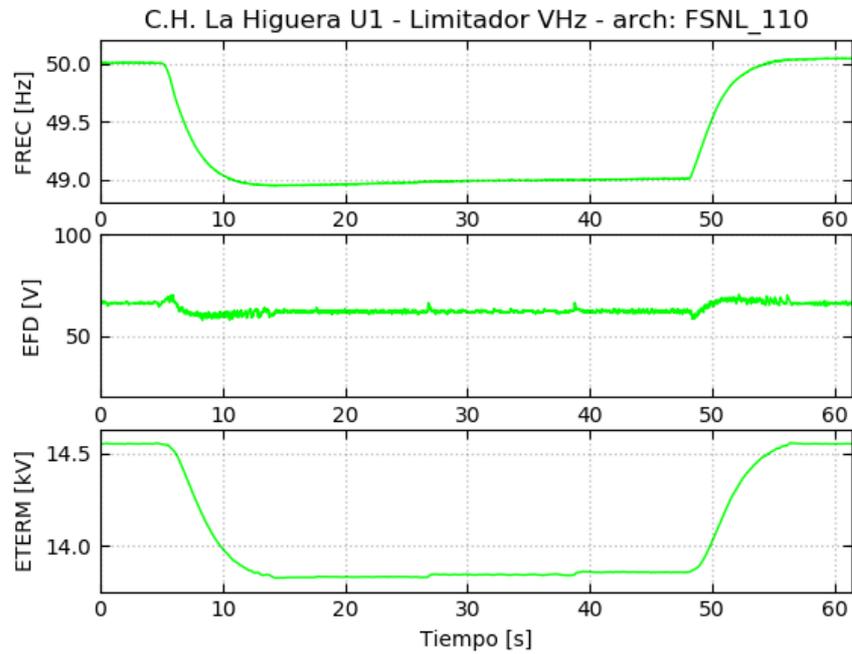


Figura 4.4 - Respuesta limitador V/Hz - $ETERM_o = 1.05 pu$ - $\Delta F = -1 Hz$



4.2 Ensayos con la unidad conectada a la red

Con la unidad operando conectada al SEN, se aplican cambios de tipo escalón de diversas amplitudes en la referencia de tensión del AVR. La duración de los escalones es tal, que permita el establecimiento de las principales magnitudes en bornes de la unidad.

4.2.1 Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de subexcitación

A continuación, se presenta la respuesta del sistema de excitación ante la aplicación de un escalón en la referencia de tensión de la unidad sincronizada con el SEN. Los escalones se realizan para tres (3) niveles distintos de potencia activa ('P1_CT', 'P3_CT' y 'P5_CT').

Dada la imposibilidad por parte del Sistema de transmisión de inyectar el reactivo necesario para alcanzar la actuación del limitador con los ajustes originales fue necesario realizar un ajuste reducido regresándolo luego a su valor original **únicamente** para el estado de baja carga. Para el resto de los estados la verificación se realizó con su ajuste permanente.

En la Tabla 4.6 se detallan los ajustes transitorios utilizados para las pruebas en baja carga y en la Tabla 4.7 los ajustes definitivos del limitador UEL.

| Parámetro | Valor ajustado [p.u.] |
|-----------|-----------------------|
| Q0 | -0.827 |
| Q1 | -0.827 |

Tabla 4.6 – Ajustes transitorios del limitador UEL³

| Parámetro | Valor definitivo [p.u.] |
|-----------|-------------------------|
| Q0 | -1.300 |
| Q1 | -1.300 |
| Q2 | -1.300 |
| Q3 | -0.597 |
| Q4 | 0 |

Tabla 4.7 – Ajustes permanentes del limitador UEL

³ Los valores de la tabla se encuentran expresados en base a $Q_{nom} = 48$ MVar, parámetro propio del AVR.



En la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 se muestra la respuesta del limitador UEL mediante un escalón del -3% en la referencia de tensión de la unidad. La línea roja segmentada representa el escalón del -3% y se visualiza que el limitador actúa en el valor parametrizado.

P1 CT = 18 MW

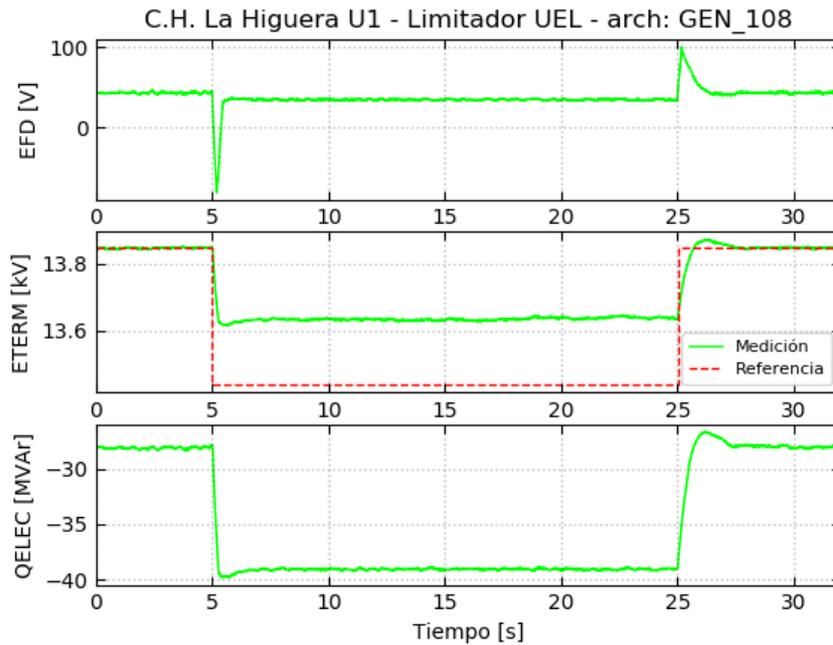


Figura 4.5 - Respuesta limitador UEL - $ETERMo = 1.003 pu$ - Step = -3%



P3 CT = 51.7 MW

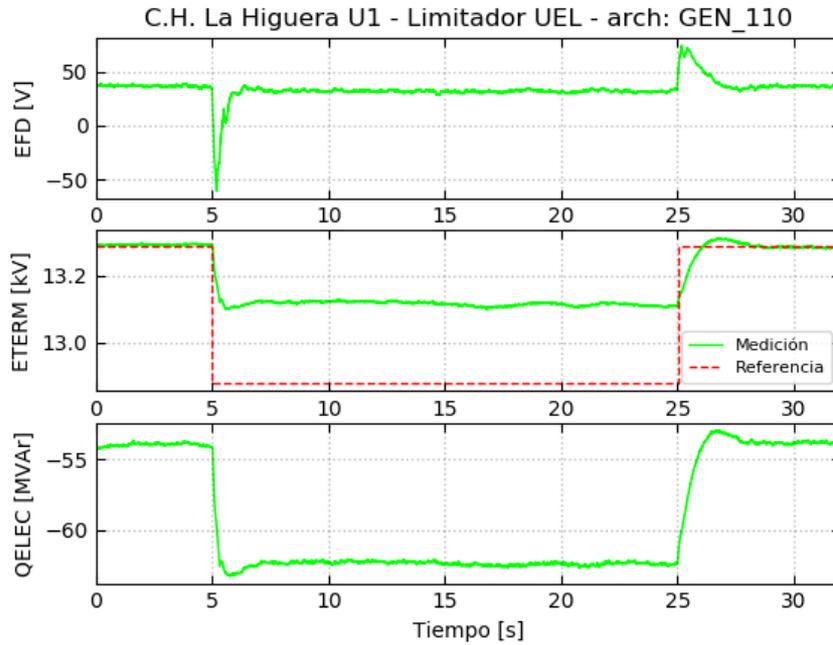


Figura 4.6 - Respuesta limitador UEL - $ETERMo = 0.962 pu$ - Step = -3%

P5 CT = 85.4 MW

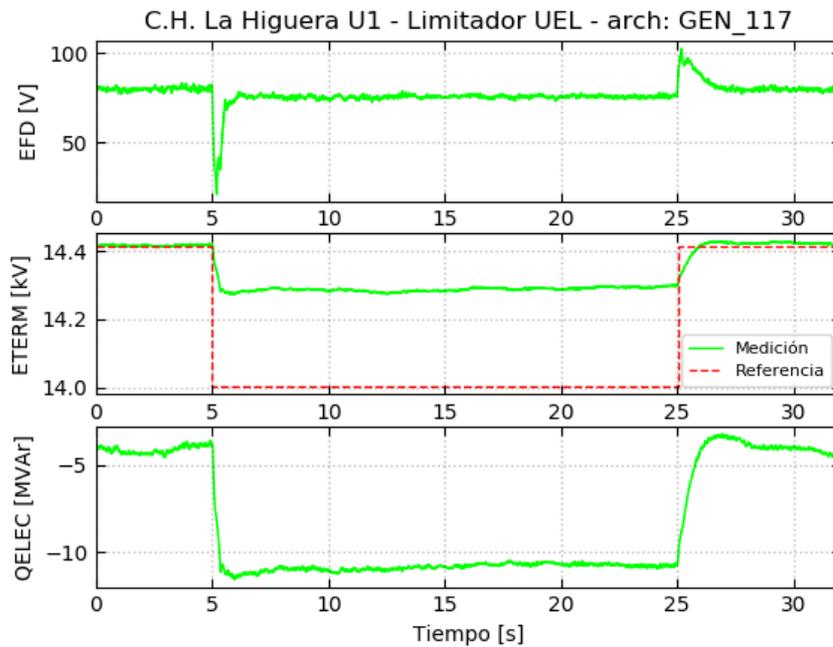


Figura 4.7 - Respuesta limitador UEL - $ETERMo = 1.041 pu$ - Step = -3%



4.2.2 Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobrecitación

A continuación, se presenta la respuesta del sistema de excitación de la unidad sincronizada con el SEN, realizadas para tres (3) niveles distintos de potencia activa ('P1_CT', 'P3_CT' y 'P5_CT') para la verificación del limitador OEL temporizado.

La característica de limitación de corriente de excitación es temporizada y queda determinada por una función inversamente proporcional a la corriente de excitación cuando se supera el valor de pickup (parámetro '*If1*'). La actuación del limitador se produce una vez alcanzado el valor de corriente máxima para así devolver a la corriente al valor de pickup mencionado anteriormente.

Al momento de los ensayos, el SEN presentó dificultades para absorber la potencia reactiva necesaria para probar el limitador con su parametrización original, de modo que se realizan las pruebas a seteo reducido según se muestra en la Tabla 4.8.

Para los tres niveles de carga, se ajustó el valor de pickup en 102% (parámetro '*If1*') y el tiempo de actuación del OEL temporizado a 60 s (parámetro '*Ift_y1*').

| Potencia activa de despacho [MW] | Parámetro | Ajuste reducido [A] | Valor de <i>If1</i> al que limita [A] |
|----------------------------------|---------------|---------------------|---------------------------------------|
| P1_CT = 18 | <i>Corrle</i> | 2769 | 881.24 |
| P3_CT = 51.7 | <i>Corrle</i> | 2769 | 881.24 |
| P5_CT = 85.4 | <i>Corrle</i> | 2569 | 948.85 |

Tabla 4.8 – Ajustes transitorios del limitador OEL

| Parámetro | Ajuste original | Ajuste reducido |
|---------------|-----------------|-----------------|
| <i>Corrle</i> | 1869 A | Ver Tabla 4.8 |
| <i>Ift_y1</i> | 120 s | 60 s |
| <i>If1</i> | 110 % | 102 % |

Tabla 4.9 – Ajustes originales del limitador OEL

En la Figura 4.8, Figura 4.10 y Figura 4.12 se muestra la respuesta del limitador OEL mediante la aplicación de un escalón del 1.5% para baja carga y 3% para media y alta carga, en la referencia de tensión de la unidad. Una vez alcanzado se espera el tiempo necesario para que el limitador OEL actúe.



P1 CT 18 = MW

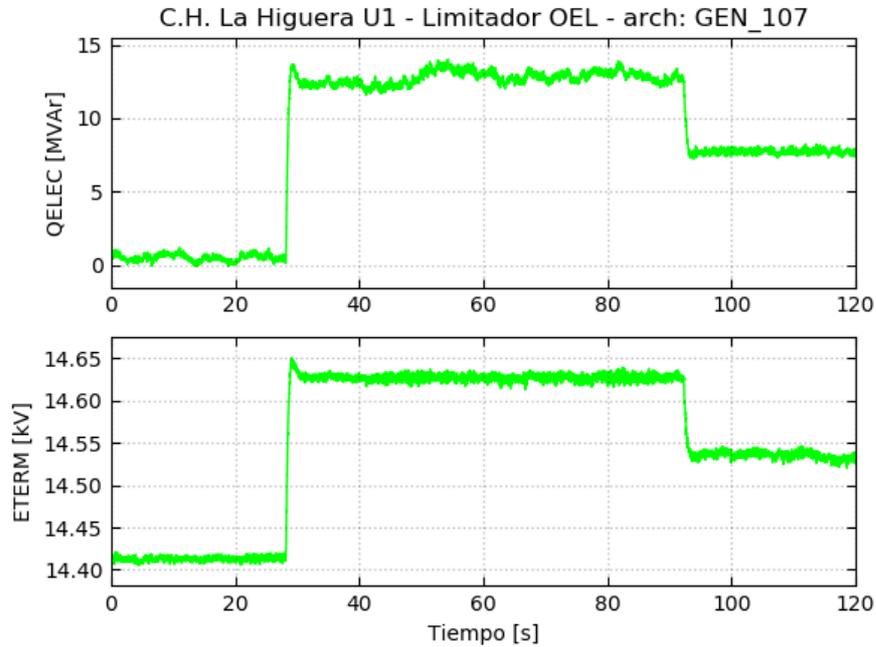


Figura 4.8 - Respuesta limitador OEL - $ETERM_o = 1.043 pu$ - Step = 1.5%

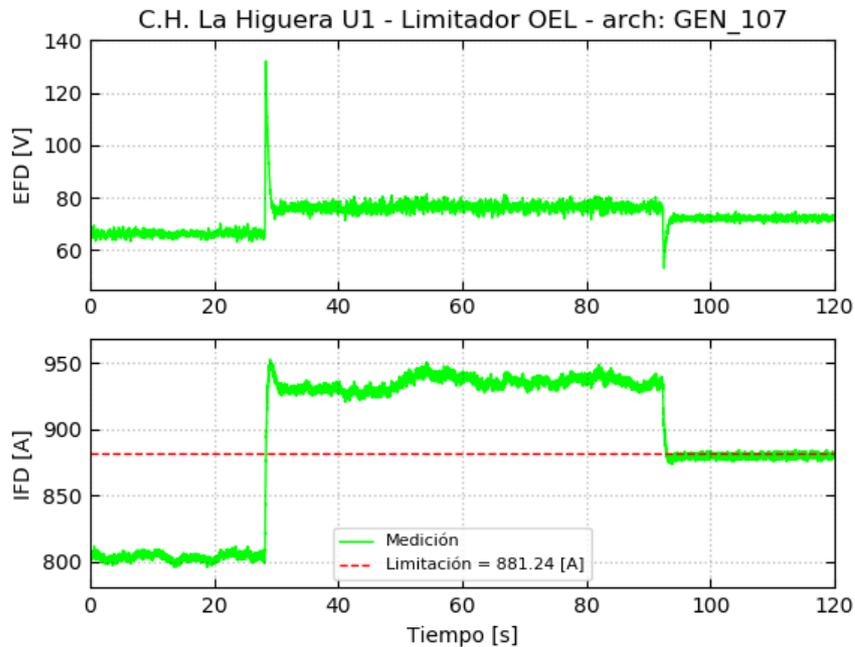


Figura 4.9 - Respuesta limitador OEL - Señales de campo



P3 CT = 51.7 MW

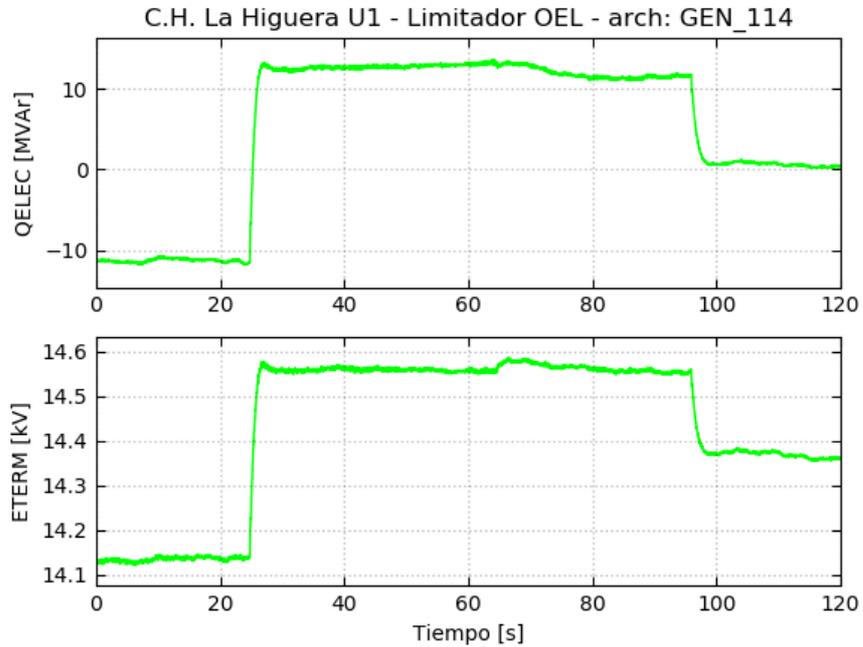


Figura 4.10 - Respuesta limitador OEL - $ETERM_0 = 1.024 pu$ - Step = 3%

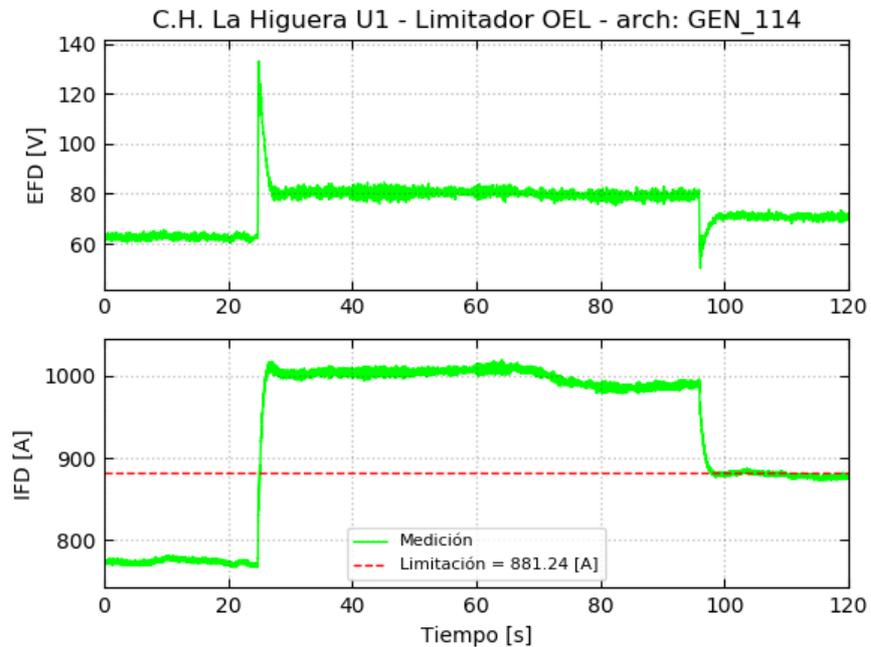


Figura 4.11 - Respuesta limitador OEL - Señales de campo



P5 CT = 85.4 MW

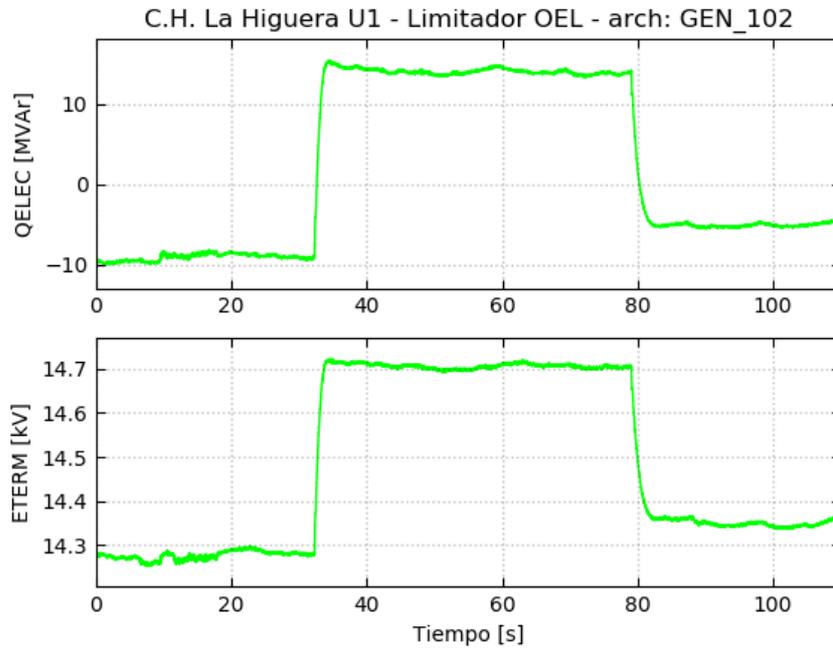


Figura 4.12 - Respuesta limitador OEL - $ETERMo = 1.034 pu$ - Step = 3%

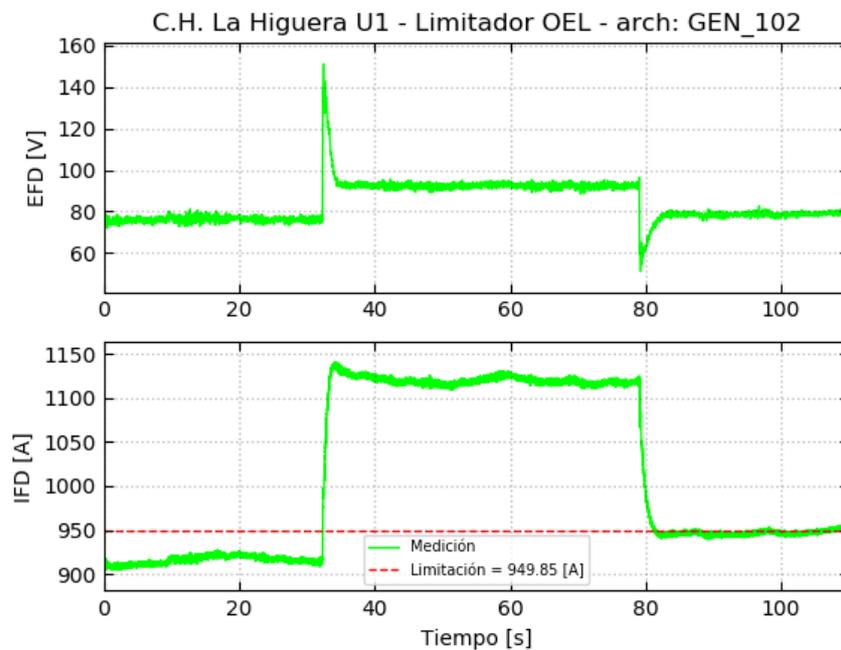


Figura 4.13 - Respuesta limitador OEL - Señales de campo



4.3 Análisis resultados pruebas dinámicas

Se presenta, a modo de resumen, un análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas dinámicas llevadas a cabo en la unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera.

4.3.1 Pruebas con la unidad en vacío

A partir de las pruebas en vacío de la unidad, se observa lo siguiente:

- **Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión:** Se obtiene una respuesta rápida, del tipo subamortiguada con muy poca sobreoscilación, **cumpliendo** lo exigido por la normativa vigente. Adicionalmente, dado que el AVR cuenta con acción integral en su lazo principal de control, el error estacionario resulta nulo, dando cumplimiento a lo exigido por la normativa.

La Tabla 4.10 resume los parámetros obtenidos por cada unidad.

| Parámetro | Requerimiento Normativo | HLH U1 |
|---------------------------|-------------------------|----------|
| Sobreoscilación | < 15% | 12.08 % |
| Tiempo de crecimiento | < 400 ms | 230 ms |
| Tiempo de establecimiento | < 1.5 seg | 1.00 seg |
| Error estacionario | < 0.25% | 0% |

Tabla 4.10 – Resultados respuesta temporal del lazo de regulación de tensión

- **Techos de excitación:** Se entiende por EFDnom a la tensión de campo del generador cuando la unidad opera a plena carga y factor de potencia nominal. Por otro lado, EFDmax es la tensión de campo en el valor de techo.

A partir de la información suministrada por el fabricante del sistema de excitación de la unidad 1 (Figura 8.45) se determinan los valores de EFDnom con los que se puede evaluar la relación EFDmax/EFDnom, siendo EFDnom = 130 V y EFDmax = 330.1 V. De esta manera, el resultado obtenido es:

| Parámetro | Requerimiento Normativo | HLH U1 |
|---------------|-------------------------|--------|
| EFDmax/EFDnom | > 2.0 | 2.53 |

Tabla 4.11 - Resultados de los techos de excitación



- **Limitador de sobreflujo (VHz):** En ambas unidades se ha probado la correcta actuación del limitador de sobreflujo, adicionalmente se verifica en ambas unidades, que se **cumple** con la normativa por cuanto se encuentra seteado en 109%, lo cual no interfiere el rango operativo de la unidad 49-51 Hz y 0.95-1.05 p.u. de tensión.

4.3.2 Pruebas con la unidad conectada a la red

A partir de las pruebas en carga de la unidad (ver apartado 4.2), se observa lo siguiente:

- **Limitador subexcitación (UEL):** Se verificó la correcta actuación del limitador en su seteo reducido para baja carga y permanente para media y alta carga. Se evidencia un control rápido y estable que limita efectivamente la potencia reactiva absorbida por la unidad. Se puede concluir a partir del análisis de curva PQ y protecciones del capítulo 5 que el limitador tiene una adecuada coordinación con la protección de mínima excitación (40G).
- **Limitador sobreexcitación (OEL):** Se verificó la correcta actuación del limitador a seteos reducidos debido a la incapacidad de lograr el reactivo deseado con la parametrización original. Se evidencia un control rápido y estable que limita efectivamente la potencia reactiva inyectada por la unidad en el valor ajustado lo que permite inferir una correcta actuación en su valor de ajuste permanente.



5 ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA PQ TEÓRICO MÁXIMO

En esta sección se presentan los ensayos realizados con el objetivo de comparar la capacidad real de la unidad con la informada en el documento técnico de código **“EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1”** donde se han desarrollado las curvas de capacidad teóricas máximas.

Los ensayos se realizan con la unidad sincronizada al SEN y en cuatro (4) despachos de potencia activa entre el mínimo técnico y la potencia máxima de la unidad.

Los ensayos consisten en pruebas estáticas, donde primero se intenta consignar la tensión objetivo en terminales mediante la ayuda de la unidad restante. Luego se solicita colaboración del CEN, para ajustar la tensión en la barra S/E Tinguiririca 154 kV de manera tal de lograr ajustar la inyección/absorción de potencia reactiva en bornes del generador, en concordancia con lo presentado en el procedimiento de ensayos de código **“EE-EN-2022-0019-RC_Procedimiento_Ensayos_SSCC_CH_La_Higuera_U1”**. Adicionalmente, se destaca que el cambiador de tomas del transformador elevador de la unidad opera en vacío, siendo la posición de operación normal la N°3, por lo cual su manipulación no es una maniobra posible de ajuste.

Durante el desarrollo de las pruebas se solicita colaboración al despacho en reiteradas oportunidades, sin embargo, dadas las condiciones del SEN, el despacho no logra hacer un cambio significativo en la tensión en la S/E Tinguiririca 154 kV lo que implica que no es posible llevar a cabo los ensayos para los cinco (5) niveles de tensión solicitados.



5.1 Puntos operativos alcanzados

Luego de alcanzar cada punto operativo objetivo (P, Q, V) se registran las principales magnitudes durante al menos quince (15) minutos para el estado de carga 'P5_CT' y al menos cinco (5) minutos para los demás estados de carga, esto con el fin de comprobar la estabilidad en cada uno. Para los casos en los que los puntos de la curva resultan no ensayables, se muestra un registro de aproximadamente tres (3) minutos con el fin de demostrar el límite operable de la unidad según las restricciones del SEN.

Con el objetivo de identificar cada punto operativo a alcanzar en cada nivel de tensión, se utiliza la nomenclatura y correlación presentada en la Tabla 5.1, la cual surge de la interpretación de la Figura 5.1.

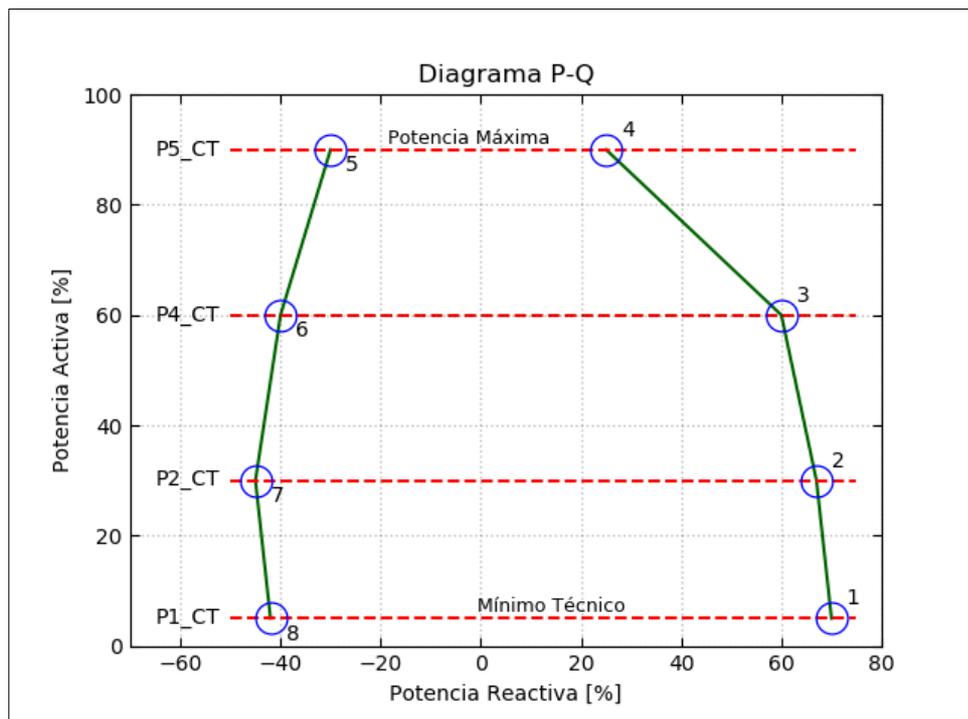


Figura 5.1: Puntos PQ referenciales a verificar en régimen estacionario para los 5 niveles de tensión

| Despacho de Potencia Activa | Valor [MW] |
|-----------------------------|------------|
| P1_CT | 18.0 |
| P2_CT | 40.5 |
| P4_CT | 63.0 |
| P5_CT | 85.4 |

Tabla 5.1: Nomenclatura utilizada para los distintos puntos operativos alcanzados



Las mediciones realizadas para los distintos niveles de tensión y diferentes puntos de despacho de potencia activa son presentadas en los siguientes anexos:

- Anexo 8.1.1: Verificación curva PQ @ 0.95 p.u.
- Anexo 8.1.2: Verificación curva PQ @ 1.0 p.u.
- Anexo 8.1.3: Verificación curva PQ @ 1.05 p.u.

A modo de resumen, en la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 se presenta un detalle donde se contrastan los puntos operativos objetivo (P, Q, V) con los puntos alcanzados durante los ensayos para cada despacho de potencia activa y considerando la parte subexcitada y sobrexcitada, respectivamente. En los casos en que no se alcanza la potencia reactiva objetivo, se representa con color **rojo** la potencia reactiva alcanzada.



| Subexcitación | | | | |
|--|---------------------------------|--|---|---|
| Tensión objetivo en terminales [p.u.] | Despacho potencia activa | Potencia reactiva objetivo [MVar] | Potencia reactiva alcanzada [MVar] | Tensión alcanzada en terminales [p.u.] |
| 0.90⁴ | P1_CT = 18.0 MW | -39.4 | - | - |
| | P2_CT = 40.5 MW | -58.1 | - | - |
| | P4_CT = 63.0 MW | -52.3 | - | - |
| | P5_CT = 84.5 MW | -2.6 | - | - |
| 0.95 | P1_CT = 18.0 MW | -47.1 | -52.54 | 0.97 |
| | P2_CT = 40.5 MW | -62.1 | -62.38 | 0.96 |
| | P4_CT = 63.0 MW | -59.2 | -62.18 | 0.96 |
| | P5_CT = 84.5 MW | -11.7 | - | - |
| 1.00 | P1_CT = 18.0 MW | -56.4 | -56.14 | 0.99 |
| | P2_CT = 40.5 MW | -62.1 | -62.55 | 0.97 |
| | P4_CT = 63.0 MW | -62.1 | -62.31 | 0.97 |
| | P5_CT = 84.5 MW | -11.7 | -8.21 | 1.02 |
| 1.05 | P1_CT = 18.0 MW | -62.1 | -39.07 | 1.01 |
| | P2_CT = 40.5 MW | -62.1 | -33.82 | 1.01 |
| | P4_CT = 63.0 MW | -62.1 | -28.45 | 1.01 |
| | P5_CT = 84.5 MW | -11.7 | -8.44 | 1.03 |
| 1.10⁵ | P1_CT = 18.0 MW | -62.1 | - | - |
| | P2_CT = 40.5 MW | -62.1 | - | - |
| | P4_CT = 63.0 MW | -62.1 | - | - |
| | P5_CT = 84.5 MW | -11.7 | - | - |

Tabla 5.2: Resumen de puntos operativos alcanzados – Zona de subexcitación

En la Tabla 5.2 se indica mediante “-”, que existen niveles de tensión no alcanzados en bornes del generador debido a la incapacidad del SEN para mover la tensión en la barra S/E Tinguiririca 154 kV.

⁴ El nivel de tensión 0.90 p.u. se encuentra fuera del rango de tensión de operación de los SS/AA, por lo que no es posible ensayar dicho nivel de tensión

⁵ El nivel de tensión 1.10 p.u. se encuentra fuera del rango de tensión de operación de los SS/AA, por lo que no es posible ensayar dicho nivel de tensión. Además, el limitador VHz no permite aumentar la tensión sobre 1.09 p.u.



| Sobreexcitación | | | | |
|--|---------------------------------|--|---|---|
| Tensión objetivo en terminales [p.u.] | Despacho potencia activa | Potencia reactiva objetivo [MVar] | Potencia reactiva alcanzada [MVar] | Tensión alcanzada en terminales [p.u.] |
| 0.90⁶ | P1_CT = 18.0 MW | 79.9 | - | - |
| | P2_CT = 40.5 MW | 71.2 | - | - |
| | P4_CT = 63.0 MW | 52.3 | - | - |
| | P5_CT = 84.5 MW | 2.6 | - | - |
| 0.95 | P1_CT = 18.0 MW | 82.4 | -33.17 | 0.99 |
| | P2_CT = 40.5 MW | 76.3 | -32.54 | 0.99 |
| | P4_CT = 63.0 MW | 59.2 | -29.28 | 0.99 |
| | P5_CT = 84.5 MW | 13.1 | - | - |
| 1.00 | P1_CT = 18.0 MW | 76.3 | 7.35 | 1.04 |
| | P2_CT = 40.5 MW | 73.3 | 7.54 | 1.04 |
| | P4_CT = 63.0 MW | 65.7 | -22.71 | 1.00 |
| | P5_CT = 84.5 MW | 31.3 | 6.58 | 1.05 |
| 1.05 | P1_CT = 18.0 MW | 68.6 | 33.63 | 1.07 |
| | P2_CT = 40.5 MW | 65.8 | 31.84 | 1.08 |
| | P4_CT = 63.0 MW | 60.8 | 32.18 | 1.08 |
| | P5_CT = 84.5 MW | 42.7 | 22.39 | 1.08 |
| 1.10⁷ | P1_CT = 18.0 MW | 59.1 | - | - |
| | P2_CT = 40.5 MW | 56.5 | - | - |
| | P4_CT = 63.0 MW | 51.8 | - | - |
| | P5_CT = 84.5 MW | 44.9 | - | - |

Tabla 5.3: Resumen de puntos operativos alcanzados – Zona de sobreexcitación

En la Tabla 5.3 se indica mediante “-”, que existen niveles de tensión no alcanzados en bornes del generador debido a la incapacidad del SEN para mover la tensión en la barra S/E Tinguiririca 154 kV.

⁶ El nivel de tensión 0.90 p.u. se encuentra fuera del rango de tensión de operación de los SS/AA, por lo que no es posible ensayar dicho nivel de tensión.

⁷ El nivel de tensión 1.10 p.u. se encuentra fuera del rango de tensión de operación de los SS/AA, por lo que no es posible ensayar dicho nivel de tensión. Además, el limitador VHz no permite aumentar la tensión sobre 1.09 p.u.



5.1.1 Análisis

A partir de la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 se observa que existen puntos objetivos que no son alcanzados de acuerdo a las exigencias de la guía de verificación, debido a que no se puede llevar la tensión de la barra S/E Tinguiririca 154 kV a los extremos del rango de operación normal.

Por lo tanto, en función de los resultados de dicha sección, se resume en la Tabla 5.4, Tabla 5.5, la condición final de cada punto operativo de la curva PQ en la zona de subexcitación y sobreexcitación para cada uno de los niveles de tensión y estados de carga solicitados por la guía de verificación.

| Despacho potencia activa | Subexcitación | | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------|---|
| | Tensión 0.9 p.u. | Tensión 0.95 p.u. | Tensión 1.0 p.u. | Tensión 1.05 p.u. | Tensión 1.1 p.u. |
| P1_CT = 18.0 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | Alcanzado aumentando tensión del generador | Alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA |
| P2_CT = 40.5 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | Alcanzado | Alcanzado disminuyendo tensión del generador | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA |
| P4_CT = 63.0 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | Alcanzado | Alcanzado disminuyendo tensión del generador | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |
| P5_CT = 84.5 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | No alcanzado | No alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |

Tabla 5.4 – Resumen de condición final de cada punto operativo – Zona de subexcitación

| Despacho potencia activa | Sobreexcitación | | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|---|
| | Tensión 0.9 p.u. | Tensión 0.95 p.u. | Tensión 1.0 p.u. | Tensión 1.05 p.u. | Tensión 1.1 p.u. |
| P1_CT = 18.0 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | No alcanzado | No alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |
| P2_CT = 40.5 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | No alcanzado | No alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |
| P4_CT = 63.0 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | No alcanzado | No alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |
| P5_CT = 84.5 MW | No operable debido a tensión en SS/AA | No alcanzado | No alcanzado | No alcanzado | No operable debido a tensión en SS/AA y ajuste limitador V/HZ |

Tabla 5.5 – Resumen de condición final de cada punto operativo – Zona de sobreexcitación



Donde:

- **Alcanzado:** Se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que pudieron ser alcanzados a la tensión objetivo en bornes del generador.
- **Alcanzado aumentando/disminuyendo la tensión del generador:** Se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser alcanzados a la tensión objetivo en bornes del generador como consecuencia del flujo de carga. Se pudo alcanzar el valor de reactivo objetivo a una tensión superior/inferior en la secuencia según corresponda. No se prevé ninguna restricción por parte de la unidad.
- **No operable:** Se utiliza el termino para indicar los puntos operativos objetivos (P, Q, V) que no pueden ser verificados debido a restricciones operativas de la central. (ej. ajuste protecciones de los generadores, tensión de SS/AA, etc.).
- **No alcanzado:** Se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser verificados para el nivel de tensión en la barra planteada. Lo anterior como consecuencia del flujo de carga y de las restricciones operativas impuestas por el SEN el día de las pruebas sobre la barra a la cual se conecta la central.



5.2 Curvas de capacidad

Las curvas de capacidad de la unidad han sido calculadas justificadamente en el informe de determinación de curvas PQ teóricas máximas “**EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1**” elaborado por Estudios Eléctricos.

Cabe mencionar que para el nivel de tensión de 0.9 p.u. en bornes de generador no es posible operar la unidad porque la tensión de los SS/AA se encontraría fuera de su rango de operación seguro, lo que impide alcanzar dicho valor⁸. De esta manera se descarta la operación y, por ende, la generación de la curva de capacidad en este nivel de tensión en bornes de generador.

Por otro lado, para el nivel de tensión de 1.1 p.u. en bornes de generador no es posible operar la unidad porque el limitador de sobreflujo (V/Hz) limita la tensión en 1.09 p.u., lo que impide alcanzar dicho valor⁹. Además, la tensión de los SS/AA se encontraría fuera de su rango de operación seguro. De esta manera se descarta la operación y, por ende, la generación de la curva de capacidad en este nivel de tensión en bornes de generador.

⁸ Para mayor detalle referirse al informe técnico “**EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1**”.

⁹ Para mayor detalle referirse al informe técnico “**EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1**”.



A continuación, se presentan las curvas de capacidad definidas para cada nivel de tensión operable en la **Unidad 1** de la **Central Hidroeléctrica La Higuera**.

Se muestran las siguientes curvas:

- Corriente nominal de estator (trazo verde oscuro continuo)
- Ajuste de limitador SCL (trazo verde oscuro segmentado)
- Ajuste de limitador OEL (trazo violeta segmentado)
- Protección de pérdida de excitación (trazo azul continuo)
- Estabilidad teórica (trazo azul segmentado)
- Ajuste de limitador UEL (trazo rojo segmentado)
- Potencia máxima (trazo negro continuo)
- Mínimo técnico (trazo naranja continuo)
- Factor de potencia nominal (trazo rojo continuo)
- Ajuste de limitador MEL (trazo gris continuo)

Además, se muestra una tabla resumen de los valores de curva PQ alcanzados en el formato de archivo Excel requerido por el CEN.



5.2.1 Tensión en Terminales 0.95 p.u.

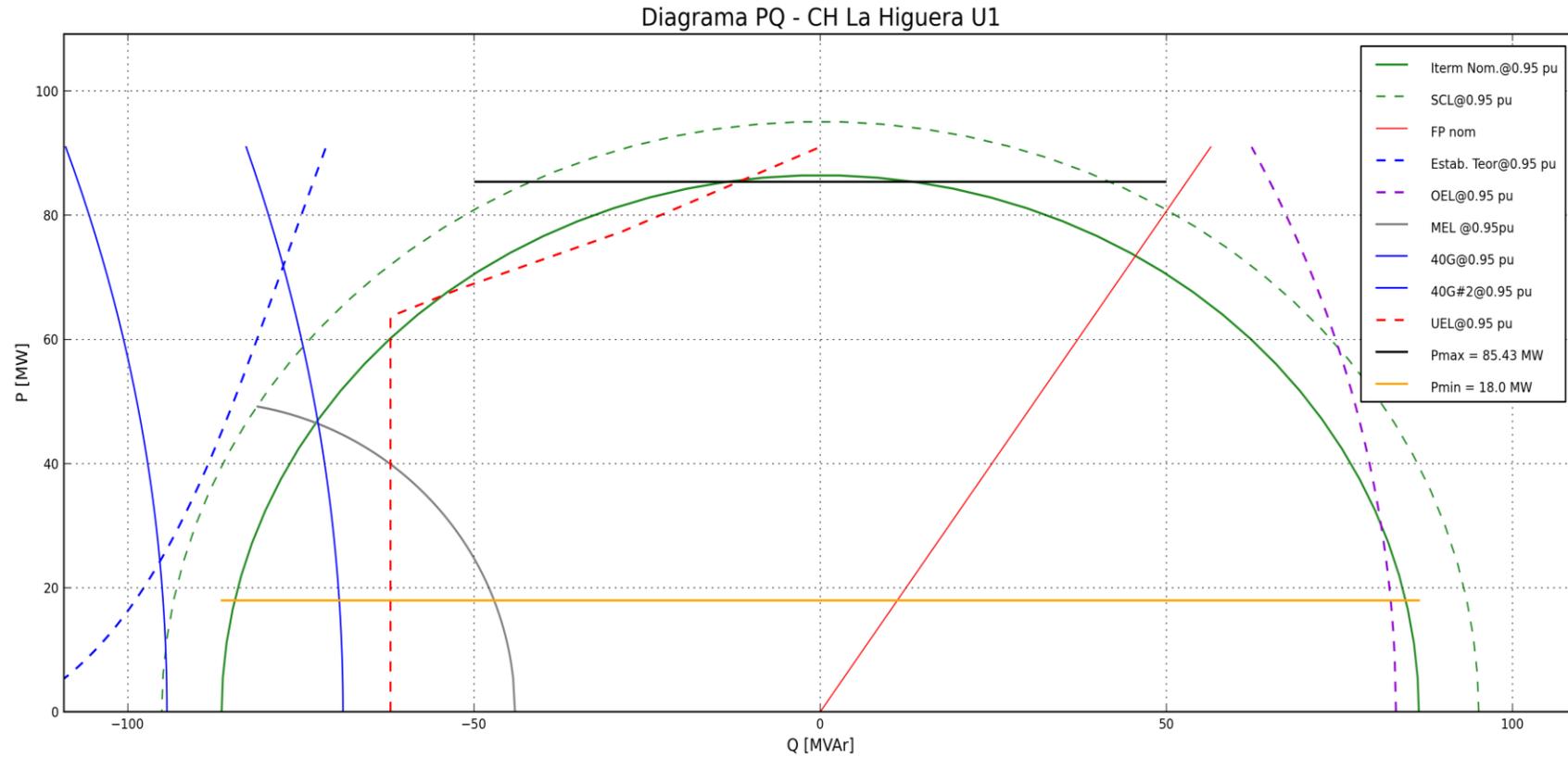


Figura 5.2: Diagrama PQ ensayado – ETERM = 0.95 p.u.



5.2.2 Tensión en Terminales 1.00 p.u.

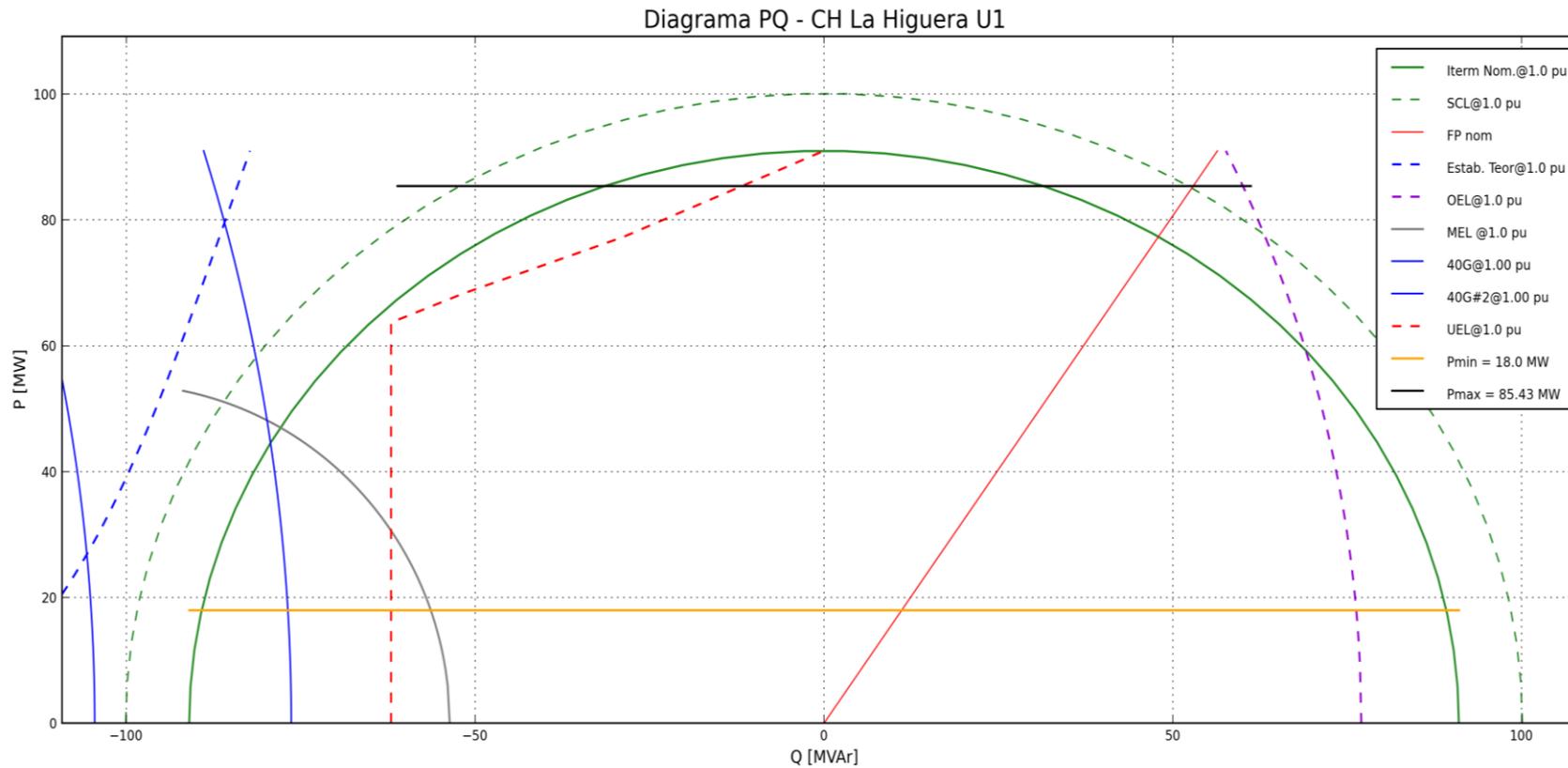


Figura 5.3: Diagrama PQ ensayado – ETERM = 1.00 p.u.



5.2.3 Tensión en Terminales 1.05 p.u.

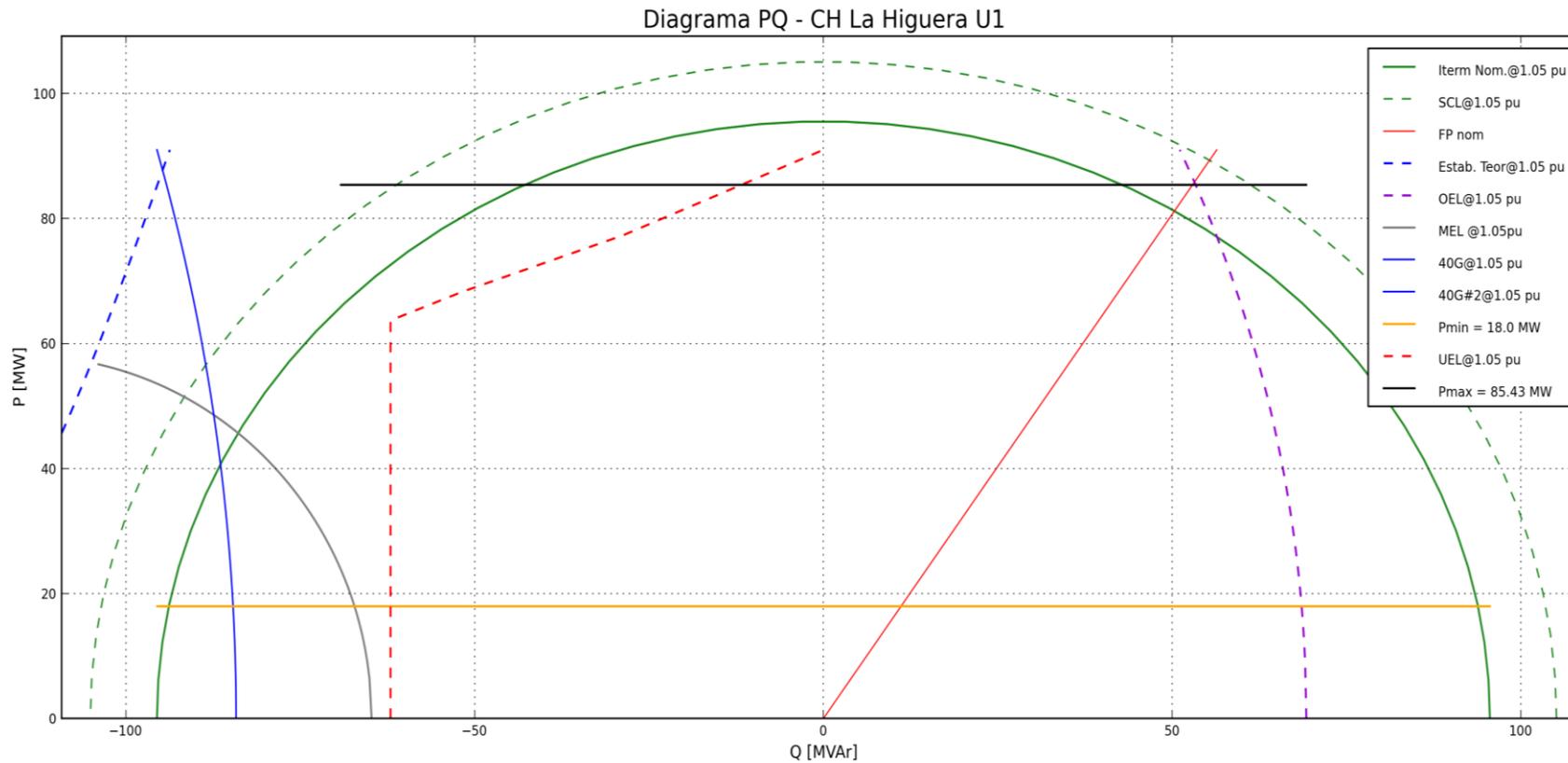


Figura 5.4: Diagrama PQ ensayado – ETERM = 1.05 p.u.



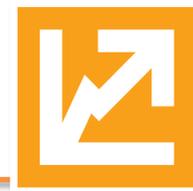
5.2.4 Resumen de valores a informar

A continuación, se muestran las tablas de resumen de los valores PQ ensayados para todos los niveles de tensión en el formato requerido por el CEN (*“Guía de Verificación Control de Tensión”* – Anexo B – Junio 2020) para presentar en la planilla adjunta *“EE-EN-2022-0354-RA-Curvas_PQ_Final_CH_La Higuera_U1.xlsx”*

| Potencia [MW] | Tensión [pu] | 18.00 | 40.5 | 63.0 | 85.4 | 85.4 | 63.0 | 40.5 | 18.00 |
|---------------------------|--------------|---------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Unidad 1 [MVar] (0.90Vpu) | 0.9 | No operable ¹⁰ | | | | | | | |
| Unidad 1 [MVar] (0.95Vpu) | 0.95 | 82.4 | 76.3 | 59.2 | 13.1 | -11.7 | -59.2 | -62.1 | -47.1 |
| Unidad 1 [MVar] (1Vpu) | 1 | 76.3 | 73.3 | 65.7 | 31.3 | -11.7 | -62.1 | -62.1 | -56.4 |
| Unidad 1 [MVar] (1.05Vpu) | 1.05 | 68.6 | 65.8 | 60.8 | 42.7 | -11.7 | -62.1 | -62.1 | -62.1 |
| Unidad 1 [MVar] (1.1Vpu) | 1.1 | No operable ¹⁰ | | | | | | | |

Tabla 5.6: Resumen de valores curvas PQ

¹⁰ Para mayor detalle referirse al informe técnico *“EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La Higuera_U1”*.



5.2.5 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.95 p.u.

| Puntos | Fecha | Periodo de Evaluación | | Puntos Teóricos | | P de ensayo | | Q obtenida | | VT | Vfd[V] | Iex[A] | Desviación | Origen de la Limitación | Observaciones |
|--------|------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------|-------------|----------|------------|-------|--------|-----------|--|---------------------|-------------------------|---------------|
| | | HH:MM (inicio) | HH:MM (fin) | P[MW] | Q [MVar] | P[MW] | Q [MVar] | | | | | | | | |
| 1 | 09/02/2022 | 9:55 | 9:57 | 18.0 | 82.4 | 20.84 | -33.17 | 0.99 | 40.13 | 481.90 | No aplica | No se alcanza el punto objetivo ya que al subir tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo. | Punto no alcanzable | | |
| 2 | 09/02/2022 | 9:42 | 9:47 | 40.5 | 76.3 | 45.52 | -32.54 | 0.99 | 47.07 | 569.75 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 3 | 08/02/2022 | 17:25 | 17:26 | 63.0 | 59.2 | 60.59 | -29.28 | 0.99 | 54.24 | 659.23 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 4 | 09/02/2022 | - | - | 85.4 | 13.1 | - | - | - | - | - | No aplica | - | Punto no alcanzable | | |
| 5 | 09/02/2022 | - | - | 85.4 | -11.7 | - | - | - | - | - | No aplica | - | Punto no alcanzable | | |
| 6 | 08/02/2022 | 16:48 | 16:53 | 63.0 | -59.2 | 60.92 | -62.18 | 0.96 | 37.28 | 441.62 | 5.03 | Actúa límite UEL | - | | |
| 7 | 08/02/2022 | 15:33 | 18:38 | 40.5 | -62.1 | 39.64 | -62.38 | 0.96 | 26.10 | 304.57 | 0.45 | Actúa límite UEL | - | | |
| 8 | 09/02/2022 | 11:09 | 11:14 | 18.0 | -47.1 | 18.68 | -52.54 | 0.97 | 24.54 | 284.95 | 11.55 | Actúa límite MEL | - | | |

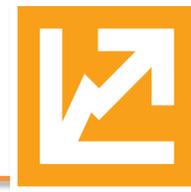
Tabla 5.7: Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 0.95 p.u.



5.2.6 Ensayos de curva PQ para tensión de terminales 1.00 p.u.

| Puntos | Fecha | Periodo de Evaluación | | Puntos Teóricos | | P de ensayo | | Q obtenida | | VT | Vfd[V] | Iex[A] | Desviación | Origen de la Limitación | Observaciones |
|--------|------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------|-------------|----------|------------|-------|---------|-----------|---|---------------------|-------------------------|---------------|
| | | HH:MM (inicio) | HH:MM (fin) | P[MW] | Q [MVAR] | P[MW] | Q [MVAR] | | | | | | | | |
| 1 | 09/02/2022 | 10:18 | 10:20 | 18.0 | 76.3 | 21.25 | 7.35 | 1.04 | 70.17 | 880.11 | No aplica | No se alcanza el punto objetivo ya que al subir tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo | Punto no alcanzable | | |
| 2 | 09/02/2022 | 9:27 | 9:32 | 40.5 | 73.3 | 44.20 | 7.54 | 1.04 | 74.53 | 925.79 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 3 | 08/02/2022 | 17:39 | 17:44 | 63.0 | 65.7 | 60.53 | -22.71 | 1.00 | 58.35 | 711.22 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 4 | 08/08/2022 | 15:07 | 15:07 | 85.4 | 31.3 | 86.24 | 6.58 | 1.05 | 90.29 | 1071.89 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 5 | 08/02/2022 | 14:50 | 15:05 | 85.4 | -11.7 | 86.53 | -8.21 | 1.02 | 79.83 | 943.91 | 29.83 | Actúa límite UEL | - | | |
| 6 | 08/02/2022 | 16:21 | 16:26 | 63.0 | -62.1 | 63.42 | -62.31 | 0.97 | 39.39 | 463.20 | 0.34 | Actúa límite UEL | - | | |
| 7 | 08/02/2022 | 18:16 | 18:21 | 40.5 | -62.1 | 38.35 | -62.55 | 0.97 | 27.09 | 310.91 | 0.72 | Actúa límite UEL | - | | |
| 8 | 09/02/2022 | 10:54 | 10:59 | 18.0 | -56.4 | 18.99 | -56.14 | 0.99 | 24.68 | 286.77 | 0.46 | Actúa límite MEL | - | | |

Tabla 5.8: Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 1.00 p.u.



5.2.7 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.05 p.u.

| Puntos | Fecha | Periodo de Evaluación | | Puntos Teóricos | | P de ensayo | | Q obtenida | | VT | Vfd[V] | Iex[A] | Desviación | Origen de la Limitación | Observaciones |
|--------|------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------|-------------|----------|------------|--------|---------|-----------|--|---------------------|-------------------------|---------------|
| | | HH:MM (inicio) | HH:MM (fin) | P[MW] | Q [MVar] | P[MW] | Q [MVar] | | | | | | | | |
| 1 | 07/02/2022 | 16:00 | 16:06 | 18.0 | 68.6 | 16.96 | 33.63 | 1.07 | 94.31 | 1137.63 | No aplica | Próximos a la actuación de protección de sobreflujo (V/Hz) en 1.08 p.u./p.u. | Punto no alcanzable | | |
| 2 | 07/02/2022 | 16:32 | 16:38 | 40.5 | 65.8 | 38.21 | 31.84 | 1.08 | 96.26 | 1151.68 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 3 | 07/02/2022 | 17:10 | 17:15 | 63.0 | 60.8 | 62.96 | 32.18 | 1.08 | 104.07 | 1218.07 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 4 | 07/02/2022 | 17:28 | 17:45 | 85.4 | 42.7 | 85.37 | 22.39 | 1.08 | 103.82 | 1216.80 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 5 | 08/02/2022 | 14:24 | 14:39 | 85.4 | -11.7 | 86.43 | -8.44 | 1.03 | 80.81 | 950.31 | 27.82 | Actúa límite UEL | - | | |
| 6 | 08/02/2022 | 16:01 | 16:03 | 63.0 | -62.1 | 63.06 | -28.45 | 1.01 | 58.16 | 685.81 | No aplica | No se alcanza el punto objetivo ya que al bajar tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo. | Punto no alcanzable | | |
| 7 | 08/02/2022 | 18:05 | 18:10 | 40.5 | -62.1 | 39.11 | -33.82 | 1.01 | 46.23 | 545.85 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |
| 8 | 09/02/2022 | 10:42 | 10:44 | 18.0 | -62.1 | 13.56 | -39.07 | 1.01 | 36.49 | 433.07 | No aplica | | Punto no alcanzable | | |

Tabla 5.9: Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 1.05 p.u.

6 ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE CONTROL TERCARIO DE FRECUENCIA

6.1 Reserva en giro

Con el fin de verificar la capacidad de la planta para participar en el servicio complementario de CTFg, se ejecutan los siguientes ensayos.

Para estas pruebas se presentan las siguientes señales:

- Potencia activa en bornes de la unidad (señal PELEC).
- Tensión y potencia reactiva en terminales de la unidad (señales ETERM y QELEC, respectivamente).
- Frecuencia eléctrica (señal FREC).

La unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera posee ajustada una tasa de 27.3 MW/min, tanto para bajada como subida. Además, puede variar su tasa de toma y bajada de carga en un amplio rango, el cual va desde 0.55 MW/min a 1747 MW/min (ver Figura 8.50 y Figura 8.51). En línea con lo anterior, se decide probar como mínima y máxima tasa de toma y bajada de carga 5.46 MW/min (correspondiente al 6%Pnom/min) y 54.6 MW/min (correspondiente al 60%Pnom/min) respectivamente. Dichos valores fueron recomendados por el representante del fabricante del regulador de velocidad presente en terreno.

En la Tabla 6.1 se resumen los ensayos de incremento y bajada de carga. Estos valores son aproximados y pueden diferir con el despacho real alcanzado en los ensayos.

| <i>Despacho Inicial de Potencia Activa [MW]</i> | <i>Despacho Final de Potencia Activa [MW]</i> | <i>Tasa de toma de carga [MW/min]</i> |
|---|---|---------------------------------------|
| 18 | 85 | 27.3 |
| 18 | 85 | 54.6 |
| 18 | 85 | 5.46 |
| 85 | 18 | 27.3 |
| 85 | 18 | 54.6 |
| 85 | 18 | 5.46 |

Tabla 6.1: Ensayos de CTFg

6.1.1 Incrementos de carga de la unidad

Se realiza la prueba con la tasa de toma de carga configurada actualmente en la unidad, es decir 27.3 MW/min. Adicionalmente, se realiza un segundo incremento de carga con una tasa superior de 54.6 MW/min, y un tercer incremento con una tasa inferior de 5.46 MW/min.

Para verificar el gradiente de toma de carga (MW/min) de la unidad, se comienza el ensayo operando a mínimo técnico, y se incrementa la generación en la unidad hasta alcanzar potencia máxima disponible, mediante un único cambio de referencia de potencia activa.

Toma de carga desde mínimo técnico a potencia máxima a 27.3 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 18 MW a un valor final de 85 MW.

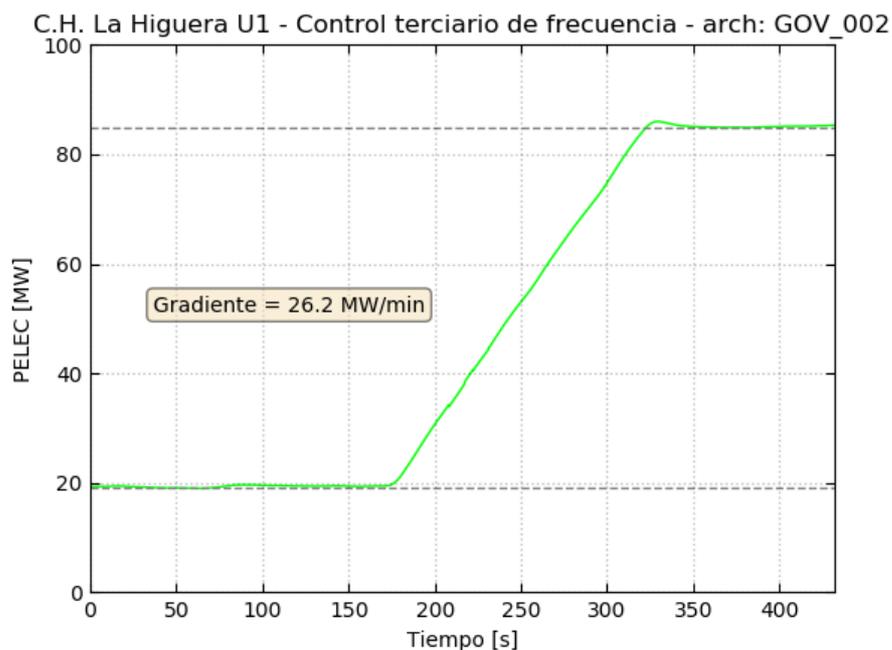


Figura 6.1: Toma de carga - Tasa = 27.3 MW/min

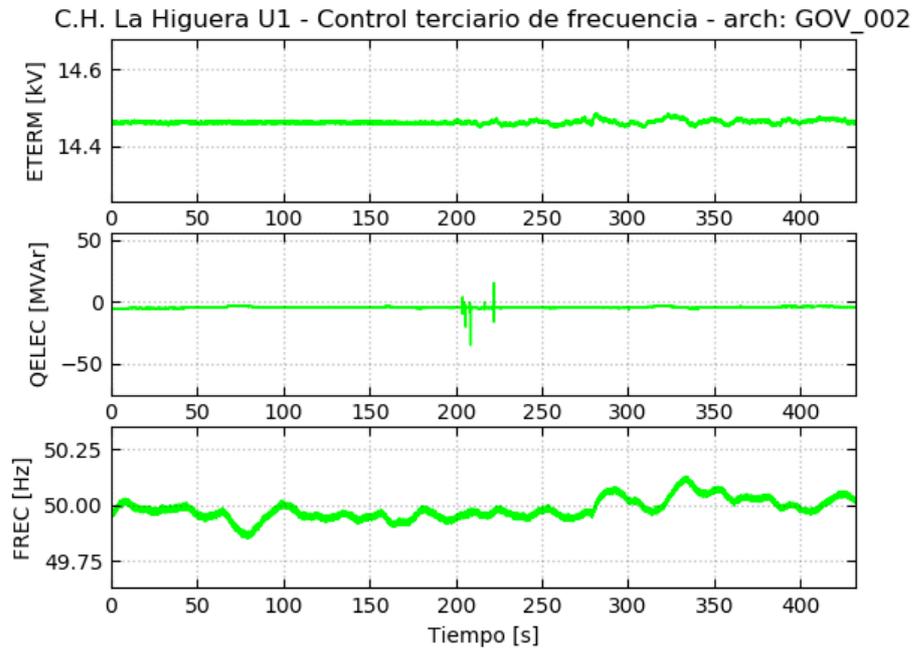


Figura 6.2: Toma de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable. Y la tasa de toma de carga medida resulta igual a 26.2 MW/min, lo que equivale a una tasa del 28 %/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

Toma de carga desde mínimo técnico a potencia máxima a 54.6 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 18 MW a un valor final de 85 MW.

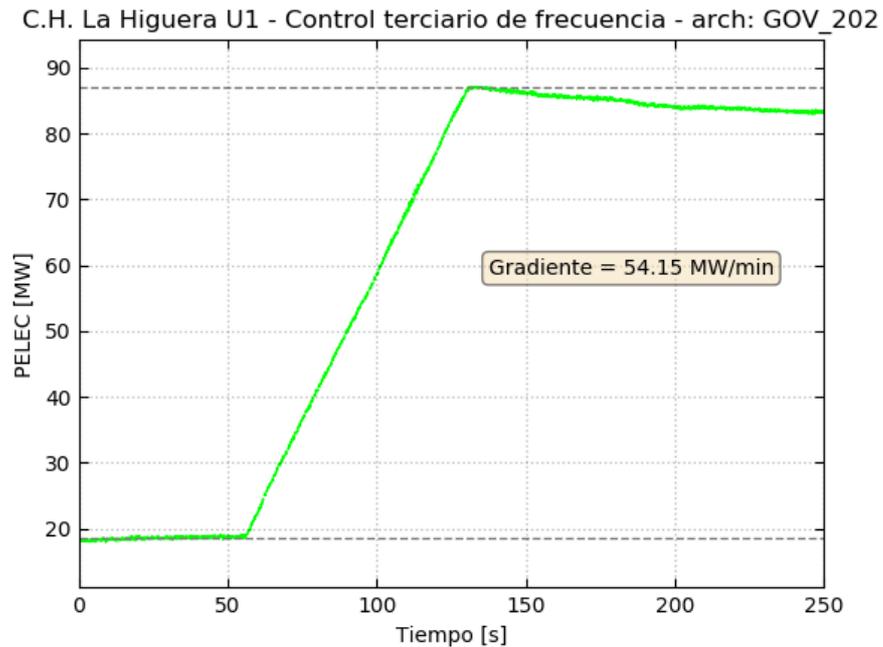


Figura 6.3: Toma de carga - Tasa = 54.6 MW/min

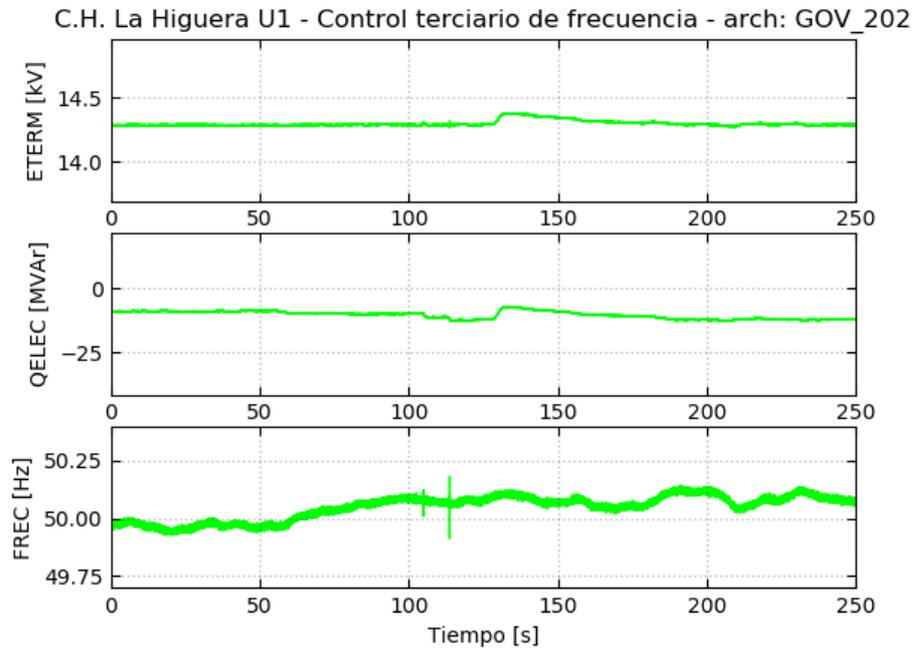


Figura 6.4: Toma de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable, y la tasa de toma de carga medida resulta igual a 54.12 MW/min, lo que equivale a una tasa del 59.5 %/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

Toma de carga desde mínimo técnico a potencia máxima a 5.46 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 18 MW a un valor final de 85 MW.

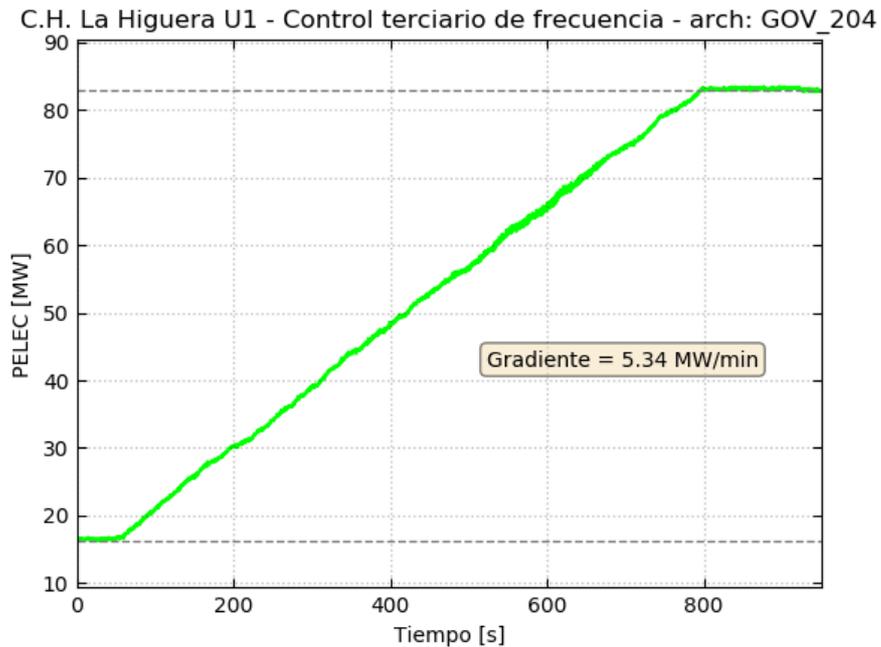


Figura 6.5: Toma de carga - Tasa = 5.46 MW/min

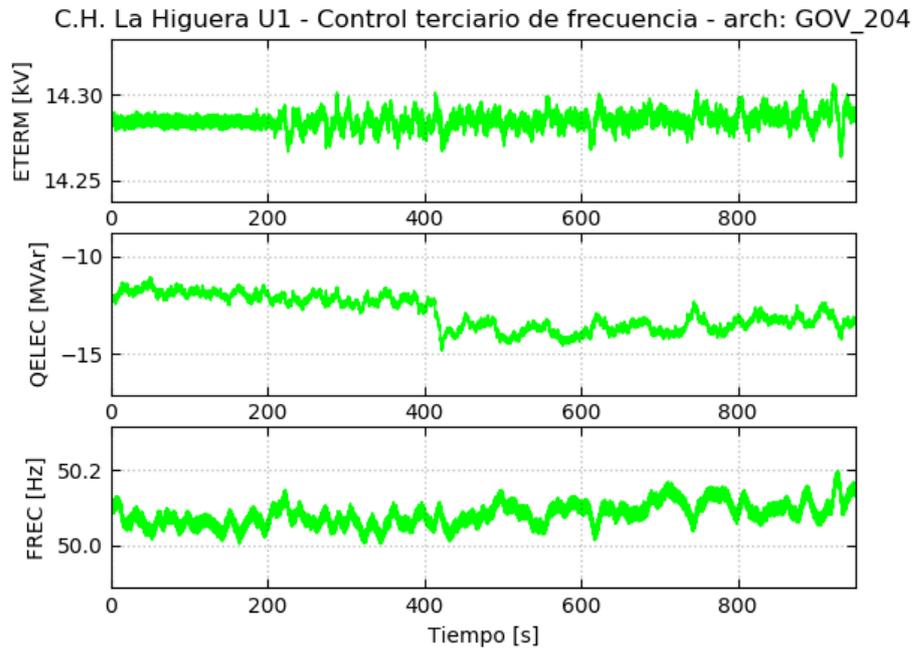


Figura 6.6: Toma de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable, y la tasa de toma de carga medida resulta igual a 5.34 MW/min, lo que equivale a una tasa del 5.8 %/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

6.1.2 Bajada de carga de la unidad

Se realiza la prueba con la tasa de bajada de carga configurada actualmente en la unidad, es decir -27.3 MW/min. Adicionalmente, se realiza una segunda bajada de carga con una tasa superior de -54.6 MW/min, y una tercera bajada con una tasa inferior de -5.46 MW/min.

Para verificar el gradiente de bajada de carga (MW/min) de la unidad, se comienza el ensayo operando a potencia máxima disponible, y se comienza a bajar carga en la unidad hasta alcanzar el mínimo técnico. La disminución de generación en la unidad se realiza mediante un **único** cambio de referencia de potencia activa por parte del personal de operaciones de la central.

Bajada de carga desde potencia máxima a mínimo técnico a -27.3 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 85 MW a un valor final de 18 MW.

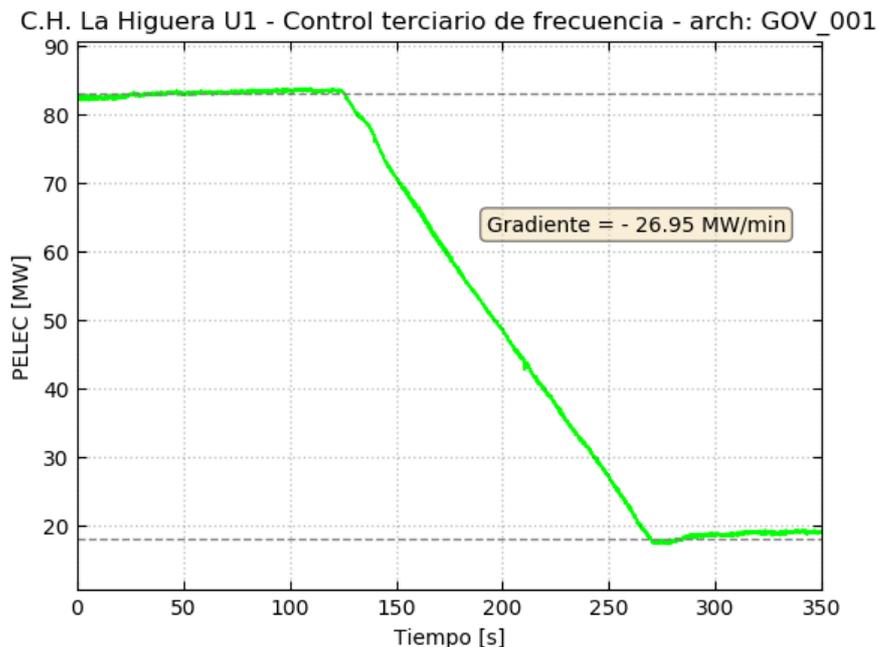


Figura 6.7: Bajada de carga – Tasa = - 27.3 MW/min

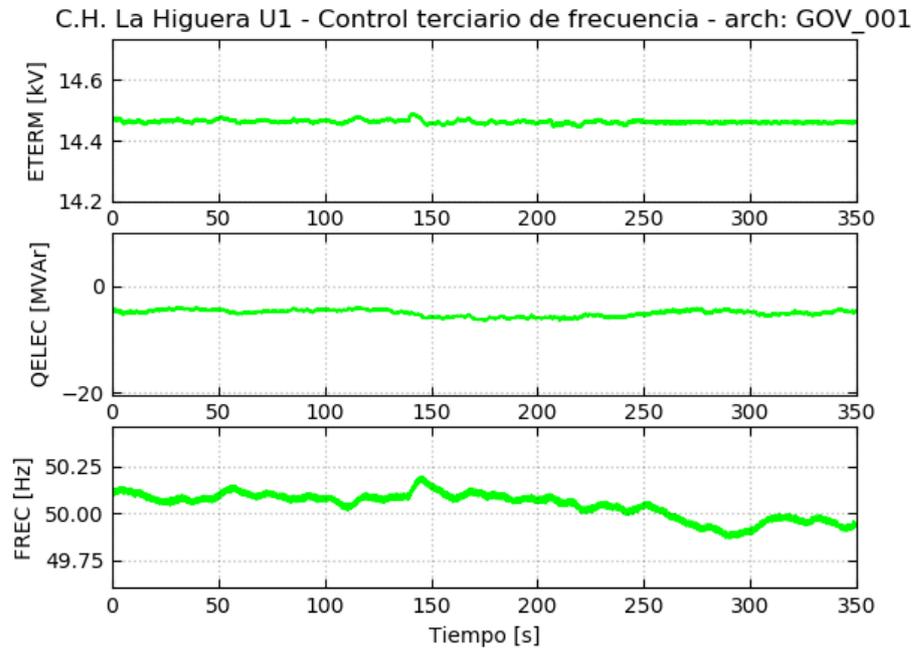


Figura 6.8: Bajada de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable, y la tasa de bajada de carga medida resulta igual a -26.95 MW/min , lo que equivale a una tasa del -29.6 \%/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

Bajada de carga desde potencia máxima a mínimo técnico a -54.6 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 85 MW a un valor final de 18 MW.

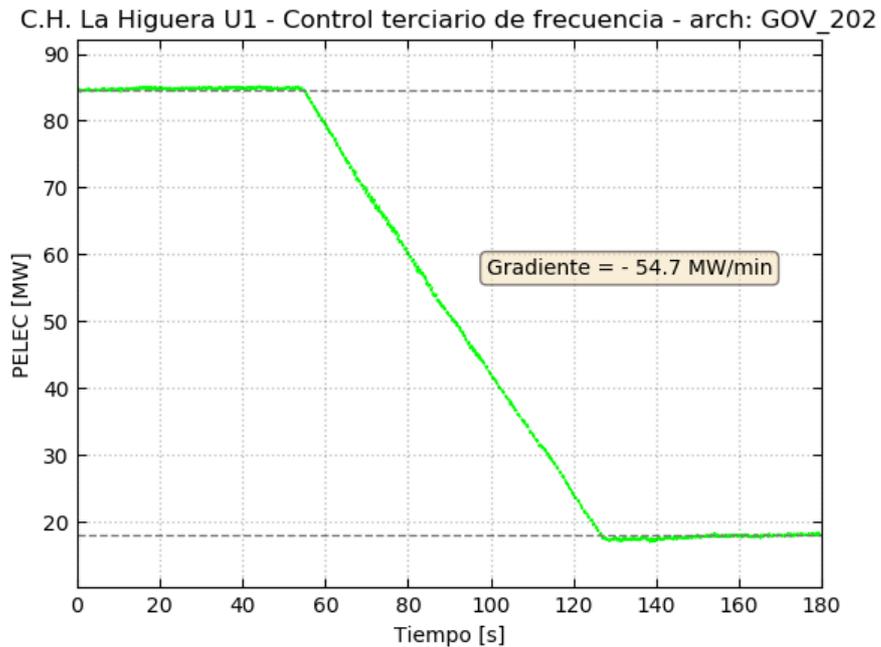


Figura 6.9: Bajada de carga - Tasa = -54.6 MW/min

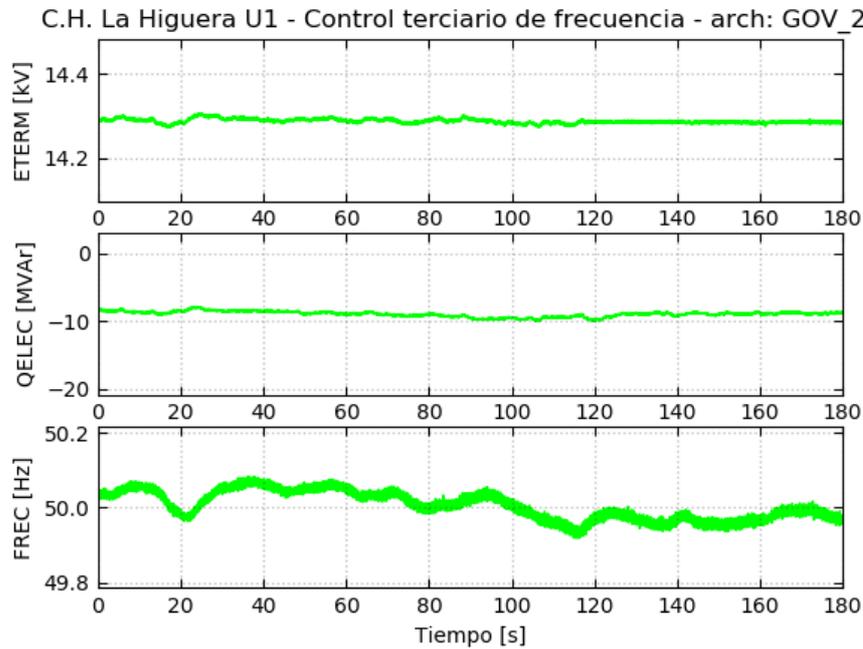


Figura 6.10: Bajada de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable, y la tasa de bajada de carga medida resulta igual a -54.7 MW/min , lo que equivale a una tasa del -60.1 \%/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

Bajada de carga desde potencia máxima a mínimo técnico a -5.46 MW/min

Se modifica la consigna de potencia activa de la unidad desde un valor inicial de 85 MW a un valor final de 18 MW.

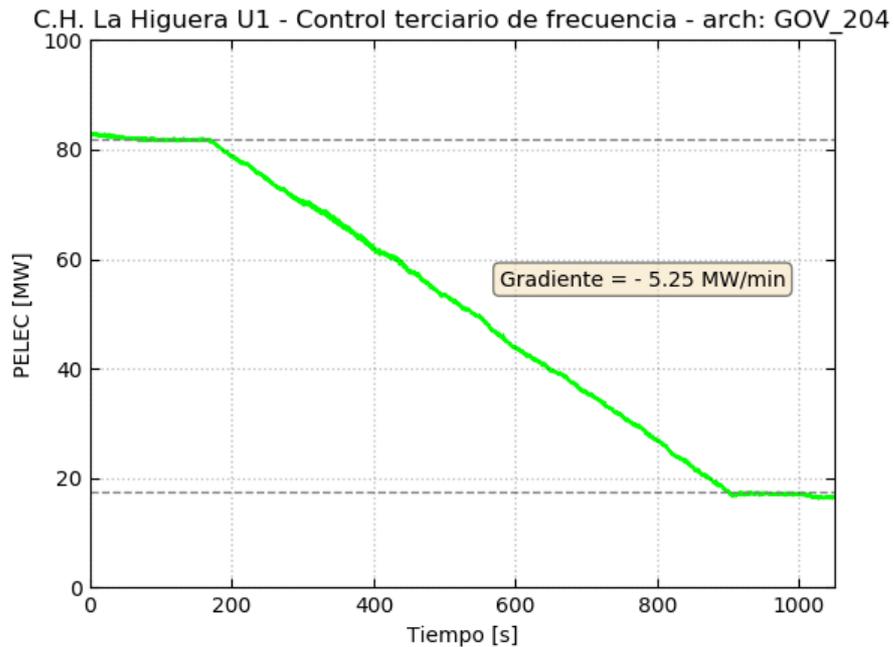


Figura 6.11: Bajada de carga - Tasa = - 5.46 MW/min

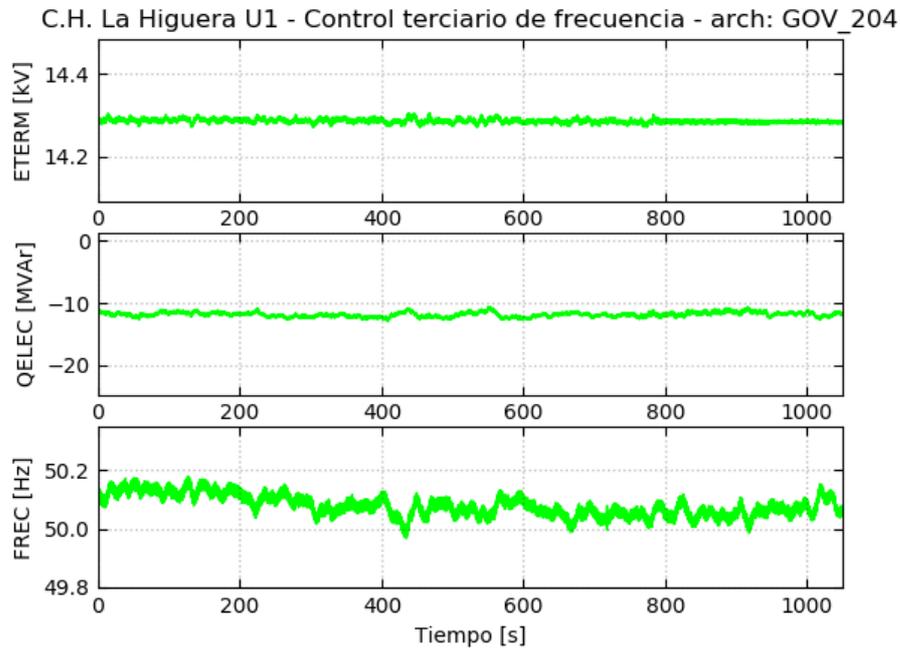


Figura 6.12: Bajada de carga – Señales en terminales del generador

Como puede observarse en las figuras anteriores, la unidad presenta una respuesta estable, y la tasa de bajada de carga medida resulta igual a -5.25 MW/min , lo que equivale a una tasa del -5.76 \%/min de la potencia nominal de la unidad (91 MVA).

6.1.3 Análisis del control terciario de frecuencia reserva en giro

En la Tabla 6.2 se resumen los gradientes medidos para los diferentes movimientos de carga, mientras que en la Tabla 6.3 se presenta la reserva para CTFg, para la unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera, en función de las pruebas realizadas.

| Unidad | Valor Teórico [MW/min] | Valor Medido Subida [MW/min] | Valor Medido Bajada [MW/min] |
|--------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| HLH U1 | 27.3 | 26.2 | -26.95 |
| | 54.6 | 54.15 | 54.7 |
| | 5.46 | 5.34 | -5.25 |

Tabla 6.2 – Resumen gradientes entre movimientos de carga entre mínimo técnico y potencia máxima

La reserva en giro para CTF corresponde al valor mínimo entre la potencia que es posible variar la unidad en 10 minutos de acuerdo a la tasa consignada y el margen entre la potencia de despacho y la potencia límite (máxima o mínima) que la unidad es capaz de entregar. Esto se expresa en la Tabla 6.3 donde:

- *Reserva Giro CTF⁺*: Reserva en giro para CTF por subfrecuencia.
- *Reserva Giro CTF⁻*: Reserva en giro para CTF por sobrefrecuencia.
- *Pd*: Potencia bruta de despacho.

| Unidad | Tasa [MW/min] | Reserva para CTFg [MW] |
|--------|---------------|---|
| HLH U1 | 27.3 | $Reserva\ Giro\ CTF^+ = \min\{27.3 \cdot 10, 85.43 - Pd\}$ $Reserva\ Giro\ CTF^- = \min\{27.3 \cdot 10, Pd - 18\}$ |
| | 54.6 | $Reserva\ Giro\ CTF^+ = \min\{54.6 \cdot 10, 85.43 - Pd\}$ $Reserva\ Giro\ CTF^- = \min\{54.6 \cdot 10, Pd - 18\}$ |
| | 5.46 | $Reserva\ Giro\ CTF^+ = \min\{5.46 \cdot 10, 85.43 - Pd\}$ $Reserva\ Giro\ CTF^- = \min\{5.46 \cdot 10, Pd - 18\}$ |

Tabla 6.3 – Resumen reserva para CTFg

Cabe mencionar que el tiempo de activación del CTFg es despreciable ya que depende exclusivamente del tiempo que demora el operador en consignar el nuevo valor de referencia de potencia, por lo que se considera un tiempo de activación de cero (0) segundos.

6.2 Reserva en frío

Con el fin de verificar la capacidad de la planta para participar en el servicio complementario de CTff, se ejecutan los siguientes ensayos.

Para estas pruebas se presentan las siguientes señales:

- Potencia activa en bornes de la unidad (señal PELEC).
- Tensión y potencia reactiva en terminales de la unidad (señales ETERM y QELEC, respectivamente).

El ensayo realizado evalúa la capacidad de la unidad de sincronizar desde el estado “**apagado**” y alcanzar su estado de mínimo técnico en un tiempo máximo de quince (15) minutos y mantenerse en dicha condición durante otros sesenta (60) minutos. Se comienza con la unidad en modo apagado y se da la orden de partida, se registra el tiempo que tarda la unidad en sincronizar con el SEN y seguidamente se continua la subida de carga hasta mínimo técnico. En la Figura 6.13 se presenta la maniobra ya descrita.

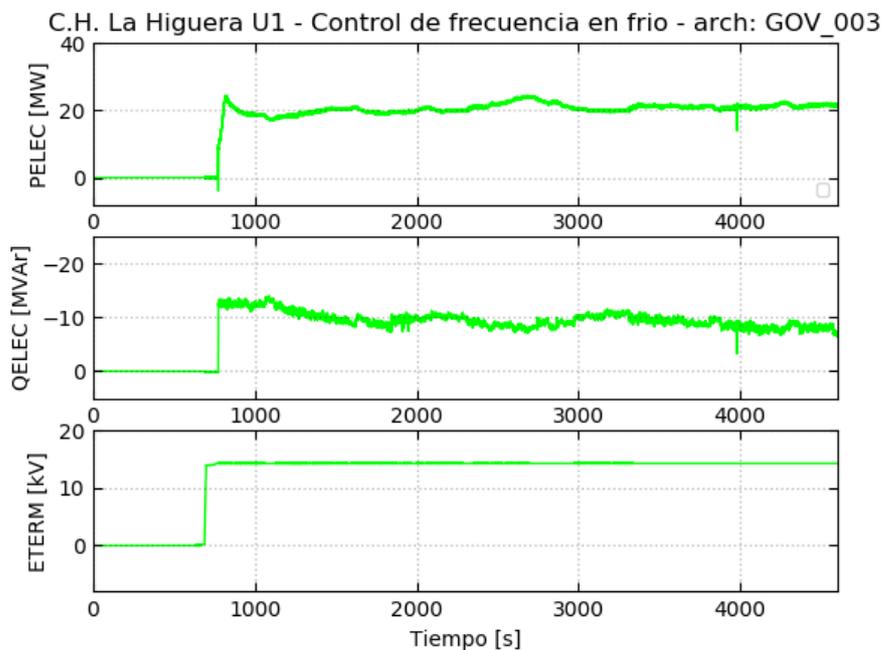


Figura 6.13: Señales de potencia activa, reactiva y tensión en bornes de la unidad

El detalle de las maniobras anteriores (proceso de arranque) se muestran en la Figura 6.14 y la Figura 6.15. En las mismas se puede ver la evolución de la potencia activa de la unidad durante las pruebas. Se detalla con líneas rojas segmentadas los hitos temporales que marcan el proceso de partida de la unidad, los cuales son descritos en la Tabla 6.4.

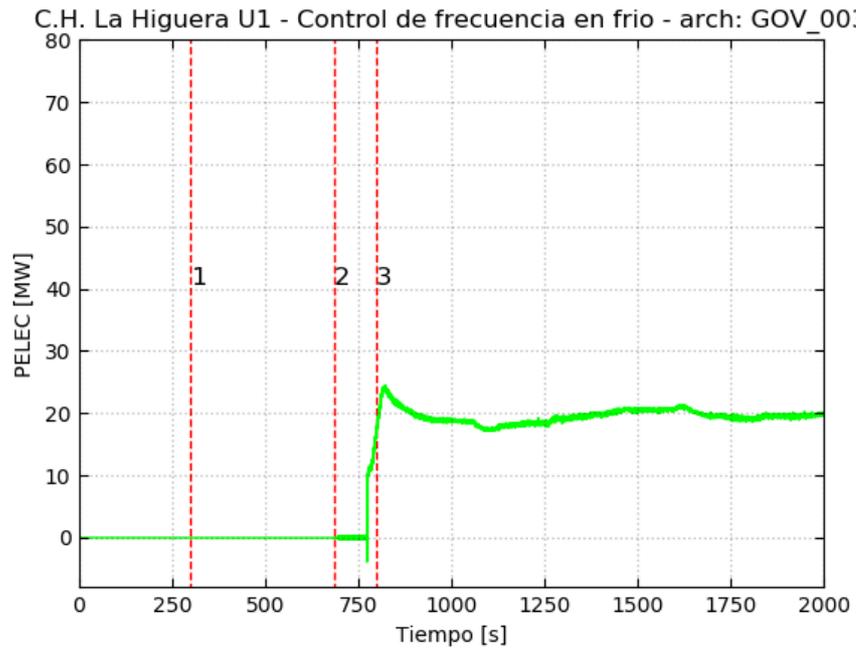


Figura 6.14. Registro de potencia activa (Encendido)

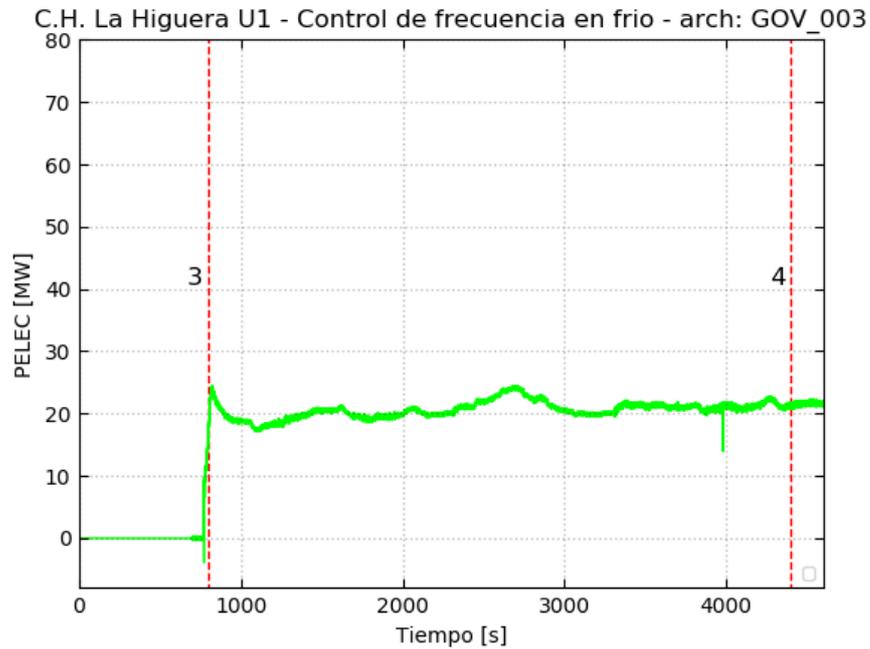


Figura 6.15: Registro de potencia activa (Pmin)

| Maniobra/Evento | Descripción |
|------------------------|---|
| 1 | Se da la orden de arranque |
| 2 | Unidad se sincroniza al SEN y comienza a tomar carga hasta mínimo técnico |
| 3 | Se alcanza el despacho de mínimo técnico 18 MW y se mantiene durante 60 minutos |
| 4 | Se cumplen los 60 minutos en mínimo técnico |

Tabla 6.4 - Secuencia de maniobras y eventos

6.2.1 Análisis de control terciario de frecuencia reserva en frío

En la Tabla 6.5 se resumen los tiempos medidos para la secuencia de eventos de CTFf para la unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera, mientras que en la Tabla 6.6 se compara dichos tiempos con los estipulados en la normativa para el control terciario de frecuencia reserva en frío.

| Maniobra/Evento | Descripción | Tiempo del evento [min] |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | Se da la orden de arranque | 5 |
| 2 | Sincronización | 11.4 |
| 3 | Se alcanza Pmin | 13.3 |
| 4 | Se cumple 60 min en Pmin | 73.3 |

Tabla 6.5 – Resumen de tiempos en CTF en frío

| Unidad | Parámetro | Tiempo Medido [min] | Requerimiento Normativo [min] |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| HLH U1 | Sincronización (t_2-t_1) | 6.4 | < 5 |
| | Se alcanza Pmin (t_3-t_1) | 8.3 | < 15 |
| | 60 min en Pmin (t_4-t_1) | 68.3 | > 60 |

Tabla 6.6 – Evaluación de los tiempos medidos para CTF en frío

Cabe mencionar que la unidad 1 de la Central Hidroeléctrica La Higuera no cumple con el tiempo mínimo de sincronización. Por otro lado, el tiempo que tarda la unidad para alcanzar el mínimo técnico cumple con el tiempo mínimo estipulado en la NT SSCC. Además, la unidad no presenta problemas para mantener dicho despacho durante 60 minutos.

7 ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN

La **Unidad 1** de la **Central Hidroeléctrica La Higuera** ha sido sometida al proceso de verificación para la prestación de Servicios Complementarios. El mismo ha sido llevado a cabo bajo los lineamientos establecidos en la Norma Técnica de Servicios Complementarios y el Anexo Técnico, “*Verificación de Instalaciones para la Prestación de SSCC*” vigente.

En lo que respecta al **SSCC de Control de Tensión** y en función de los ensayos realizados puede concluirse que:

- La respuesta dinámica del regulador de tensión de la unidad es rápida y estable, cumpliendo con los parámetros de performance exigidos por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.
- Se logra comprobar un correcto ajuste en el lazo de control del regulador de tensión. A través de cambios en la tensión de referencia se comprueba que actúan adecuadamente los diferentes limitadores.
- Se realizó un informe de determinación de curvas PQ máxima teórica para cada uno de los niveles de tensión, el cual es entregado en el documento “**EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1**”.
- Se logra comprobar que la central puede operar en forma segura y estable en los extremos de las zonas de operación definidas por las curvas PQ teóricas presentadas en el capítulo 5, salvo para los valores de tensión de 0.90 p.u. y 1.10 p.u., los cuales no se lograron verificar debido a encontrarse fuera del rango de operación de los SS/AA. Además, de encontrarse el limitador de sobreflujo en 1.09 p.u. de tensión. Sin embargo, para los puntos verificados, no se observan restricciones y se comprueba que la unidad puede operar estables en tales niveles de potencia reactiva.
- No se evidencia restricción por parte de la unidad para operar dentro de las curvas PQ teóricas, exceptuando las curvas de operación para los niveles de tensión 0.9 p.u. y 1.1 p.u., ya que la operación de las unidades se ve restringida por el nivel de

tensión en los SS/AA¹¹ entre 0.95 p.u. y 1.05 p.u. Además, la unidad cuenta con un limitador V/Hz que no permite aumentar la tensión sobre 1.09 p.u.

En lo que respecta al **SSCC de Control Terciario de Frecuencia** y en función de los ensayos realizados puede concluirse que:

- En cuanto al CTFg, los movimientos de carga se realizan siguiendo en buena medida el gradiente configurado.
- El tiempo de activación del CTFg es despreciable ya que depende exclusivamente del tiempo que demora el operador en consignar el nuevo valor de referencia de potencia activa sobre la interfaz del GOV de la unidad.
- Adicionalmente, se deduce, que la central podrá entregar hasta la totalidad de su rango operativo como reserva para **Control Terciario de Frecuencia reserva en giro**.
- En cuanto al CTFf, el proceso de arranque se realiza desde la consola del operador y es la forma de operación normal de la unidad. Se logra una partida estable de la unidad.
- Si bien el tiempo de sincronización no cumple con el tiempo mínimo establecido en la normativa, el tiempo que tarda la unidad en alcanzar el mínimo técnico si cumple con la normativa de manera holgada.
- No se presentan inconvenientes al mantener la operación en el mínimo técnico en un tiempo prolongado.
- Adicionalmente, se deduce, que la central podrá entregar hasta la totalidad de su rango operativo como reserva para **Control Terciario de Frecuencia reserva en frío** considerando que el tiempo extra de sincronización es compensado con el rápido aumento de carga a mínimo técnico.

¹¹ Para mayor detalle referirse al informe técnico “**EE-EN-2021-2304-RB_Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CH_La_Higuera_U1**”.

8 ANEXOS

8.1 Verificación de curvas de capacidad en diferentes niveles de tensión

A continuación, se presentan los registros temporales para cada punto operativo alcanzado (P, Q, V), donde se presentan las siguientes señales:

- Tensión de terminales (señal ETERM)
- Potencia reactiva de terminales (señal QELEC)
- Potencia activa de terminales (señal PELEC)
- Tensión de campo del generador (señal EFD)
- Corriente de campo del generador (señal IFD)

8.1.1 Verificación curva PQ @ 0.95 p.u.

A continuación, se presentan las mediciones realizadas para los distintos puntos de despacho de potencia activa recorriendo la curva de capacidad de la unidad correspondiente a 0.95 p.u. desde el lado sobrecitado hacia la parte subexcitada.

1. Punto P1_CT-Q1

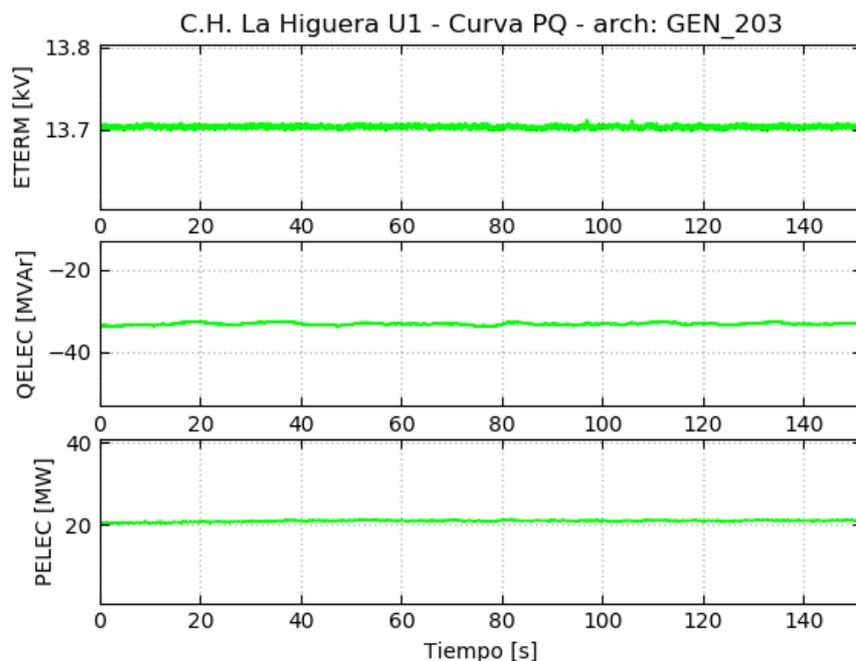


Figura 8.1: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

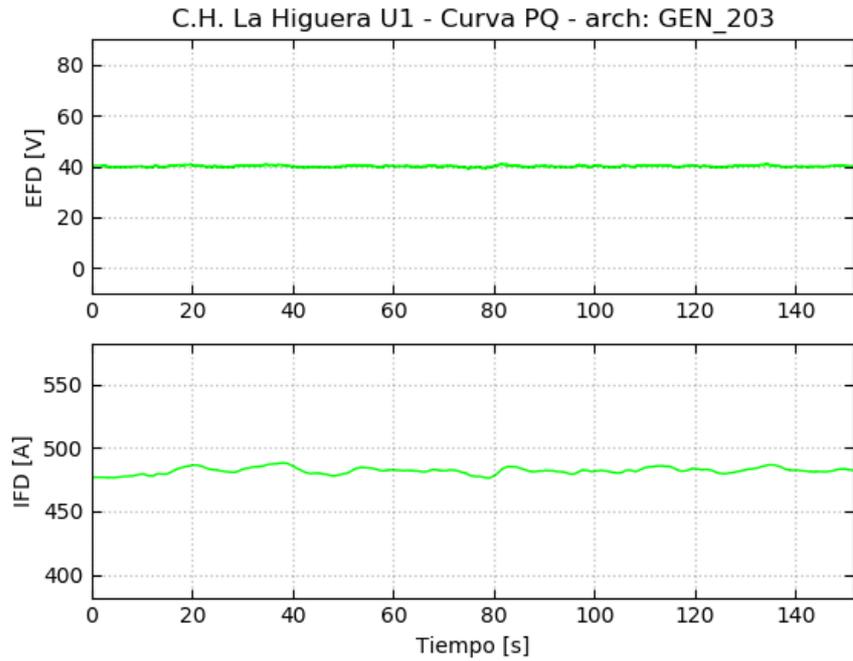


Figura 8.2: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

2. Punto P2_CT-Q2

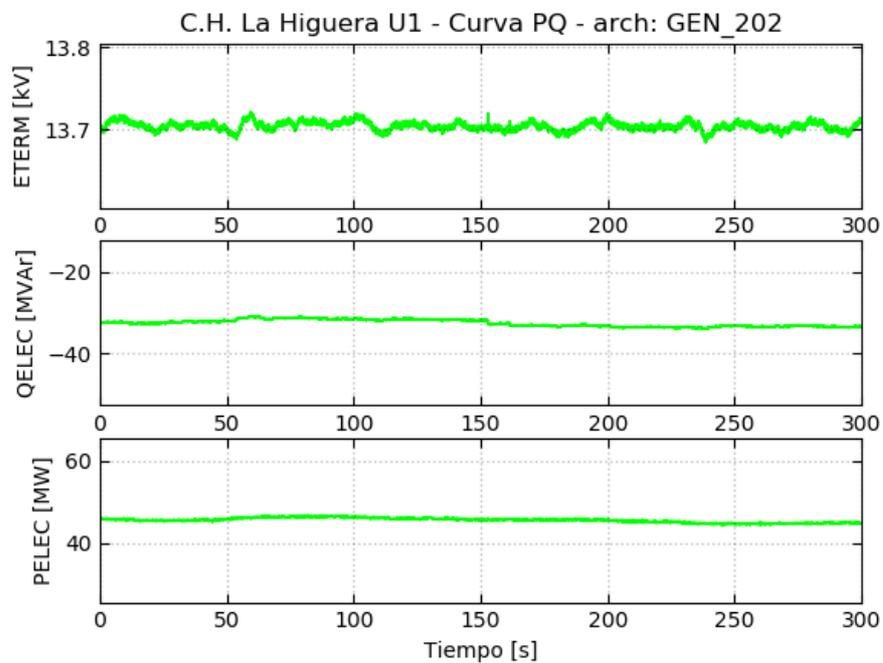


Figura 8.3: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

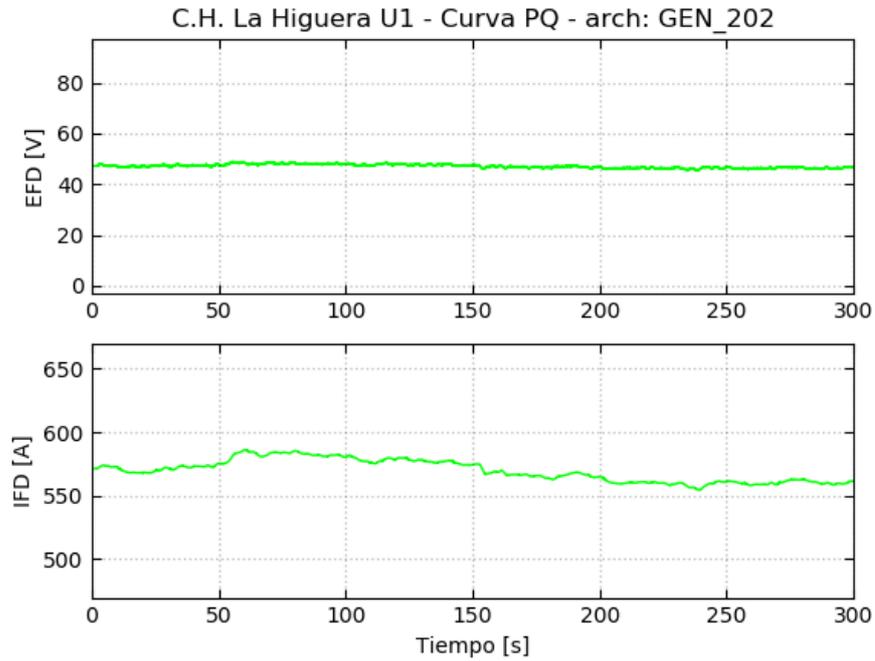


Figura 8.4: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

3. Punto P4_CT-Q3

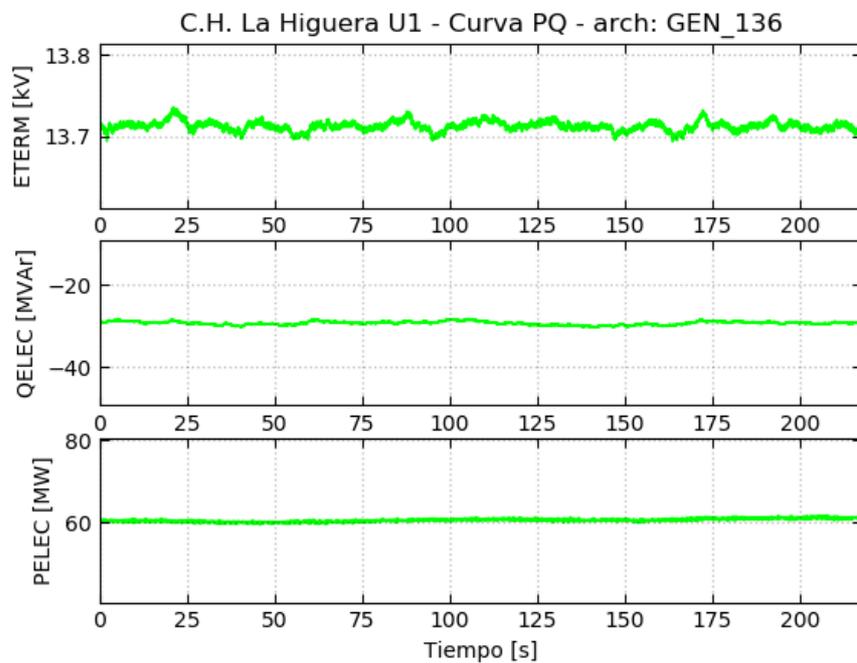


Figura 8.5: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

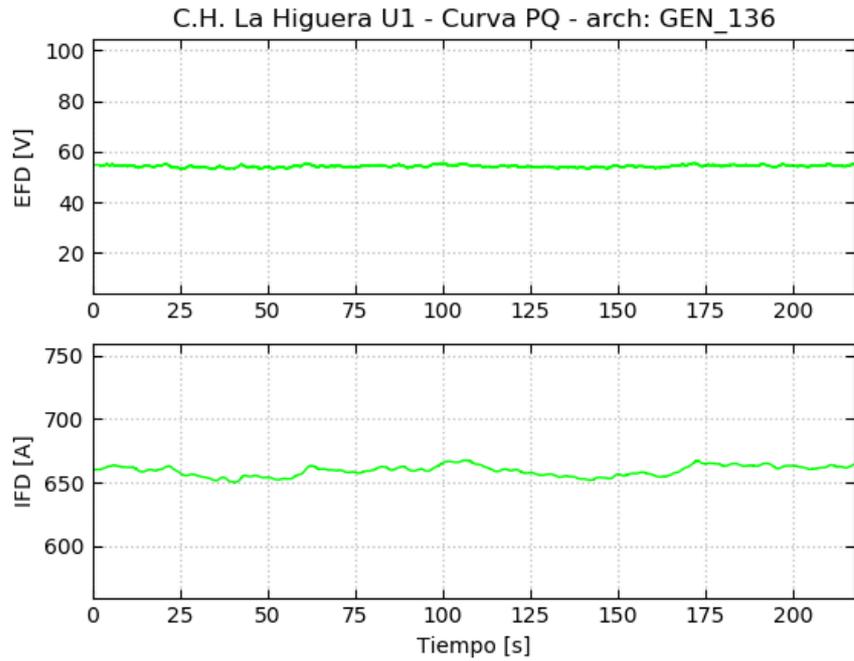


Figura 8.6: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

4. Punto P4_CT-Q6

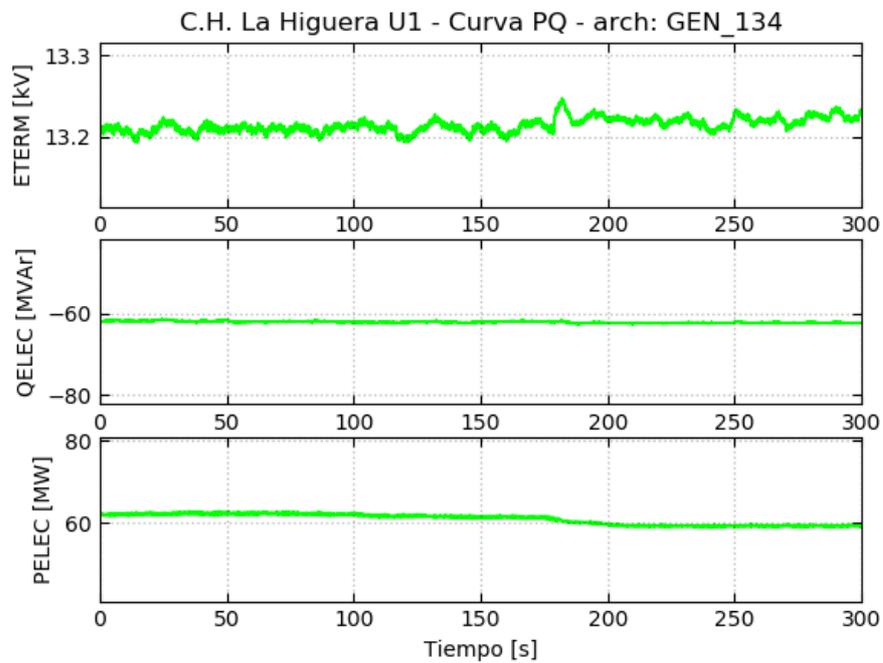


Figura 8.7: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

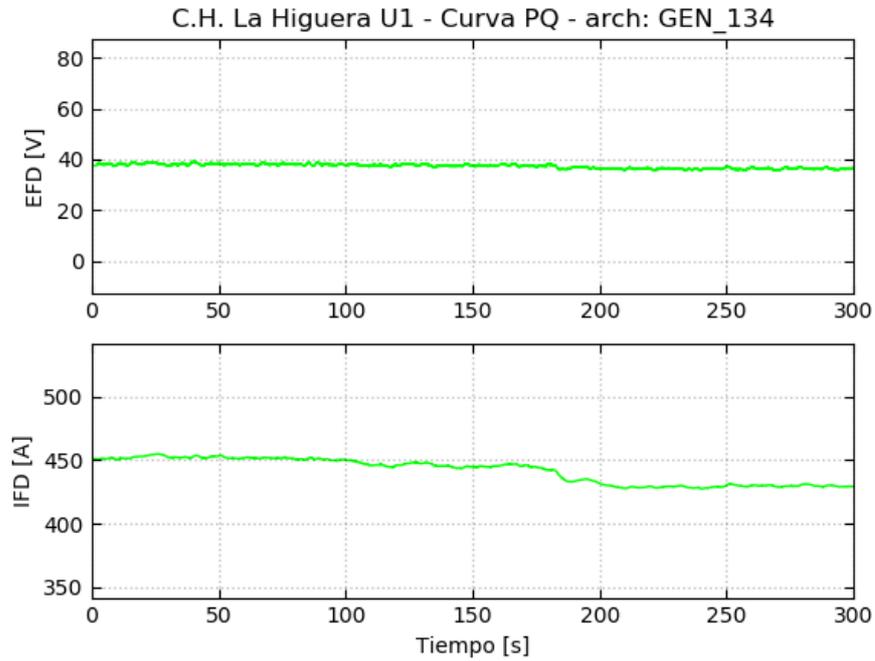


Figura 8.8: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

5. Punto P2_CT-Q7

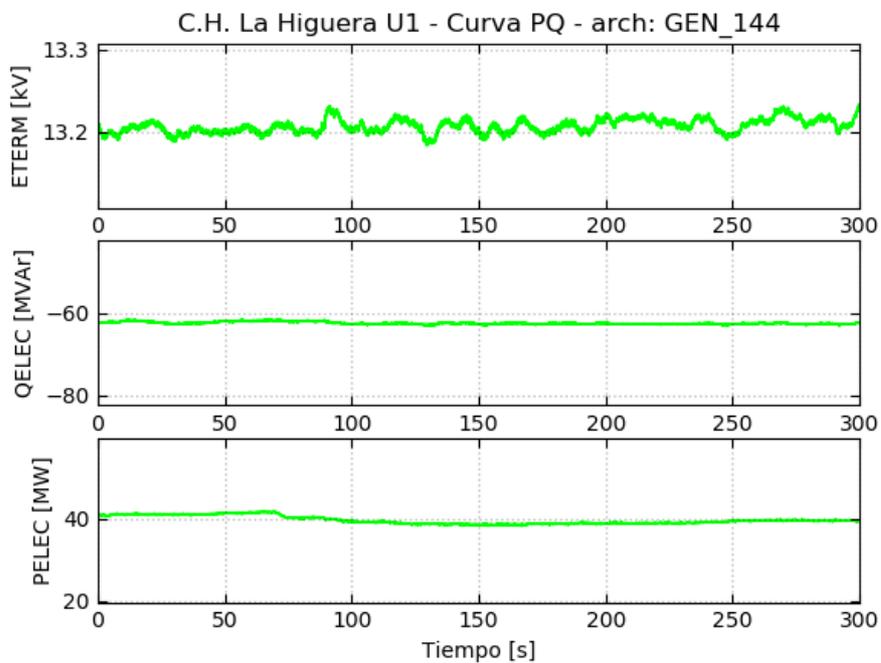


Figura 8.9: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

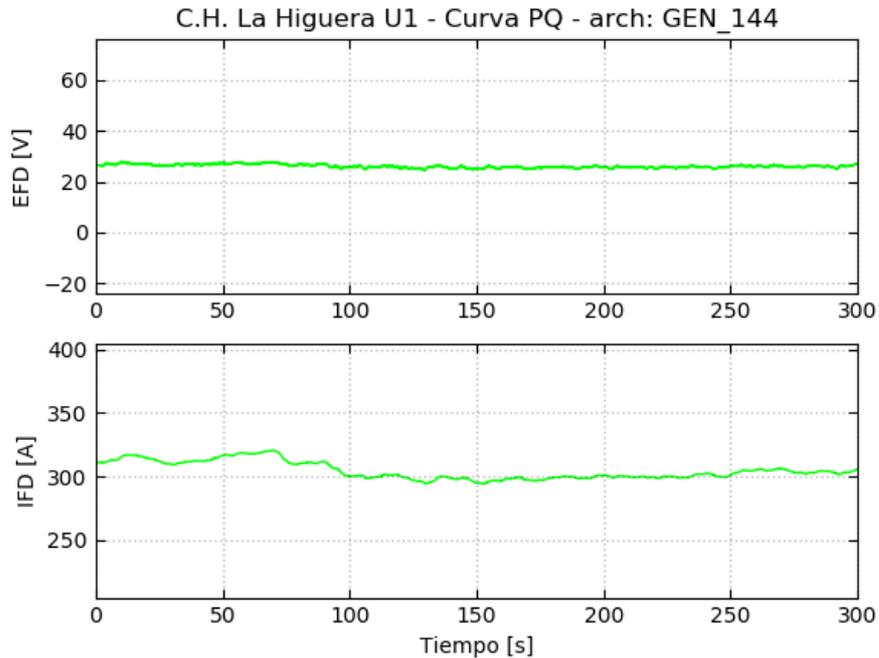


Figura 8.10: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

6. Punto P1_CT-Q8

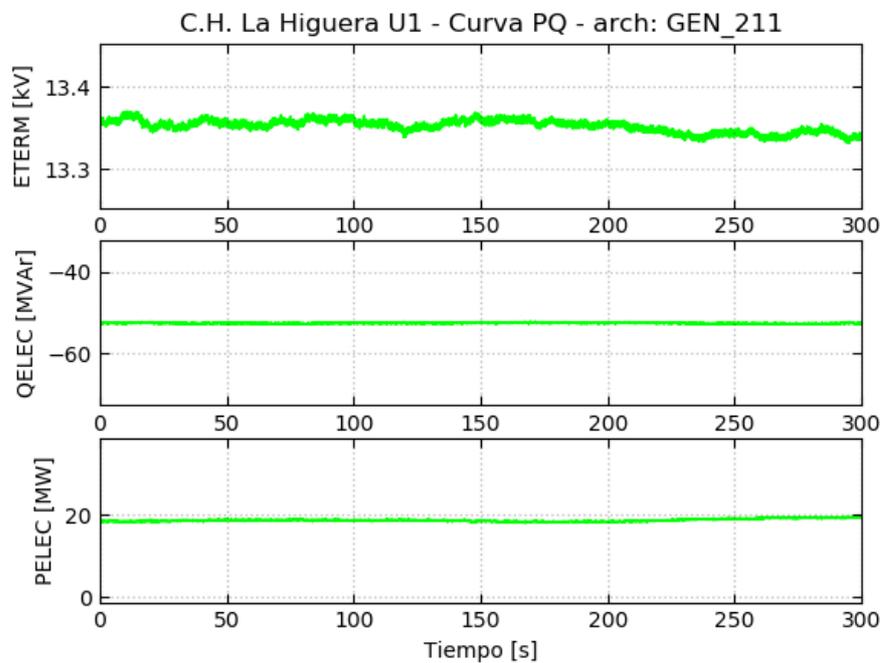


Figura 8.11: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

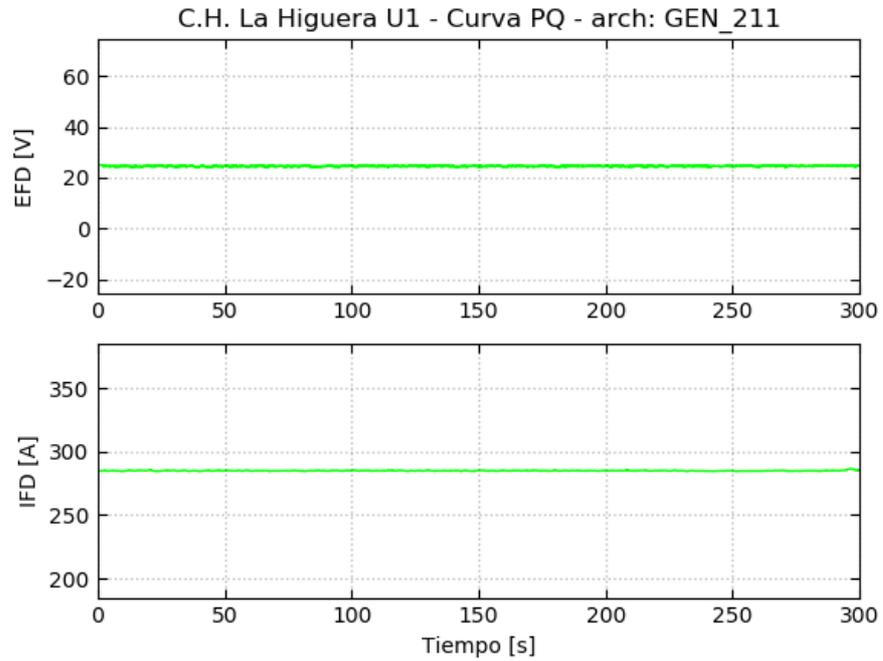


Figura 8.12: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

8.1.2 Verificación curva PQ @ 1.00 p.u.

A continuación, se presentan las mediciones realizadas para los distintos puntos de despacho de potencia activa recorriendo la curva de capacidad de la unidad correspondiente a 1.00 p.u. desde el lado sobrecitado hacia la parte subexcitada.

1. Punto P1_CT-Q1

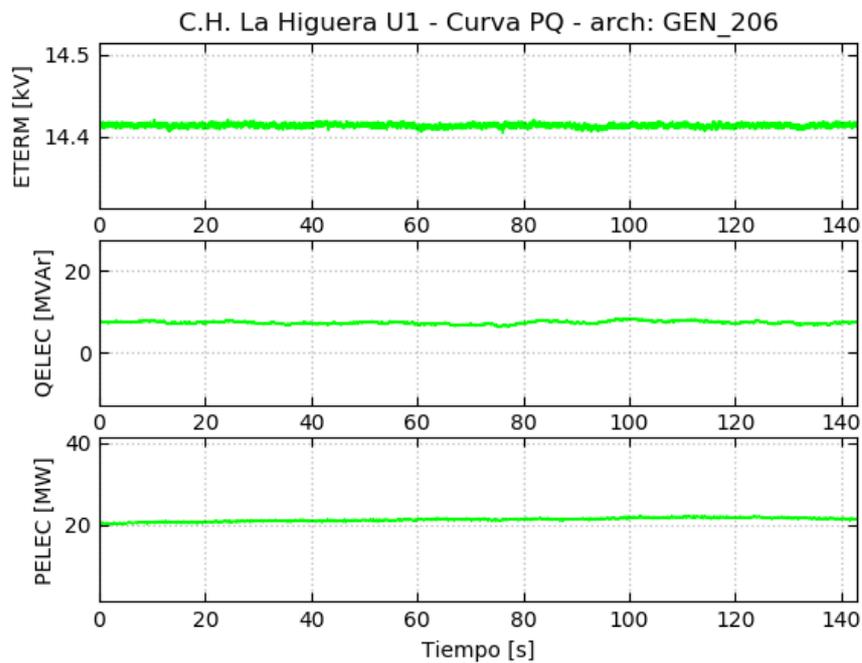


Figura 8.13: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

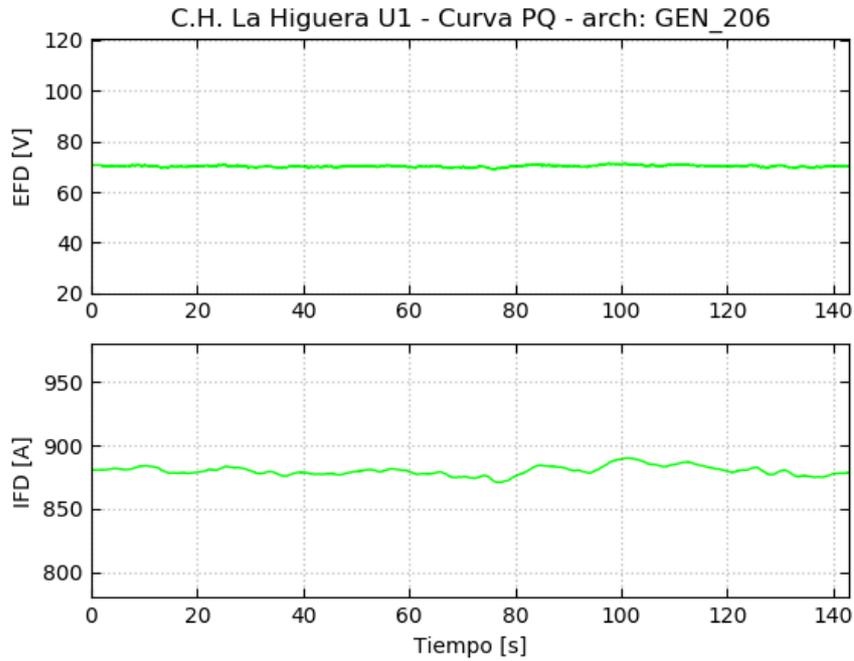


Figura 8.14: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

2. Punto P2_CT-Q2

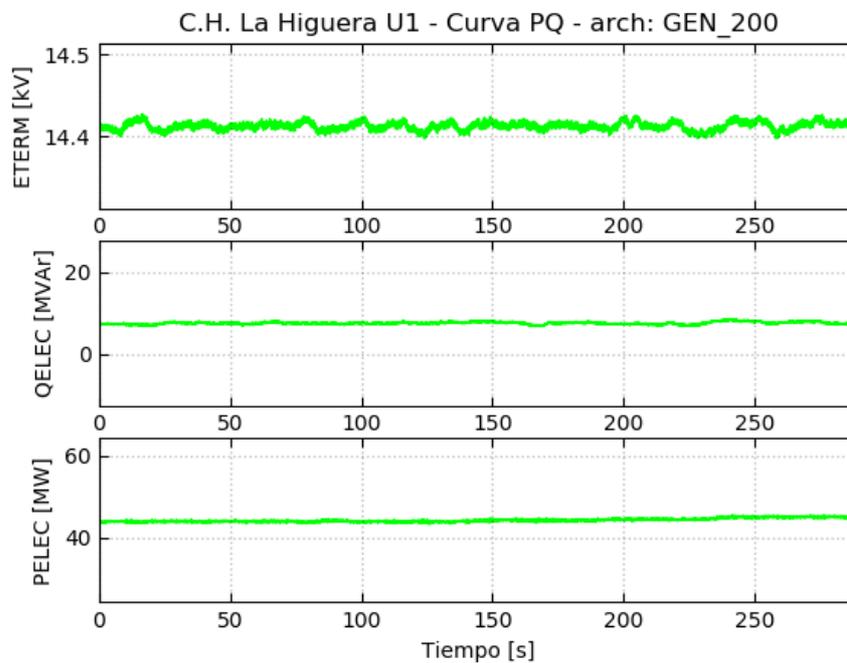


Figura 8.15: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

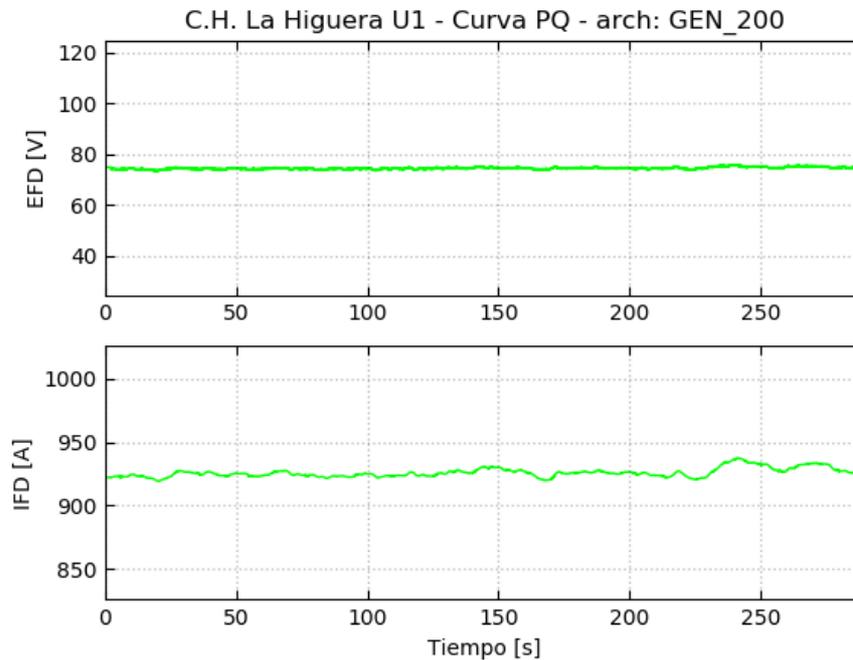


Figura 8.16: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

3. Punto P4_CT-Q3

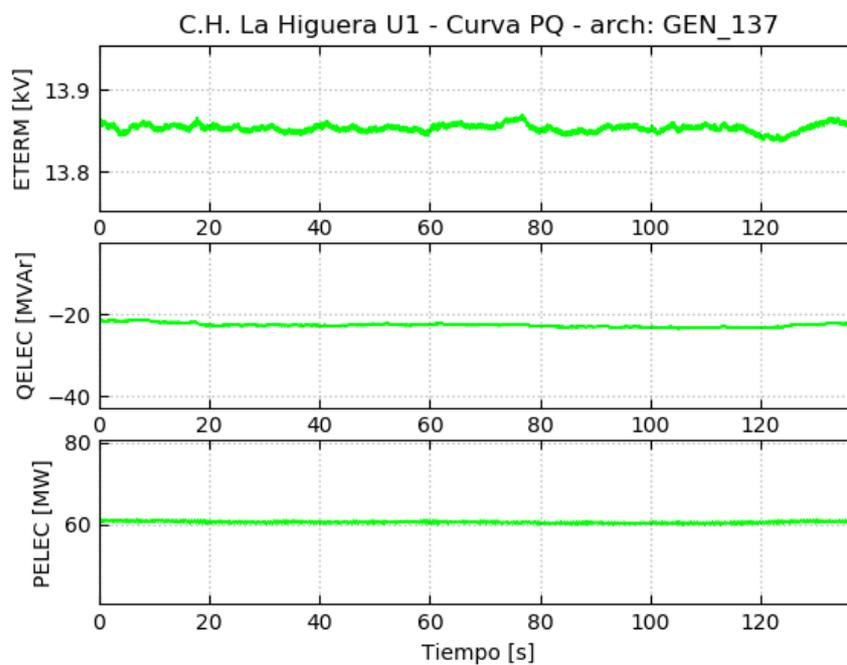


Figura 8.17: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

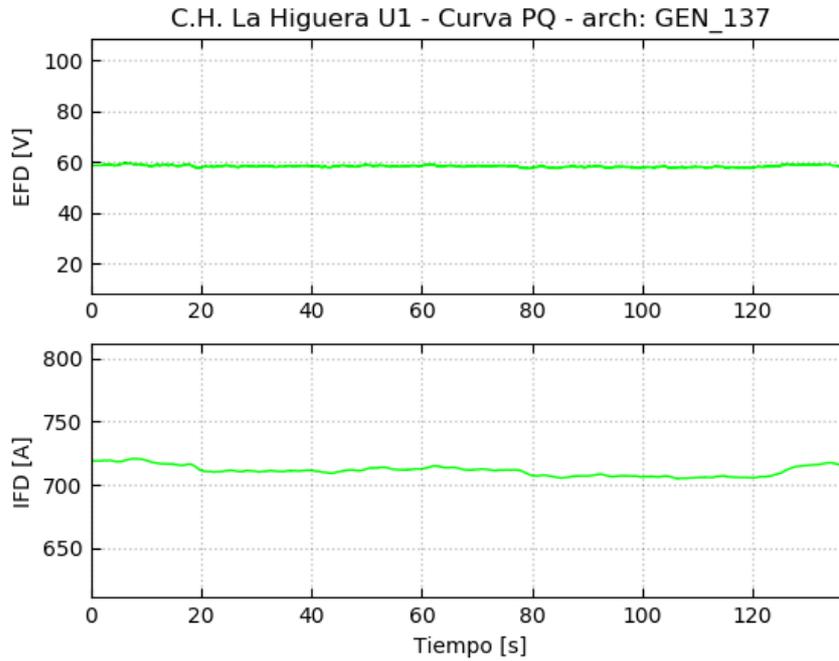


Figura 8.18: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

4. Punto P5_CT-Q4

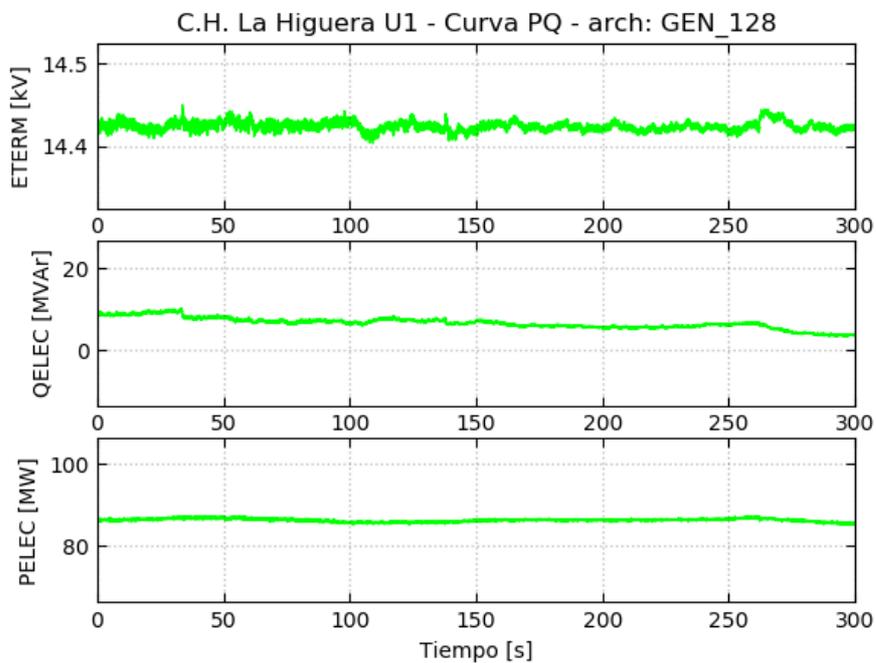


Figura 8.19: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

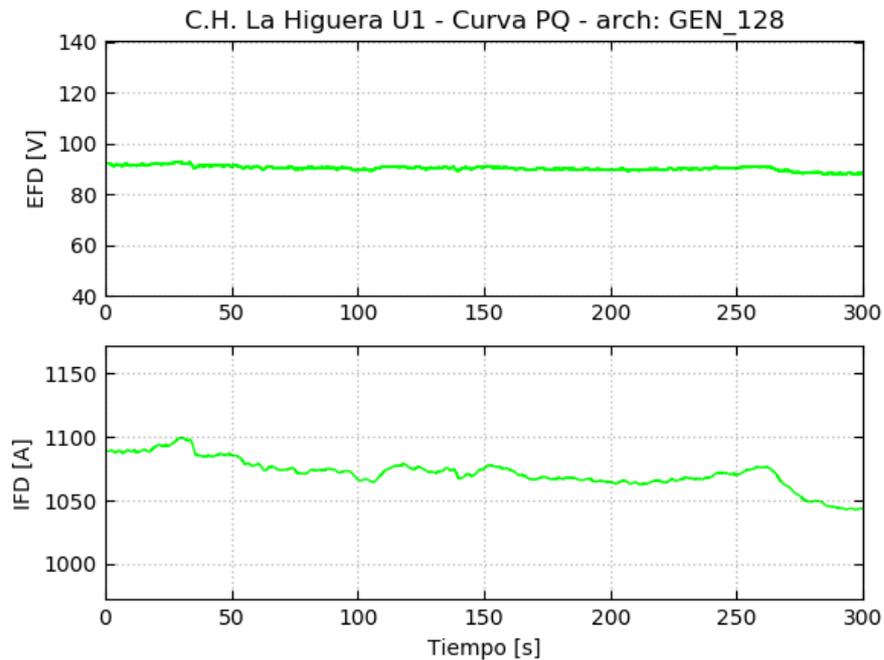


Figura 8.20: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

5. Punto P5_CT-Q5

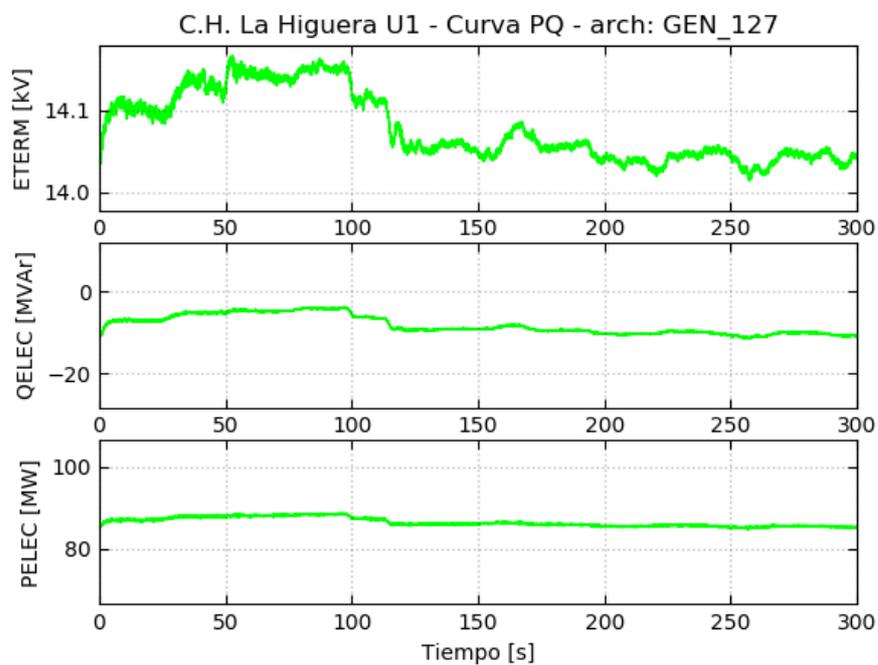


Figura 8.21: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

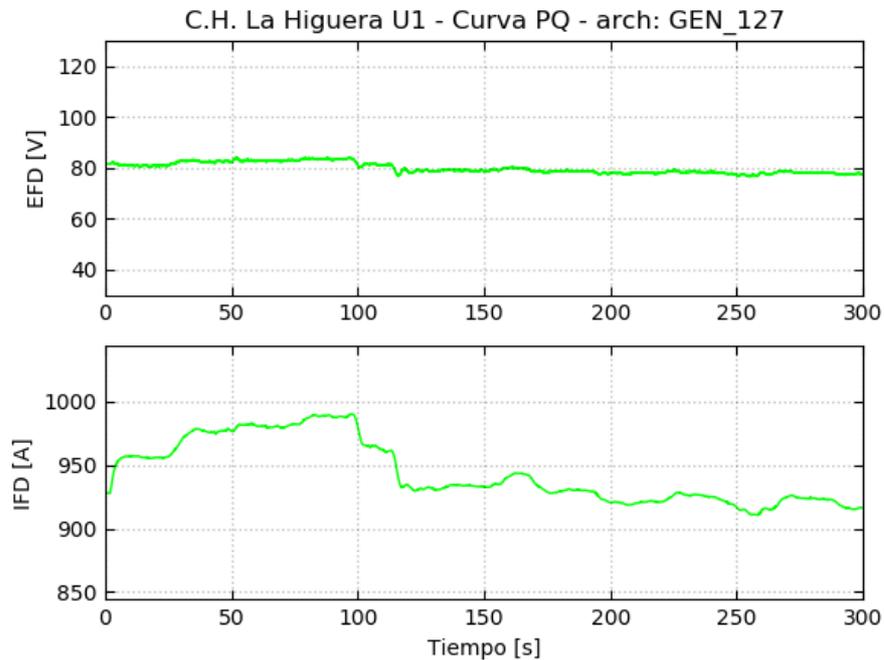


Figura 8.22: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

6. Punto P4_CT-Q6

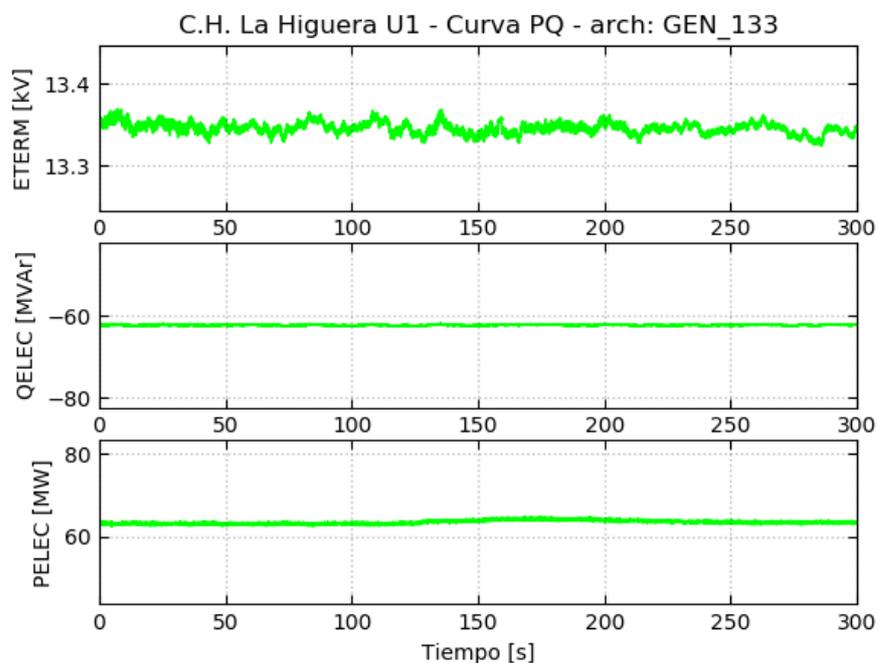


Figura 8.23: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

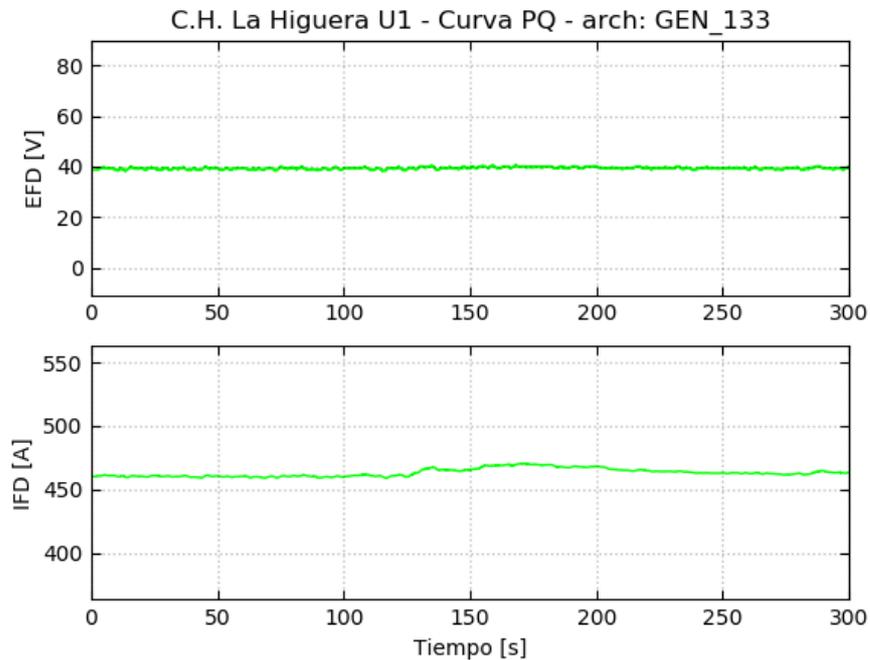


Figura 8.24: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

7. Punto P2_CT-Q7

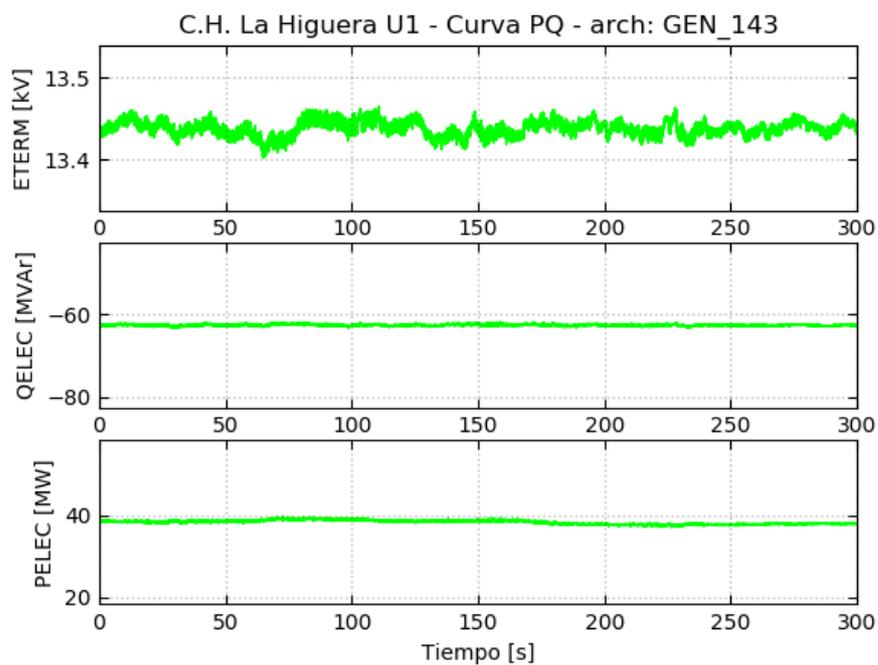


Figura 8.25: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

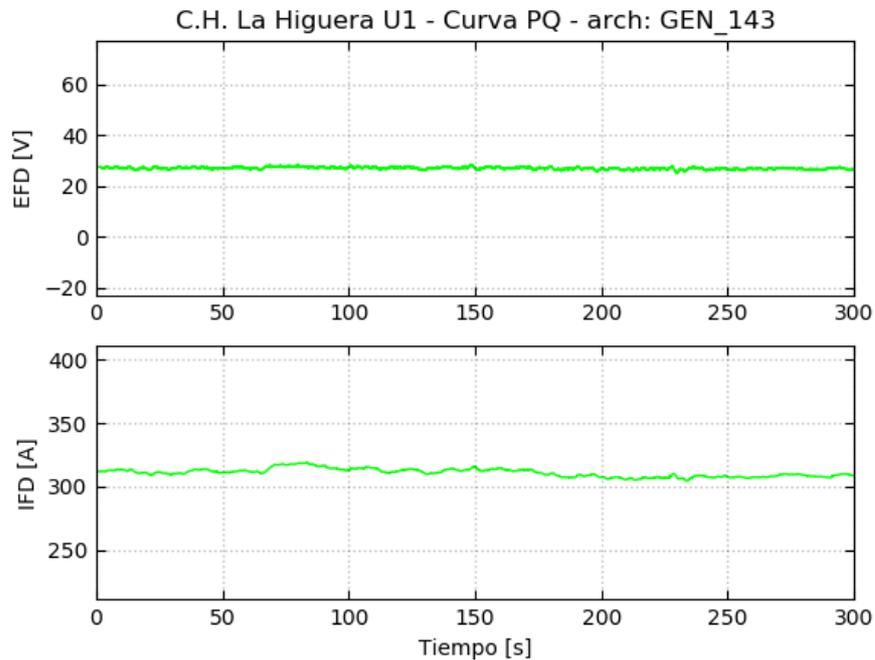


Figura 8.26: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

8. Punto P1_CT-Q8

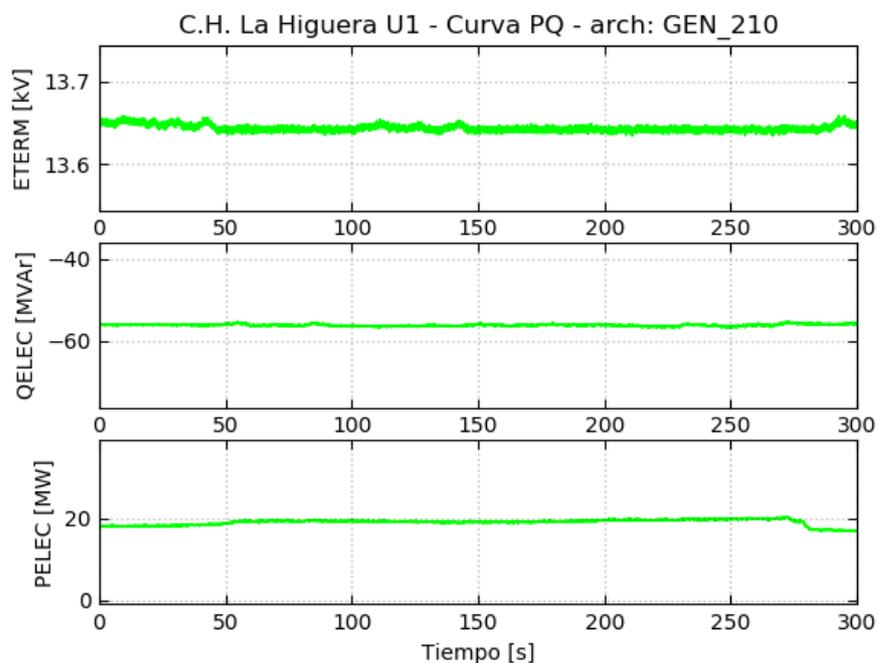


Figura 8.27: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

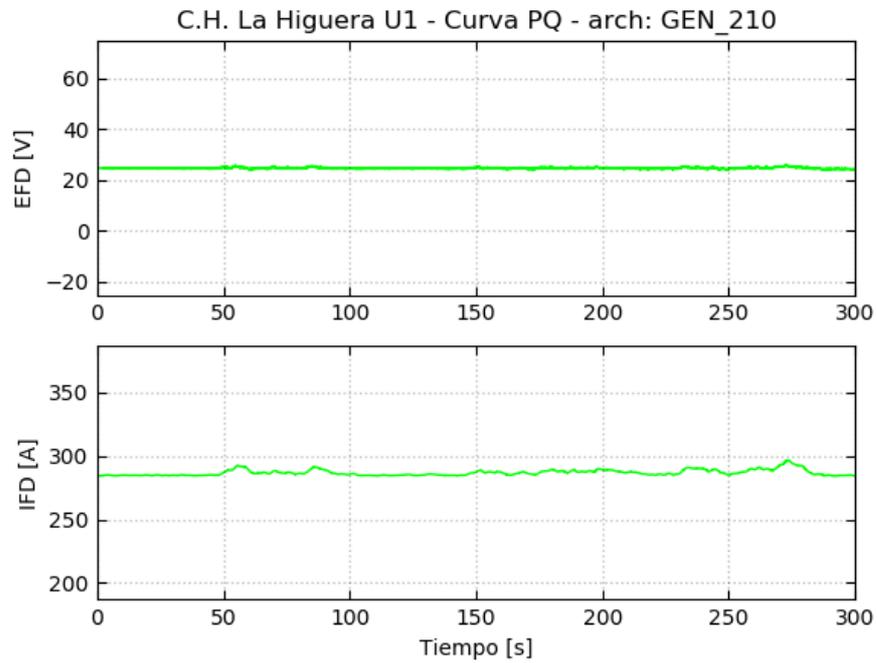


Figura 8.28: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

8.1.3 Verificación curva PQ @ 1.05 p.u.

A continuación, se presentan las mediciones realizadas para los distintos puntos de despacho de potencia activa recorriendo la curva de capacidad de la unidad correspondiente a 1.05 p.u. desde el lado sobrecitado hacia la parte subexcitada.

1. Punto P1_CT-Q1

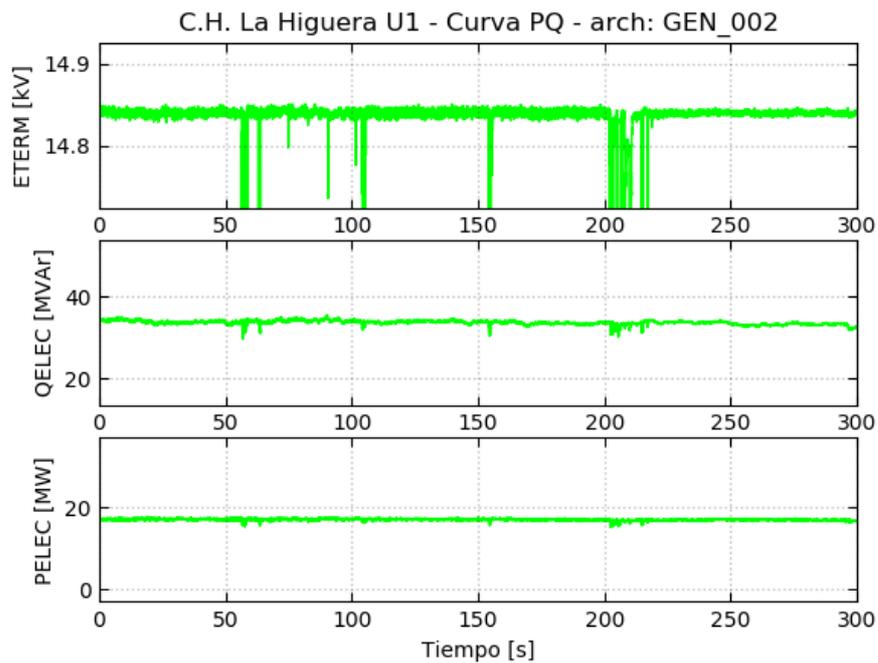


Figura 8.29: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

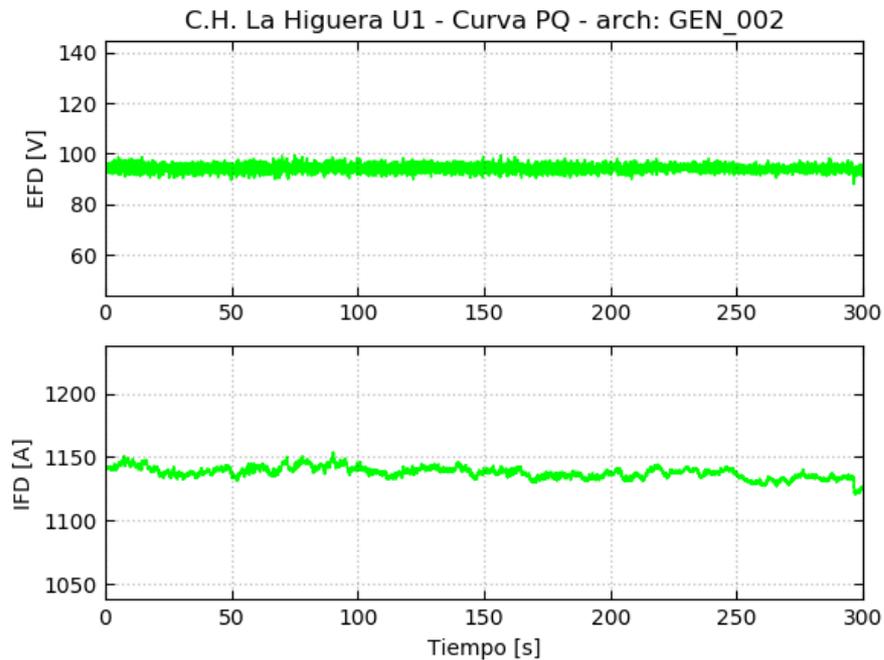


Figura 8.30: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

2. Punto P2_CT-Q2

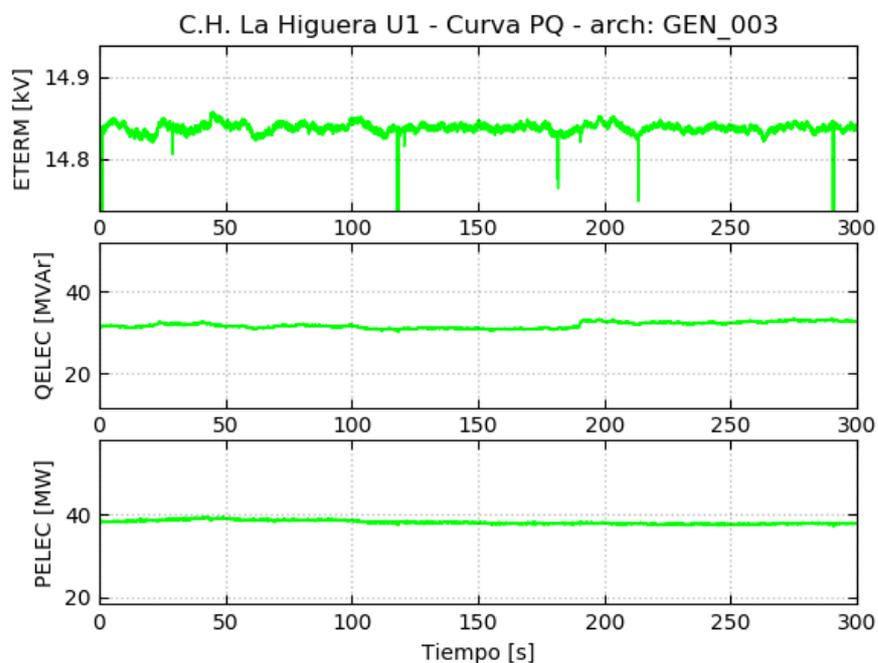


Figura 8.31: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

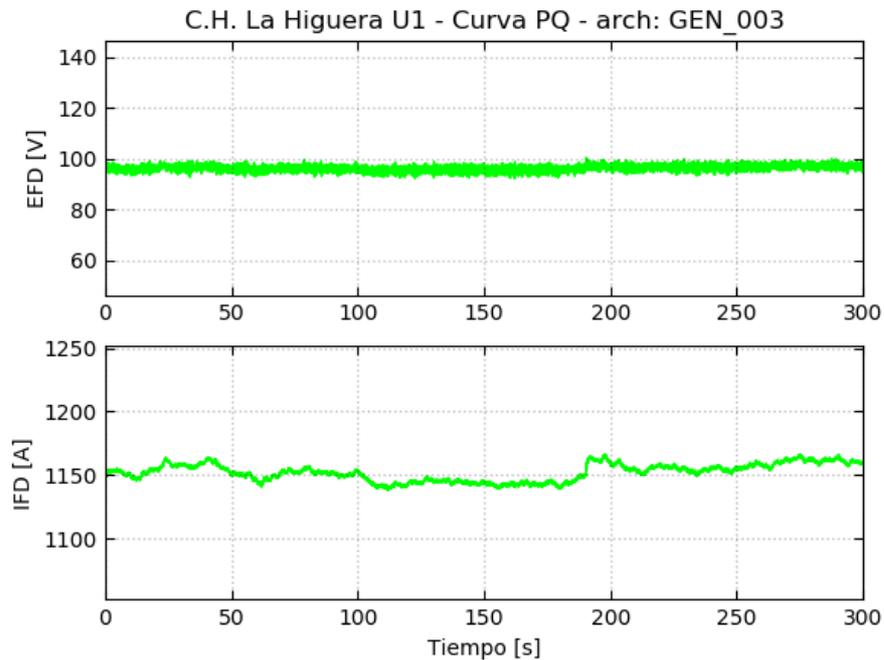


Figura 8.32: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

3. Punto P4_CT-Q3

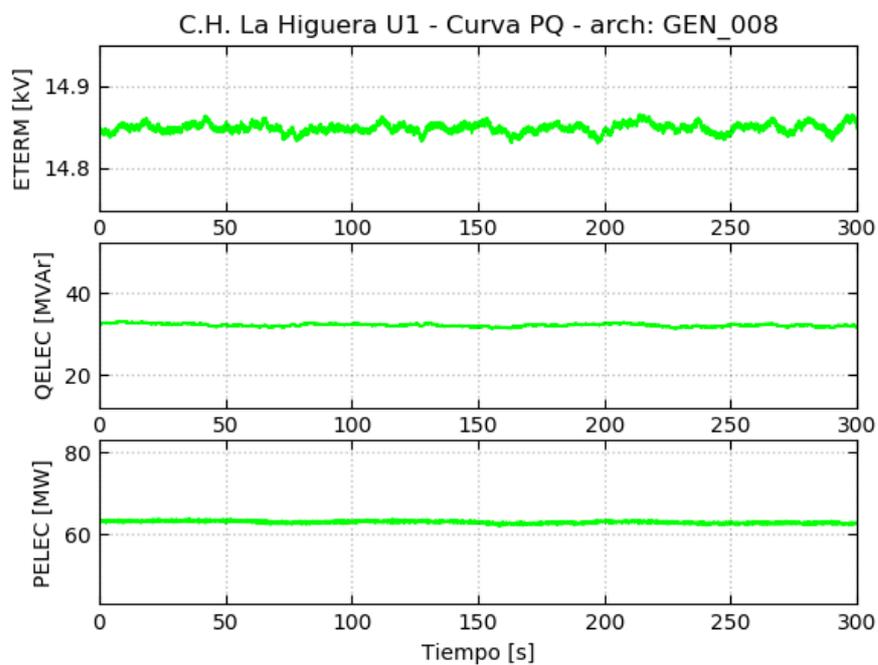


Figura 8.33: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

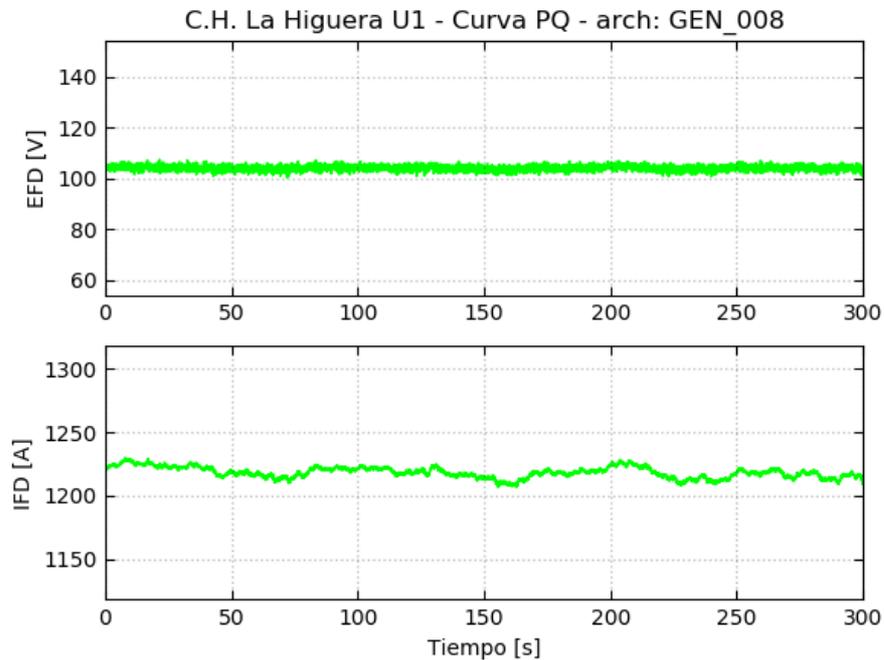


Figura 8.34: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

4. Punto P5_CT-Q4

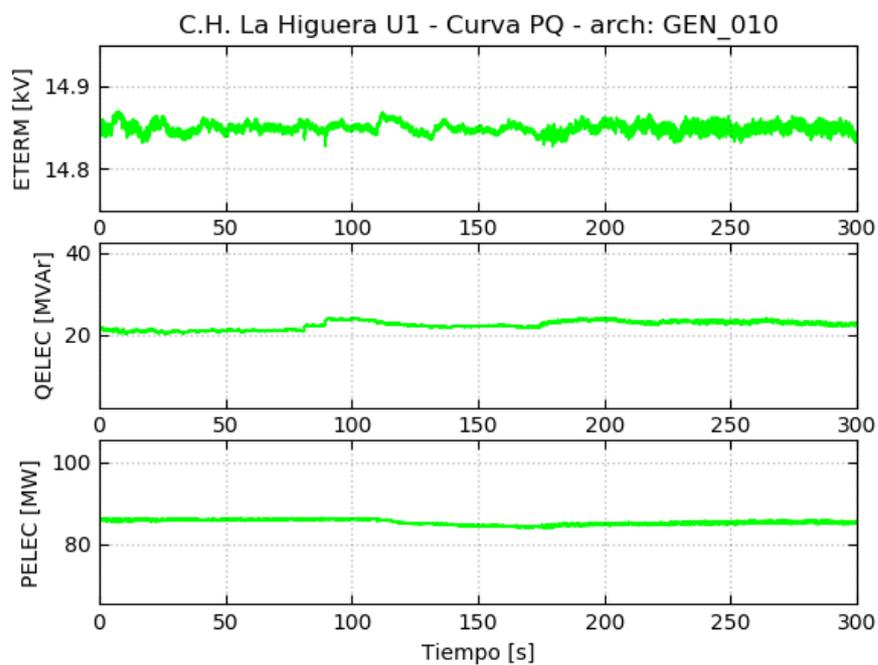


Figura 8.35: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

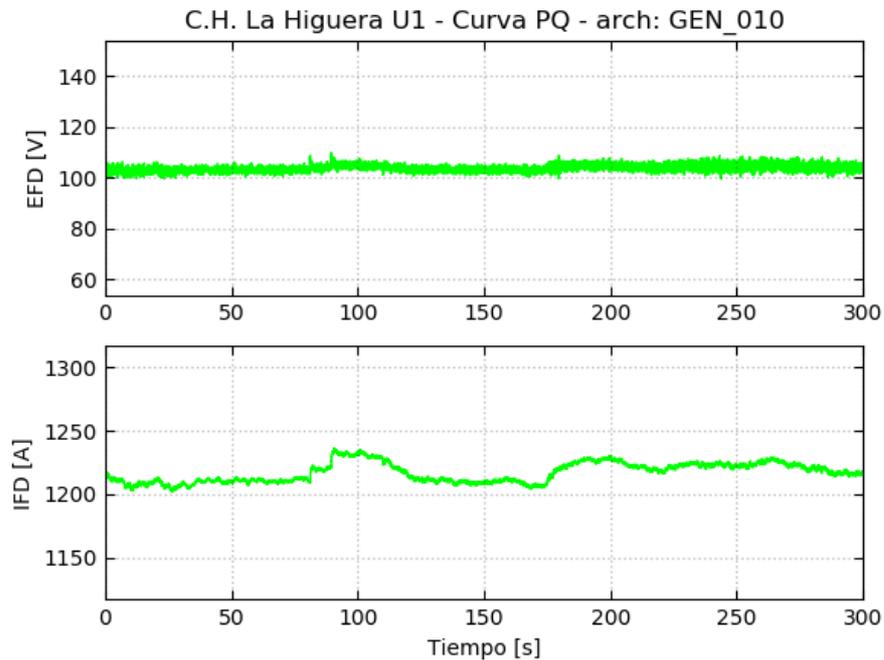


Figura 8.36: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

5. Punto P5_CT-Q5

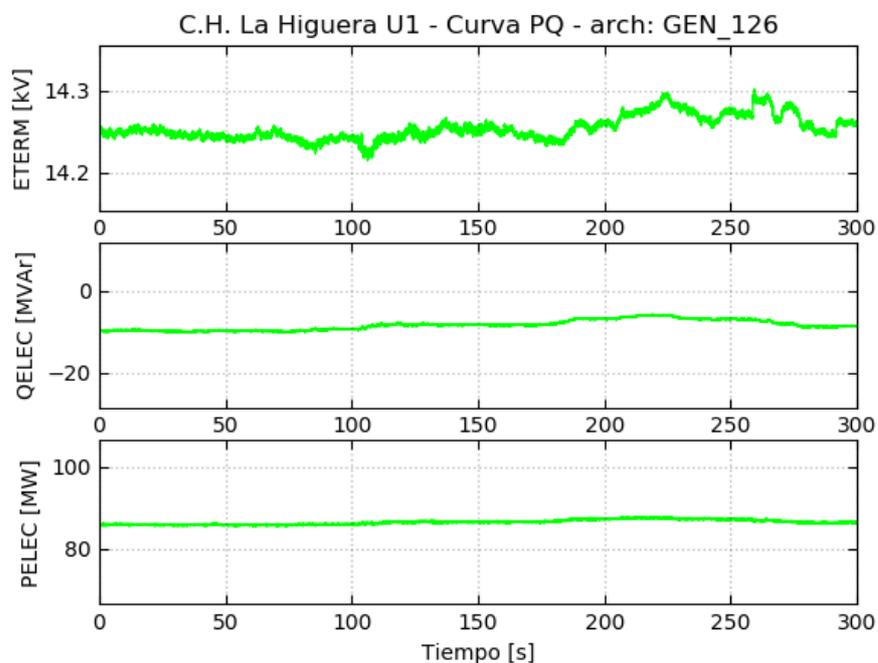


Figura 8.37: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

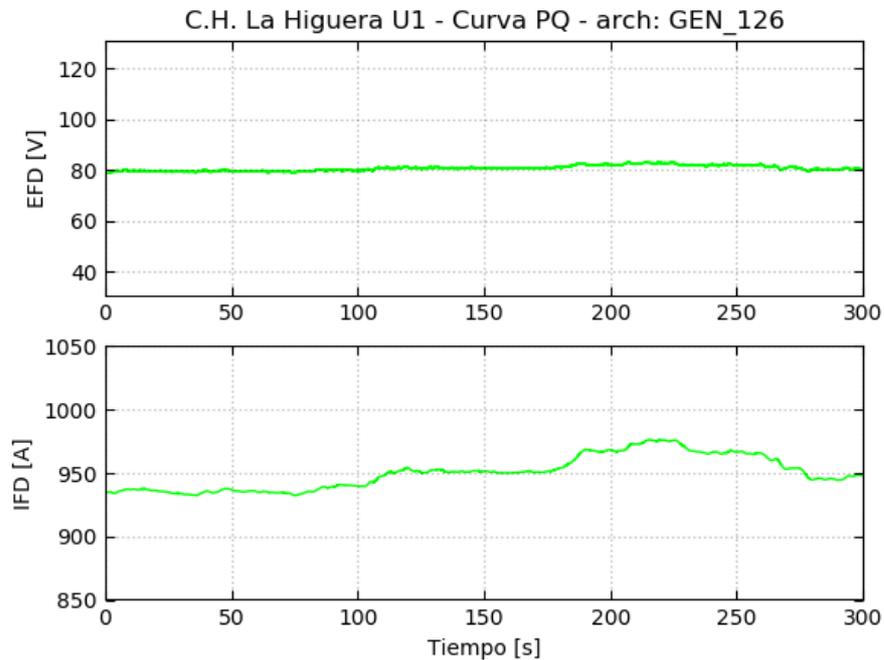


Figura 8.38: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

6. Punto P4_CT-Q6

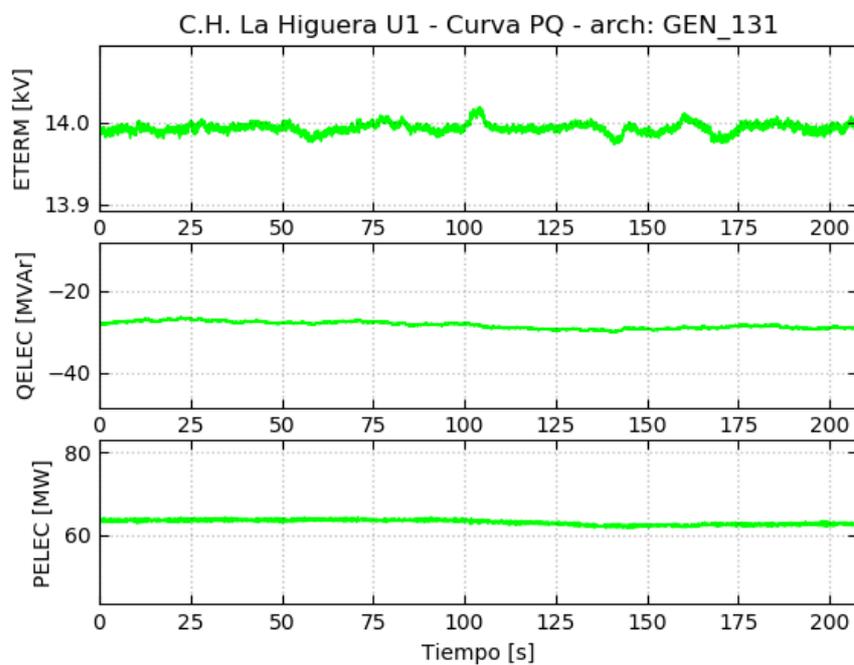


Figura 8.39: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

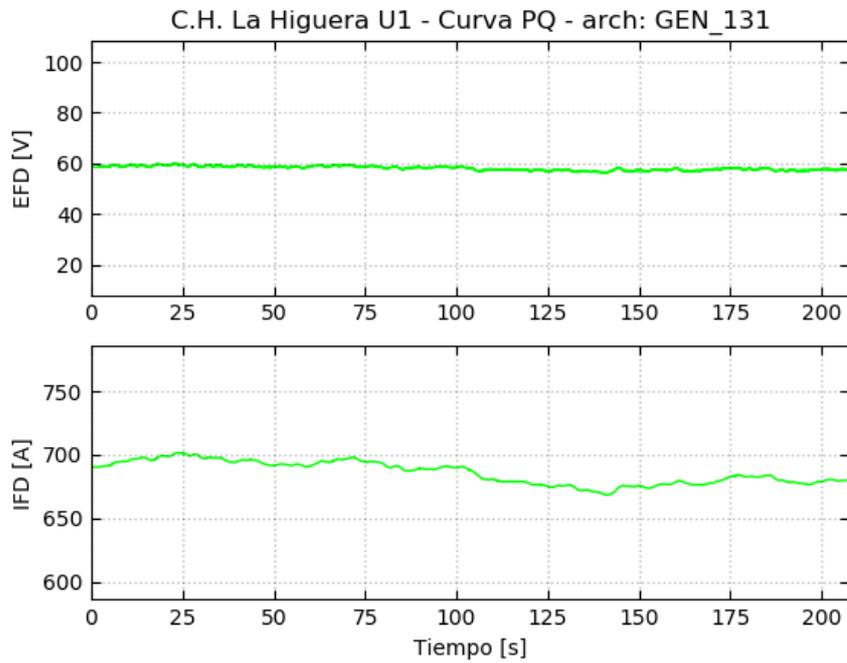


Figura 8.40: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

7. Punto P2_CT-Q7

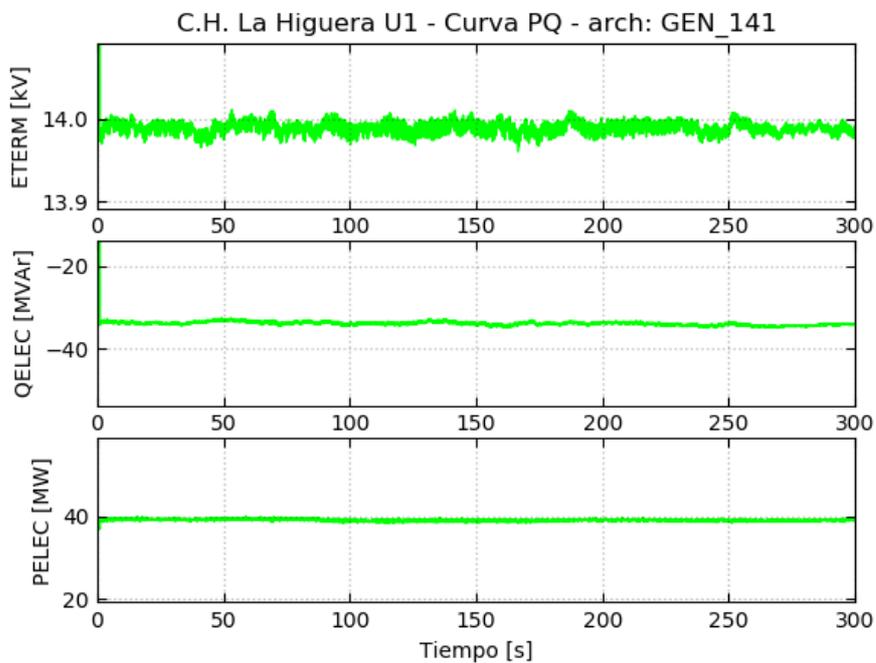


Figura 8.41: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

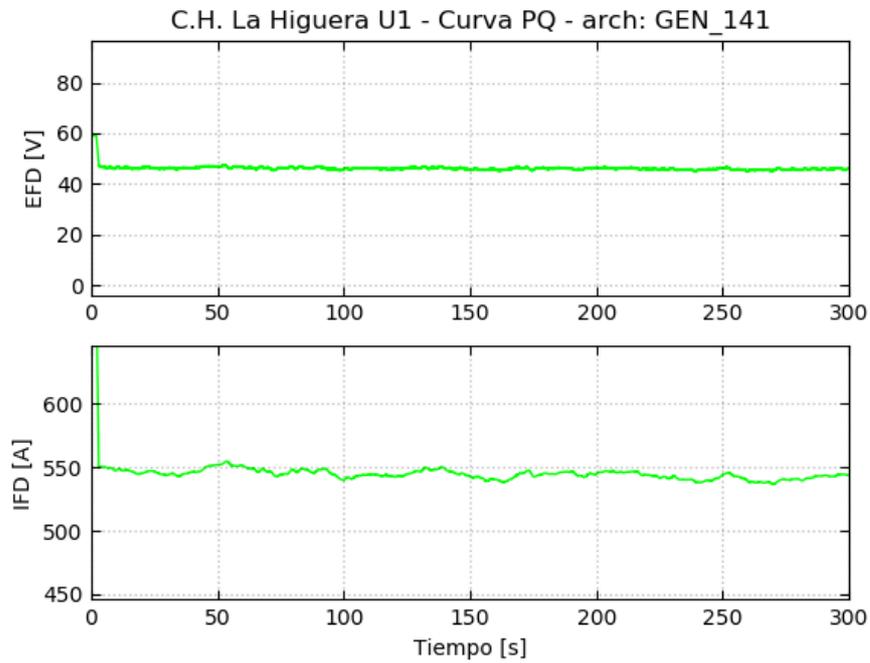


Figura 8.42: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

8. Punto P1_CT-Q8

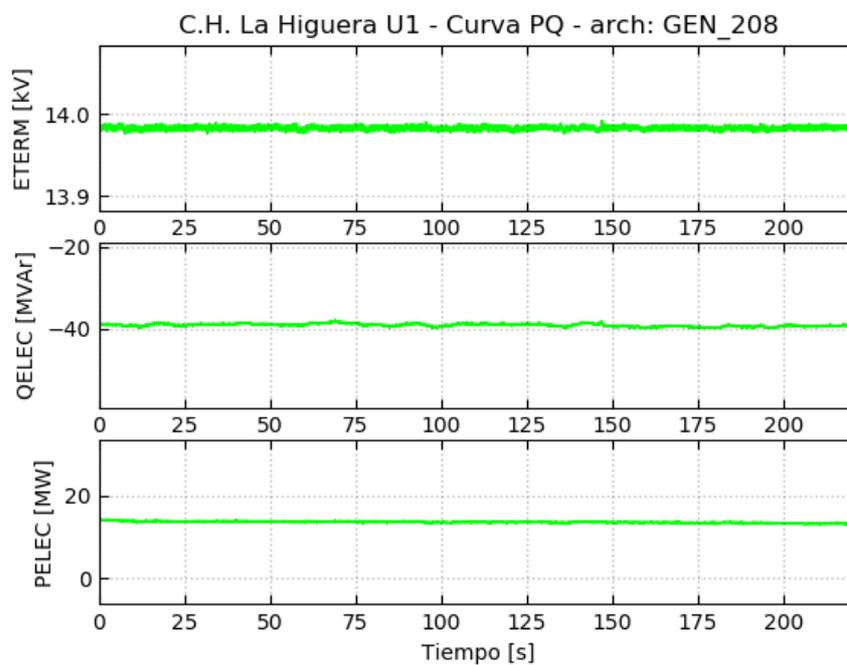


Figura 8.43: Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

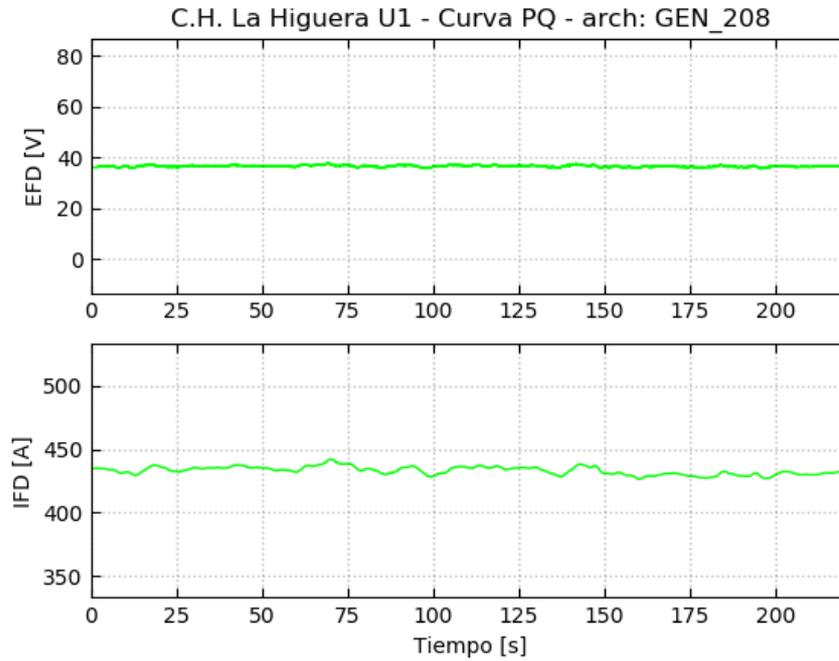


Figura 8.44: Verificación de curva PQ – Señales de campo del generador

8.2 Datos característicos del generador

| No. | Item | Data | Denomination |
|-----|---|-----------------------|--------------|
| 1. | Manufacturer | PM | |
| 2. | Type | CB 433/190-10 УХЛ4 | |
| 3. | Rated power | 91/77,35 | MVA / MW |
| 4. | Maximum power | 94,1/80 | MVA / MW |
| 5. | Rated power factor | 0,85 | |
| 6. | Rated voltage | 13,8 | kV |
| 7. | Rated stator current | 3807 | A |
| 8. | Maximum stator current | 3937 | A |
| 9. | Rated frequency | 50 | Hz |
| 10. | Rated speed | 600 | r/m |
| 11. | Run away speed | 996 | r/m |
| 12. | Stator inner diameter | 3300 | mm |
| 13. | Stator core length | 1900 | mm |
| 14. | No of slots | 180 | pcs. |
| 15. | No of stator sectors | 1 | pc |
| 16. | Number of rotor poles | 10 | pcs |
| 17. | No of coolers | 8 | pcs. |
| 18. | Cooling air temperature max | 40 | °C |
| 19. | Stator winding D.C. phase resistance at 15°C | 0,0031 | Ω |
| 20. | Rotor winding D.C. resistance 15°C | 0,074 | Ω |
| 21. | Field current at rated load | 1290 | A |
| 22. | Rated field voltage | 130 | V |
| 23. | Load losses | 368 | kW |
| 24. | No load losses | 1037 | kW |
| 25. | Efficiency at rated load and power factor of 0,85 (G) | 98,21 | % |

Figura 8.45: Hoja de datos del generador

8.3 Placa de transformador de excitación

| ООО "Электрофизика" ST. PETERSBURG RUSSIA | | | | |
|---|------------------|--------|---------------------|--------|
| DRY POWER TRANSFORMER | | | | |
| | | N 1315 | | 2007 |
| Type | ТCЗП-630/15 УХЛ4 | | 3 - phase | f=50Hz |
| Power nom. | 590 | kVA | Vektor group | Y/η-11 |
| Uk | 6.1 | % | Weight | 3420 |
| Class of insulation | F.H | | Enclosure | IP30 |
| | | | Climate version | УХЛ4 |
| Primary A B C | | | Secondary a b c | |
| Terminal jumper | Un. V | In. A | Un. V | In. A |
| 1 | 14490 | | | |
| 2 | 14145 | | | |
| 3 | 13800 | 22.4 | 260 | 1190 |
| 4 | 13455 | | | |
| 5 | 13110 | | | |
| withstand voltage ~ | 38 | kV | withstand voltage ~ | 5 kV |

Figura 8.46: Placa de transformador de excitación

8.4 Placa de la turbina



Figura 8.47: Placa de la turbina

8.5 Curva de capacidad del generador

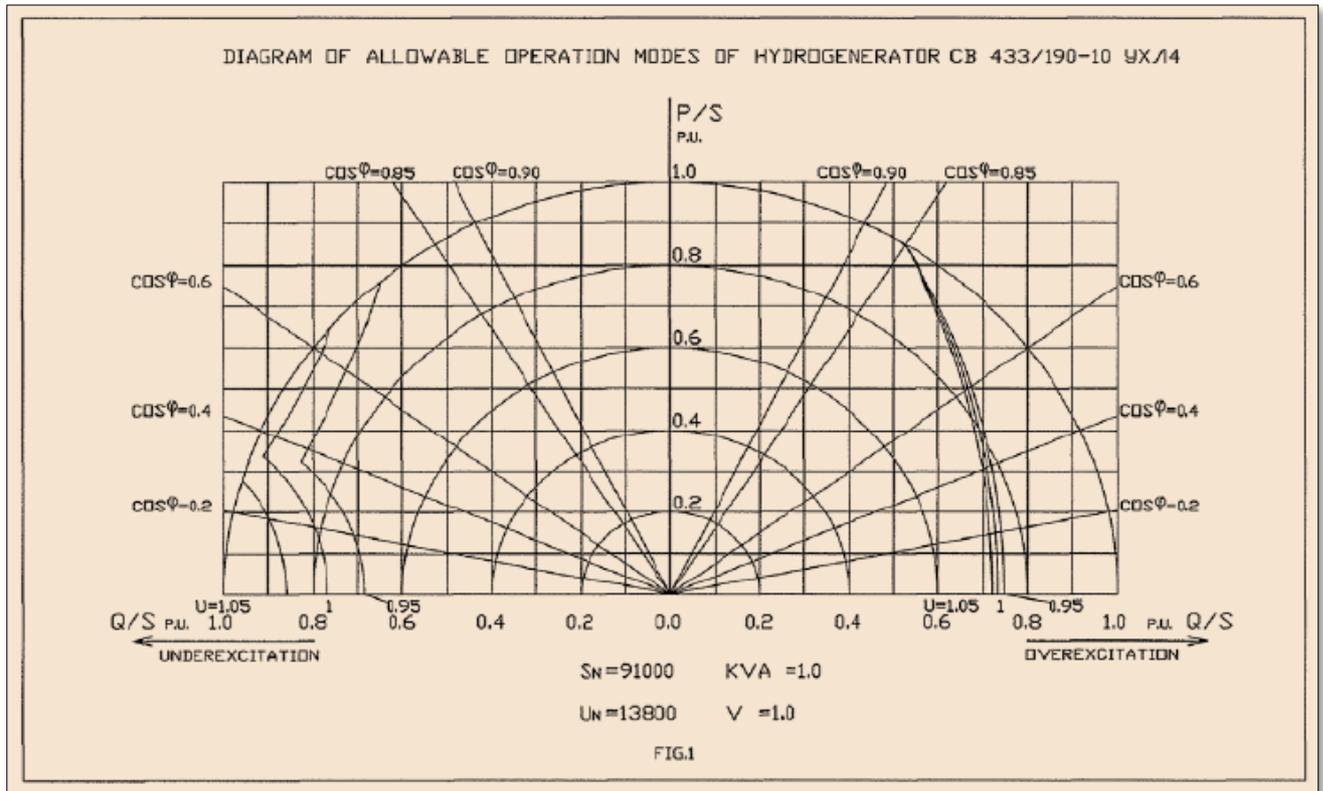


Figura 8.48: Curva de capacidad del generador según fabricante

8.6 Curva de saturación del generador

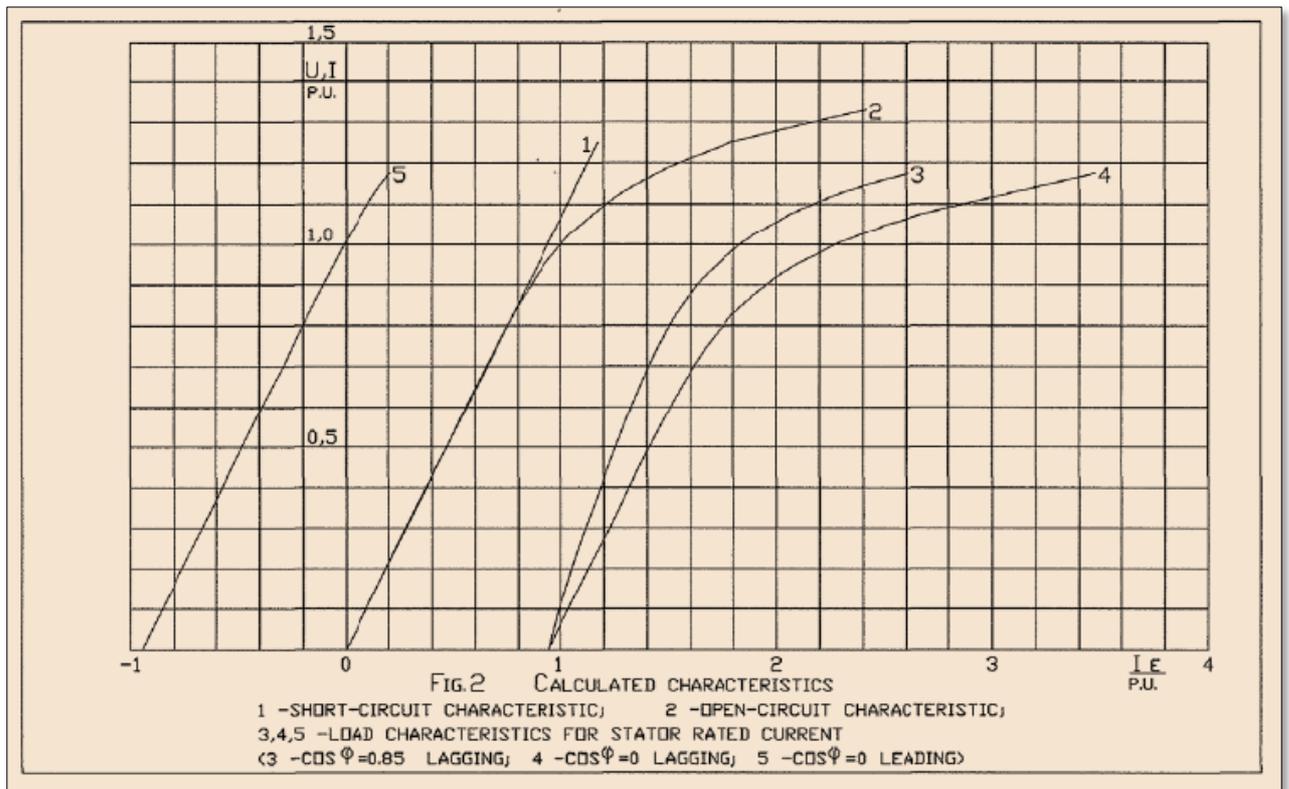


Figura 8.49: Curvas de saturación del generador según fabricante

8.7 Máxima y mínima tasa de toma y bajada de carga

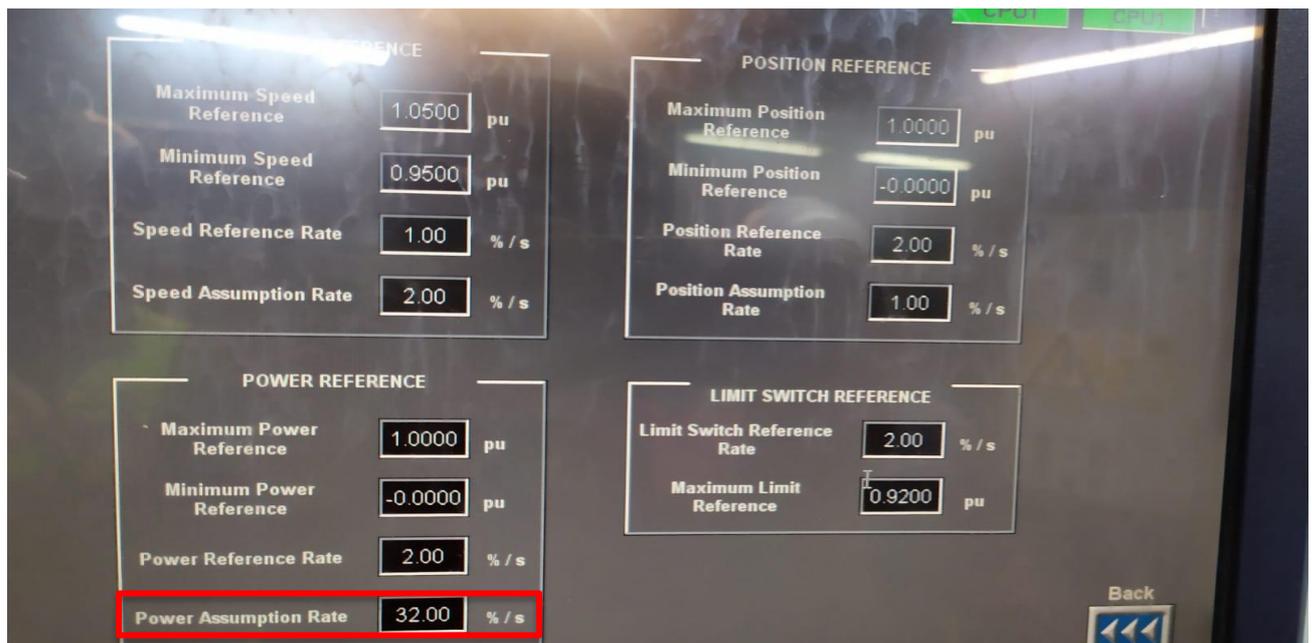


Figura 8.50 - Máxima tasa de toma de carga

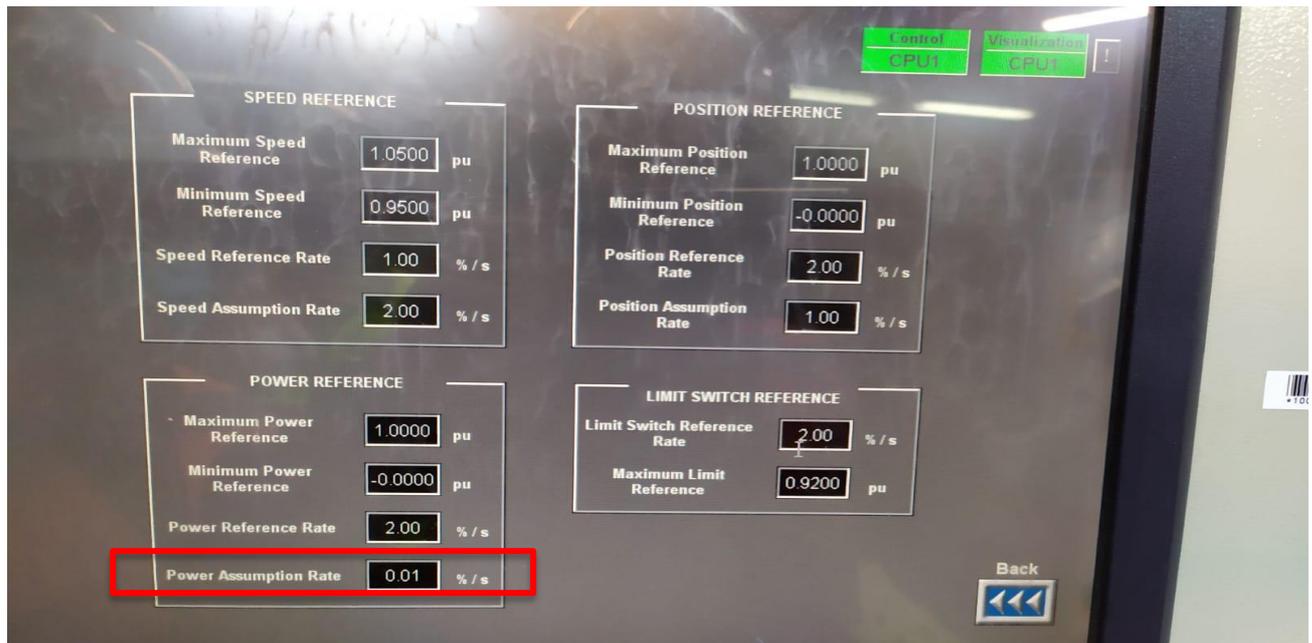


Figura 8.51 – Mínima tasa de bajada de carga

8.8 Protecciones de generador

```
DATA,Circle 1 Trip,1049,1,1,1,0,8450,2 (Unlatched)
DATA,Circle 1 Diameter,1050,1,1,1,0,8452,65.3 Ohm sec
DATA,Circle 1 Offset,1051,1,1,1,0,8453,10.6 Ohm sec
DATA,Circle 1 Trip Delay,1052,1,1,1,0,8454,0.3 s
DATA,Circle 2 Trip,1053,1,1,1,0,8455,2 (Unlatched)
DATA,Circle 2 Diameter,1054,1,1,1,0,8457,93.3 Ohm sec
DATA,Circle 2 Offset,1055,1,1,1,0,8458,10.6 Ohm sec
DATA,Circle 2 Trip Delay,1056,1,1,1,0,8459,0.5 s
```

Figura 8.52 – Protección de pérdida de excitación

```
DATA,Overvoltage Alarm Pickup,995,1,1,1,0,8226,1.08 x Rated
DATA,Overvoltage Alarm Delay,996,1,1,1,0,8227,90.0 s
DATA,Overvoltage Alarm Events,997,1,1,1,0,8228,1 (On)
DATA,Overvoltage Trip,998,1,1,1,0,8229,2 (Unlatched)
DATA,Overvoltage Trip Pickup,999,1,1,1,0,8231,1.10 x Rated
DATA,Overvoltage Trip Delay,1000,1,1,1,0,8232,1.0 s
DATA,Overvoltage Curve Reset Rate,1001,1,1,1,0,8233,0.6 s
DATA,Overvoltage Curve Element,1002,1,1,1,0,8234,0 (Curve)
```

Figura 8.53 – Protección de sobretensión

```

DATA,Volts/Hertz Alarm Pickup,1513,1,1,1,0,8258,1.06 X Nominal
DATA,Volts/Hertz Alarm Delay,1514,1,1,1,0,8259,3.0 s
DATA,Volts/Hertz Alarm Events,1515,1,1,1,0,8260,1 (On)
DATA,Volts/Hertz Trip Pickup,1516,1,1,1,0,8263,1.08 X Nominal
DATA,Volts/Hertz Trip Delay,1517,1,1,1,0,8264,1.0 s
DATA,Volts/Hertz Trip Reset Rate,1518,1,1,1,0,8265,1.0
DATA,Volts/Hertz Trip Element,1519,1,1,1,0,8266,0 (Curve #1)
    
```

Figura 8.54 – Protección de sobreflujo

| UNDERFREQUENCY[SETPOINT GROUP 1] | |
|----------------------------------|--------------|
| Block Underfrequency from Online | 1 s |
| Voltage Level Cutoff | 0.90 x Rated |
| Underfrequency Alarm | Unlatched |
| Underfrequency Alarm Relay | Relays 3-5 |
| Underfrequency Alarm Level | 49.00 Hz |
| Underfrequency Alarm Delay | 5000.0 s |
| Underfrequency Alarm Events | On |
| Underfrequency Trip | Unlatched |
| Underfrequency Trip Relay | Relay 3 |
| Underfrequency Trip Level 1 | 48.00 Hz |
| Underfrequency Trip Delay 1 | 1800.0 s |
| Underfrequency Trip Level 2 | 47.50 Hz |
| Underfrequency Trip Delay 2 | 5.0 s |

Figura 8.55 – Protección de subfrecuencia

| OVERFREQUENCY[SETPOINT GROUP 1] | |
|--------------------------------------|--------------|
| Block Overfrequency from Online | 1 s |
| Voltage Level Cutoff (overfrequency) | 0.90 x Rated |
| Overfrequency Alarm | Unlatched |
| Overfrequency Alarm Relay | Relays 3-5 |
| Overfrequency Alarm Level | 51.01 Hz |
| Overfrequency Alarm Delay | 5000.0 s |
| Overfrequency Alarm Events | On |
| Overfrequency Trip | Unlatched |
| Overfrequency Trip Relay | Relay 3 |
| Overfrequency Trip Level 1 | 51.51 Hz |
| Overfrequency Trip Delay1 | 90.0 s |
| Overfrequency Trip Level2 | 52.01 Hz |
| Overfrequency Trip Delay2 | 15.0 s |

Figura 8.56 – Protección de sobrefrecuencia

8.9 Diagrama de bloques del regulador de tensión

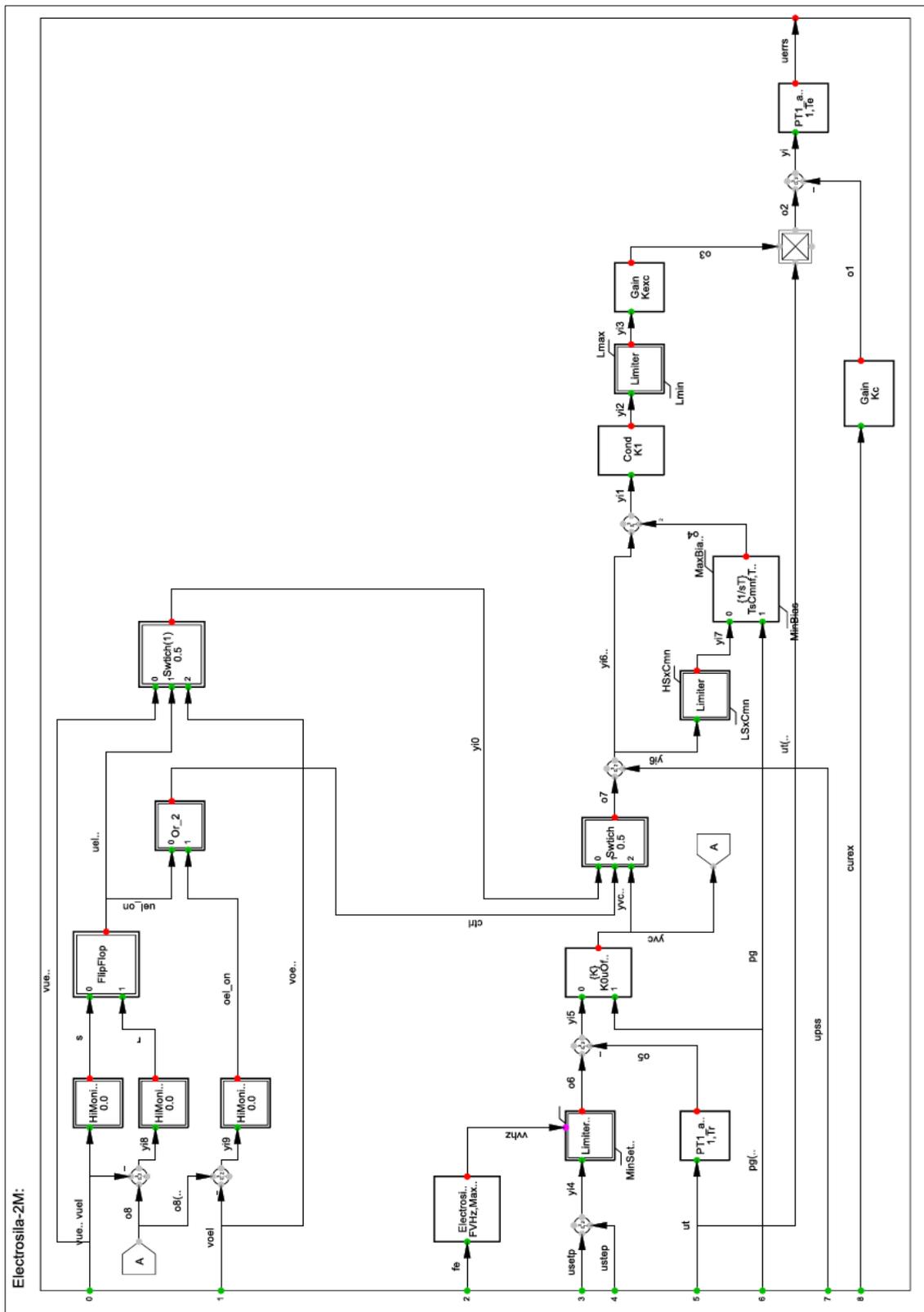


Figura 8.57: Diagrama de bloques - AVR

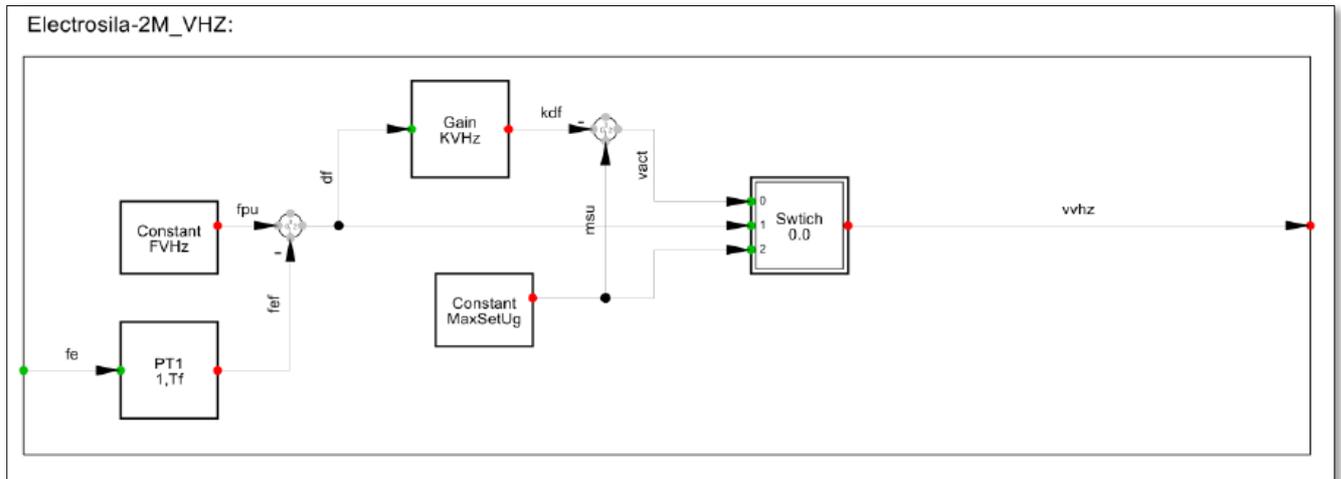


Figura 8.60: Diagrama de bloques limitador V/Hz

8.10 Ajuste de limitadores

| | PQ _x | PQ _y |
|------|-----------------|-----------------|
| Size | 5, | 5, |
| 1 | 0, | -0,682 |
| 2 | 0,502 | -0,682 |
| 3 | 0,706 | -0,682 |
| 4 | 0,85 | -0,315 |
| 5 | 1, | 0, |

Figura 8.61: Ajuste limitador UEL

| Number | Name | Min. | Max. | UNIDAD 1 | |
|--------|--------|------|------|-------------|------------|
| | | | | AVR 1 (v23) | AVR 2(v27) |
| 321 | lg.1 | 1.02 | 1.15 | 1.1 | 1.1 |
| 322 | tlg1 s | 60 | 4000 | 120 | 120 |

Figura 8.62: Ajuste limitador SCL

| Number | Name | Min. | Max. | UNIDAD 1 | |
|--------|-------------|------|------|-------------|------------|
| | | | | AVR 1 (v23) | AVR 2(v27) |
| 637 | SetLimlfMin | 0 | 1 | 0.22 | 0.22 |

Figura 8.63: Ajuste limitador MEL

| | Parameter |
|---|-----------|
| FVHz Umbral de activación [pu] | 0,992 |
| MaxSetUg Limite superior referencia de tensión [pu] | 1,09 |
| Tf Cte tiempo filtro de frecuencia [seg] | 1,1 |
| KVHz Ganancia VHz [pu/pu] | 1, |

Figura 8.64: Ajuste limitador V/Hz

| | Parameter |
|--|-----------|
| ifdb1 Corriente de campo base de generador [A] | 640, |
| ifdb2 Corriente de campo base de AVR [A] | 1310, |
| TaCoolF Cte. de tiempo de enfriamiento [seg] | 240, |
| kLim Ganancia proporcional OEL [pu] | 5, |
| If1 Corriente de pick-up [pu] | 1,1 |
| HeatFrpt Umbral inferior de reset [pu] | 0,05 |

Figura 8.65: Ajuste limitador OEL

8.11 Placa del transformador elevador

MADE IN INDIA BY
CG Power Systems
Transformer Division
MANDIDEEP ANDHRA PRADESH
A SUBSIDIARY OF



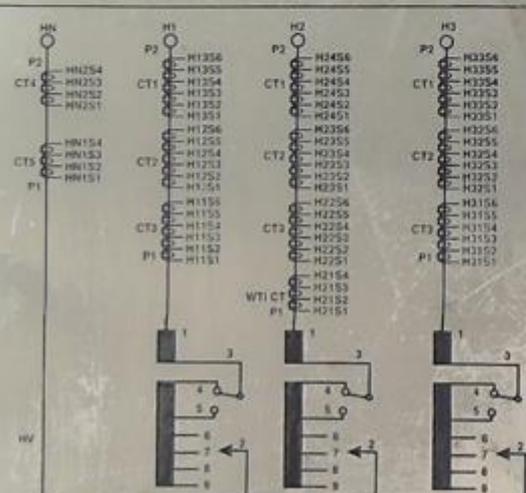
Crompton Greaves

TRANSFORMADOR
TO IEC-60076

| | | | |
|----------------------------------|--------------|---|------------------------|
| POTENCIA MVA | 11 | TIPO DE ENFRIAMIENTO | ONAN / ONAF |
| VOLTAJE DE AT (SIN CARGA) KV | 230.15 | CLASIFICACION DE MVA | 68.25 / 91 |
| VOLTAJE DE BT (SIN CARGA) KV | 13.8 | ELEVACION DE TEMP DE ACEITE GARANTIZADA °C | 50 |
| CORRIENTE DE LINEA EN AMPERES AT | 23.8-341.2 | ELEVACION DE TEMP DE ARROLLADO GARANTIZADA °C | 55 |
| CORRIENTE DE LINEA EN AMPERES BT | 2807.2 | SIMBOLO DE CONEXION | YNd1 |
| NUMERO DE FASES | 3 | PESO DE DESENCUBADO | kg 71200 |
| FRECUENCIA | 50 | TOTAL DE ACEITE | kg / Ltr 45100 / 51600 |
| W. O. NO DEL FABRICANTE | BE09390 | PESO TOTAL | kg 160200 |
| SERIAL DEL FABRICANTE | BE09390 / 1 | PIEZA MAS PESADA CON ACEITE | kg 128500 |
| NO DEL DISEÑO DEL DIAGRAMA | T62BH029124Q | PIEZA MAS PESADA SIN ACEITE | kg 51700 |
| MES / AÑO DE FABRICACION | 2006 | | |

PARA 220kV : LINE: LI 850 - AC 360 NEUTRAL : LI 650 - AC 140 / LI 110 - AC 34
PARA 154kV : LINE: LI 650 - AC 275 NEUTRAL : LI 450 - AC 140 / LI 110 - AC 34

REF DEL COMPRADOR (CLIENTE) PO NO.:- 709/090 - 07 - QCP - 0006 - 00; DATED:- 26 / 03 / 2007



| AT A TRAVES DE | | | BT A TRAVES DE | | |
|----------------|------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|
| | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| SWITCH POSN NO | AT VOLTIOS | AT AMPERES | EN CADA FASE EL SWITCH SE CONECTA | VOLTAJES DE IMPEDANCIAS EN MVA BASE | |
| 1 | 231000 | 222.7 | 2-9 | 3.65 % | |
| 2 | 225000 | 233.0 | 2-8 | | |
| 3 | 220000 | 250.0 | 2-7 | 10.53 % | |
| 4 | 214500 | 266.2 | 2-6 | | |
| 5 | 209000 | 282.4 | 2-5 | 10.01 % | |

| AT A TRAVES DE | | | BT A TRAVES DE | | |
|----------------|------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|
| | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| TAP POSN NO | AT VOLTIOS | AT AMPERES | EN CADA FASE EL SWITCH SE CONECTA | VOLTAJES DE IMPEDANCIAS EN MVA BASE | |
| 1 | 155000 | 318.4 | 2-9 | 0.42 % | |
| 2 | 159500 | 329.1 | 2-8 | | |
| 3 | 164000 | 341.2 | 2-7 | 9.02 % | |
| 4 | 168500 | 353.8 | 2-6 | | |
| 5 | 173000 | 367.4 | 2-5 | 8.88 % | |

Figura 8.66: Placa del transformador elevador (1/2)

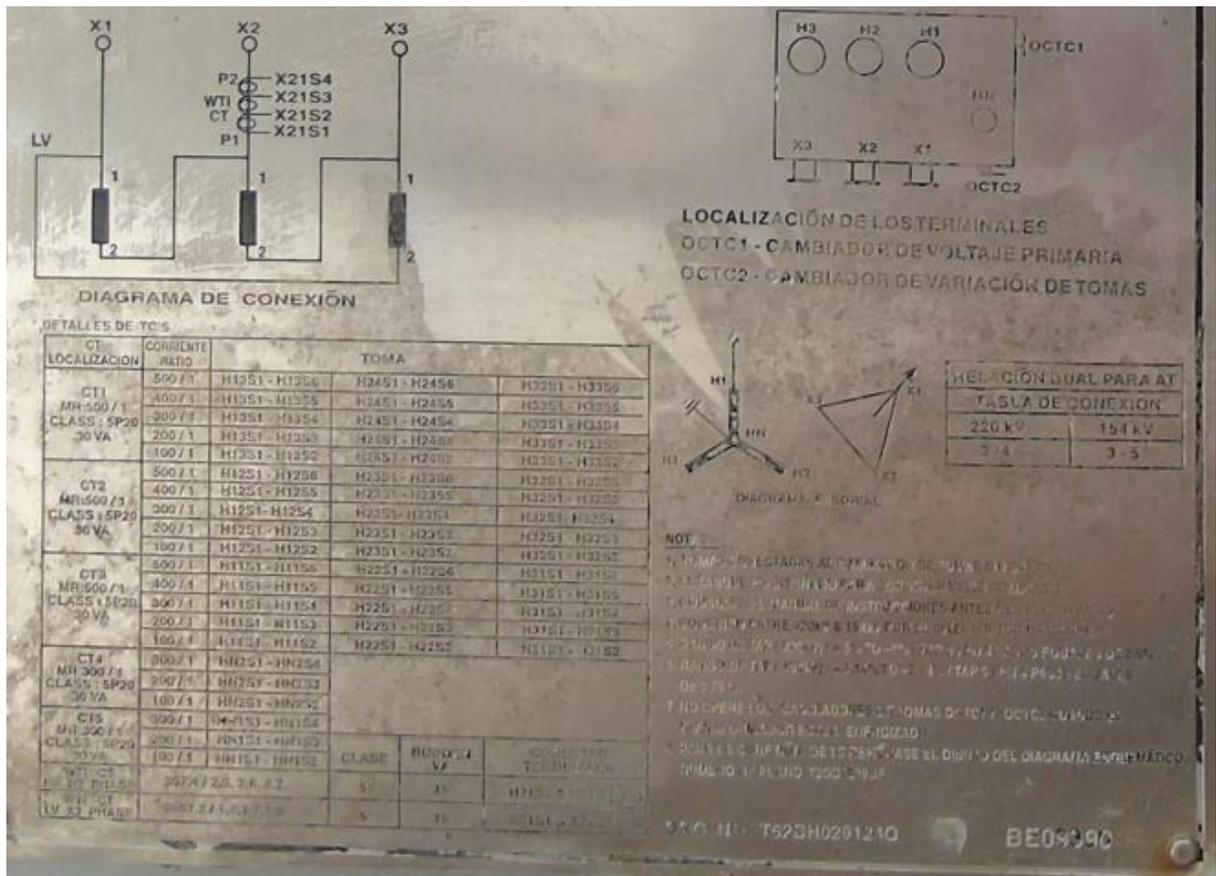


Figura 8.67: Placa del transformador elevador (2/2)

8.12 Placa del transformador de servicios auxiliares

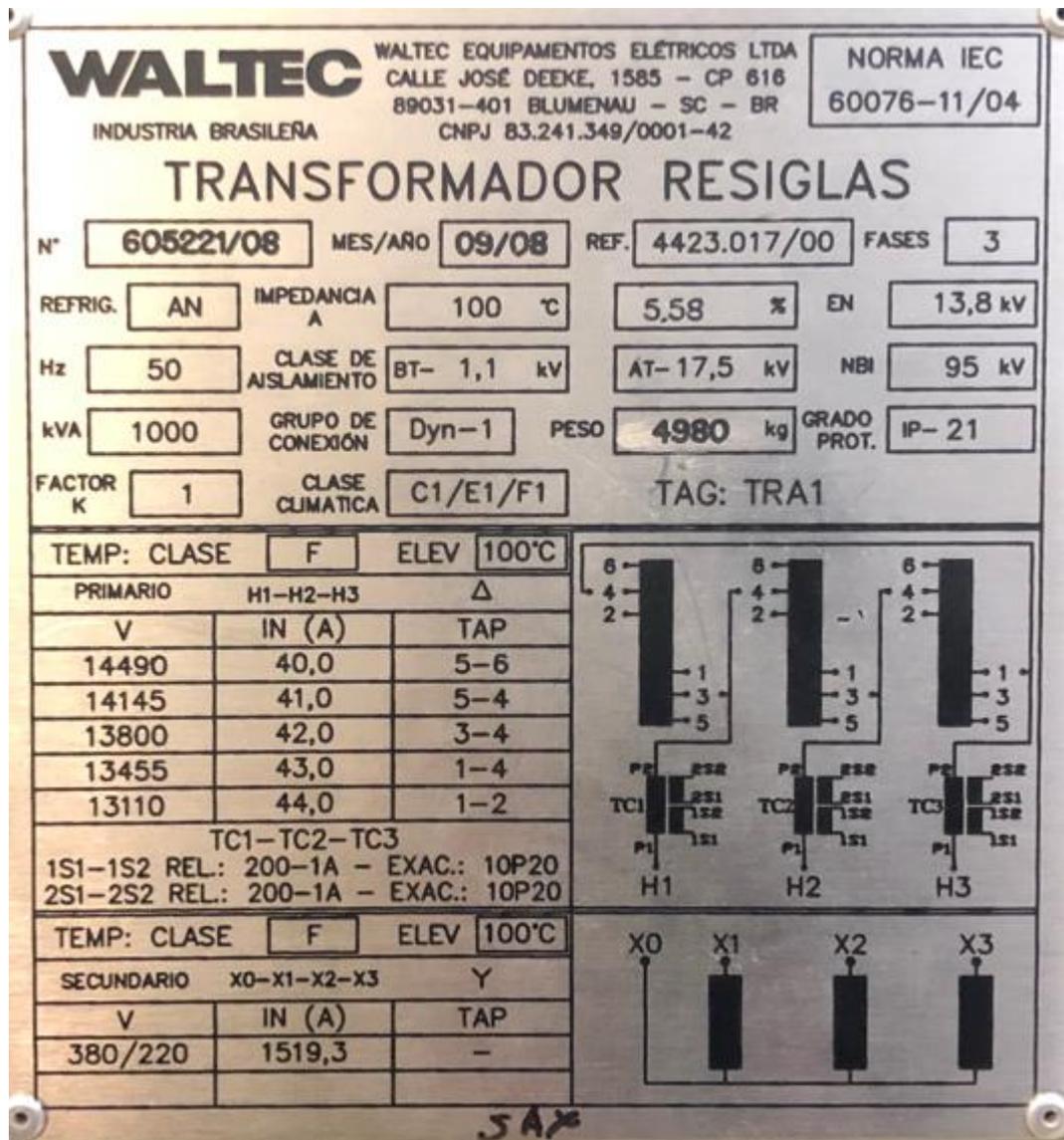


Figura 8.68: Placa del transformador de servicios auxiliares

8.13 Valores de mínimo técnico y potencia máxima certificados por el CEN

| Central⁽¹⁾ | Unidad | Mínimo Técnico [MW] |
|------------------------------|---------------|----------------------------|
| La Higuera | La Higuera 1 | 18,00 |
| La Higuera | La Higuera 2 | 18,00 |

Tabla 8.1: Mínimo técnico contemplado por el CEN

8.14 Archivos adjuntos entregados

Forman parte integral del presente informe los siguientes archivos que se entregan en forma adjunta:

- Registros de ensayos: “*EE-EN-2022-0354-RA_CH_La_Higuera_U1_Registros.zip*”

Todos los registros de ensayos del presente informe son entregados adjuntos en formato “*csv*”. Para correlacionar el nombre del archivo con la figura se debe considerar las siguientes tablas:

| Ensayos U1 – Control de Tensión | |
|---------------------------------|-------------|
| Nombre | Descripción |
| U1_FSNL_103 | Performance |
| U1_FSNL_003 | Techos |
| U1_FSNL_110 | V/Hz |
| U1_GEN_117 | UEL P5 |
| U1_GEN_110 | UEL P3 |
| U1_GEN_108 | UEL P1 |
| U1_GEN_102 | OEL P5 |
| U1_GEN_114 | OEL P3 |
| U1_GEN_107 | OEL P1 |

Tabla 8.2 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión

| Ensayos U1 – Curva PQ – 0.95 p.u. | |
|-----------------------------------|-------------|
| Nombre | Descripción |
| U1_GEN_136 | P4 Q3 |
| U1_GEN_134 | P4 Q6 |
| U1_GEN_202 | P2 Q2 |
| U1_GEN_144 | P2 Q7 |
| U1_GEN_203 | P1 Q1 |
| U1_GEN_211 | P1 Q8 |

Tabla 8.3 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 0.95 pu

| Ensayos U1 – Curva PQ – 1.00 p.u. | |
|-----------------------------------|-------------|
| Nombre | Descripción |
| U1_GEN_128 | P5 Q4 |
| U1_GEN_127 | P5 Q5 |
| U1_GEN_137 | P4 Q3 |
| U1_GEN_133 | P4 Q6 |
| U1_GEN_200 | P2 Q2 |
| U1_GEN_143 | P2 Q7 |
| U1_GEN_206 | P1 Q1 |
| U1_GEN_210 | P1 Q8 |

Tabla 8.4 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.00 pu

| Ensayos U1 – Curva PQ – 1.05 p.u. | |
|-----------------------------------|-------------|
| Nombre | Descripción |
| U1_GEN_010 | P5 Q4 |
| U1_GEN_126 | P5 Q5 |
| U1_GEN_008 | P4 Q3 |
| U1_GEN_131 | P4 Q6 |
| U1_GEN_003 | P2 Q2 |
| U1_GEN_141 | P2 Q7 |
| U1_GEN_002 | P1 Q1 |
| U1_GEN_208 | P1 Q8 |

Tabla 8.5 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.05 pu

| Ensayos U1 – CTF | |
|------------------|--|
| Nombre | Descripción |
| U1_GOV_002 | Subida de MT a Máximo – Tasa 27.3 MW/min |
| U1_GOV_202 | Subida de MT a Máximo – Tasa 54.6 MW/min |
| U1_GOV_204 | Subida de MT a Máximo – Tasa 5.46 MW/min |
| U1_GOV_001 | Bajada de Máximo a MT – Tasa -27.3 |
| U1_GOV_202 | Bajada de Máximo a MT – Tasa -54.6 |
| U1_GOV_204 | Bajada de Máximo a MT – Tasa -5.46 |
| U1_GOV_003 | CTF en frío |

Tabla 8.6 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control terciario de frecuencia

8.15 Acta de pruebas



ACTA DE PRUEBAS

| | | | |
|-------------------------|---|-----------|--|
| Fecha | 9/02/2022 | Empresa | Tinguiririca Energía |
| ID Proyecto | EE-2021-142 | Ubicación | San Fernando, Región Libertador Bernardo O'Higgins |
| Denominación Planta | Central Hidroeléctrica La Higuera U1 | | |
| Servicios por verificar | Servicios Complementarios: - Control de tensión (CT) - Control terciario de frecuencia en giro (CTFg) - Control terciario de frecuencia en frío (CTGf) | | |

Datos de la instalación

| | | | |
|---------------------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| Potencia aparente nominal [MVA] | 91 | Tipo de central | Hidroeléctrica de pasada |
| Tensión en POI nominal [kV] | 13.8 | Cantidad de unidades | 2 |
| Potencia activa máxima [MW] | 85.43 | Transformador elevador | 13.8/220 kV |
| Potencia activa mínima [MW] | 18 | - | - |

Responsables durante las pruebas

| | | |
|------------------------|---------------------|---|
| Coordinado | Cristopher López | Representante Tinguiririca Energía en las pruebas |
| Equipo Experto Técnico | Claudio Celman | Líder |
| | Iñaki Cubillos | Ingeniero de ensayos |
| | Fernando Montecinos | Ingeniero de ensayos |

Datos de las pruebas

| | |
|--------------------------------|--|
| Estado previo de la planta | Detenida |
| Inicio del período de pruebas | 7/02/2022 |
| Fin del período de pruebas | 9/02/2022 |
| Protocolo aplicable | EE-EN-2022-0019-RC_Procedimiento_Ensayos_SSCC_CH_La_Higuera_U1 |
| Posición de TAP trafo elevador | TAP N°3 (cambiador en vacío, por ende, posición fija) |

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| Firmas Aclaración/Empresa |  Christopher López Representante del Coordinado |  CLAUDIO CELMAN Representante del Experto Técnico |
|-------------------------------------|--|--|

Figura 8.69: Acta de Pruebas SSCC La Higuera U1 (1 de 5)

ESTUDIOS ELECTRICOS 
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Resumen de pruebas

SC Control de Tensión:

Se realizan pruebas en vacío en la unidad 1:

- Performance.
- Techos de excitación.
- Limitador de sobreflujo (V/Hz).

Se realizan pruebas dinámicas con la unidad conectada a la red:

- Pruebas del limitador Sobreexcitación (OEL) en 3 estados de carga.
- Pruebas del limitador Subexcitación (UEL/MEL) en 3 estados de carga.

Se realizan pruebas estáticas con la unidad conectada a la red:

- Puntos Curva PQ operable en 4 estados de carga.

SC Control de Frecuencia:

Se realizan pruebas de Control Terciario de Frecuencia en giro en la unidad 1:

- Toma de carga con tasa de toma de carga igual a 27.3MW/min.
- Toma de carga con tasa de toma de carga igual a 5.46MW/min.
- Toma de carga con tasa de toma de carga igual a 54.6MW/min.
- Bajada de carga con tasa de bajada de carga igual a -27.3MW/min.
- Bajada de carga con tasa de bajada de carga igual a -5.46MW/min.
- Bajada de carga con tasa de bajada de carga igual a -54.6MW/min.

Se realizan pruebas de Control Terciario de Frecuencia en frío en la unidad 1:

- Encendido de la unidad 1 y sincronización al sistema.
- Toma de carga hasta Mínimo Técnicos y mantener dicho despacho por 1 hora.

| | | |
|---|---|--|
| <p>Firmas Aclaración/Empresa</p> |  <p>Cristopher López Representante del Coordinado</p> |  <p>CLAUDIO CELMAN Representante del Experto Técnico</p> |
|---|---|--|

Figura 8.70: Acta de Pruebas SSCC La Higuera U1 (2 de 5)

ESTUDIOS ELECTRICOS 
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Observaciones/Desvíos del protocolo

SC Control de Tensión:

Curva PQ:

De acuerdo con el procedimiento se intenta probar los distintos niveles de tensión en bornes para cada uno de los estados de carga planteados. Se solicita constante colaboración al centro de despacho para bajar/subir tensión en la barra S/E Tinguiririca 154 kV. El centro de despacho logro hacer pequeños cambios de tensión en la barra, por lo que en ocasiones no se logró las condiciones de ensayo solicitadas. El procedimiento consideraba lograr mover la tensión en barra entre 0.93 pu y 1.07 pu de tensión en barra. Sin embargo, las fluctuaciones fueron entre 1.01 pu y 1.05 pu de tensión como máximo.

Debido a esto, no se logró medir todos los puntos en las condiciones exigidas en la Guía de Verificación.

Unidad 1:

Curva PQ en 0.95 pu:

| Subexcitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite UEL/MEL |
| P1=18.0 | 18.6 | -52.7 | 0.96 | 1.02 | Si |
| P2=40.5 | 40.3 | -61.7 | 0.95 | 1.02 | Si |
| P4=63.0 | 58.16 | -66.6 | 0.95 | 1.03 | Si |
| P5=85.4 | - | - | - | - | - |

Limitación: Para 3 estados de carga se logró la actuación del límite UEL/MEL.

| Sobrexcitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite OEL |
| P1=18.0 | 20.4 | -34.9 | 0.99 | 1.02 | No |
| P2=40.5 | 45.2 | -31.9 | 0.99 | 1.02 | No |
| P4=63.0 | 59.2 | -31.6 | 0.99 | 1.02 | No |
| P5=85.4 | - | - | - | - | - |

Limitación: No se alcanza el punto objetivo ya que al subir tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo.

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| Firmas Aclaración/Empresa |  Christopher López Representante del Coordinado |  CLAUDIO CELMAN Representante del Experto Técnico |
|-------------------------------------|--|--|

Figura 8.71: Acta de Pruebas SSCC La Higuera U1 (3 de 5)

ESTUDIOS ELECTRICOS 
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Curva PQ en 1.00 pu:

| Subexcitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite UEL/MEL |
| P1=18.0 | 19.13 | -56.4 | 0.98 | 1.05 | Si |
| P2=40.5 | 37.8 | -66.2 | 0.97 | 1.04 | Si |
| P4=63.0 | 63.7 | -63.4 | 0.96 | 1.03 | Si |
| P5=85.4 | 85.9 | -9.4 | 1.01 | 1.02 | Si |

Limitación: Para todos los estados de carga se logró la actuación del límite UEL/MEL.

| Sobrexitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite OEL |
| P1=18.0 | 20.5 | 7.2 | 1.04 | 1.03 | No |
| P2=40.5 | 43.8 | 7.5 | 1.04 | 1.03 | No |
| P4=63.0 | 60.4 | 5.9 | 1.04 | 1.03 | No |
| P5=85.4 | 86.1 | 5.5 | 1.04 | 1.03 | No |

Limitación: No se alcanza el punto objetivo ya que al subir tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo.

Curva PQ en 1.05 pu:

| Subexcitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite UEL/MEL |
| P1=18.0 | 13.6 | -41.7 | 1.01 | 1.05 | No |
| P2=40.5 | 38.8 | -33.9 | 1.01 | 1.02 | No |
| P4=63.0 | 63.7 | -28.9 | 1.01 | 1.04 | No |
| P5=85.4 | 85.5 | -9.8 | 1.03 | 1.04 | Si |

Limitación: Se logra actuación de UEL en P5. Para el resto de los niveles de carga no se alcanza el punto objetivo ya que al bajar tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo.

| Sobrexitación | | | | | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|
| Estado de carga [MW] | Potencia activa [MW] | Potencia reactiva [MVar] | Tensión en bornes [pu] | Tensión en Barra 220 kV [pu] | Actuación Límite OEL |
| P1=18.0 | 17.2 | 34.1 | 1.07 | 1.03 | No |
| P2=40.5 | 39.3 | 31.2 | 1.07 | 1.04 | No |
| P4=63.0 | 64.1 | 33.8 | 1.07 | 1.03 | No |
| P5=85.4 | 84.0 | 18.6 | 1.07 | 1.01 | No |

Limitación: Próximos a la actuación de protección de sobreflujo (V/Hz) en 1.08 p.u./p.u.

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| Firmas Aclaración/Empresa |  Christopher López Representante del Coordinado |  CLAUDIO CELMAN Representante del Experto Técnico |
|-------------------------------------|--|--|

Figura 8.72: Acta de Pruebas SSCC La Higuera U1 (4 de 5)

ESTUDIOS ELECTRICOS 
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

SC Control de Frecuencia:

Control Terciario de Frecuencia en giro:

- Sin desvíos

Control Terciario de Frecuencia en frío:

- Sin desvíos

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| Firmas Aclaración/Empresa |  Christopher López Representante del Coordinado |  CLAUDIO CELMAN Representante del Experto Técnico |
|-------------------------------------|--|--|

Figura 8.73: Acta de Pruebas SSCC La Higuera U1 (4 de 5)

8.16 Certificado de calibración de equipamiento utilizado

| CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN | | |
|---|-----------------|--------------------|
|  | | |
| ESTUDIOS ELECTRICOS | | |
| Estudios Electricos declara que el instrumento: | | |
| Instrumento | Número de serie | Última calibración |
| Adquisidor Cirion 16CH | EE-EQ-2010-0244 | 20/08/2021 |
| <p>Fue calibrado siguiendo los lineamientos establecidos en el procedimiento EE-MP-2009-156_05 Control de Equipos habiéndose encontrado conforme y quedando habilitado para su uso.</p> <p>Para la calibración se emplearon los siguientes instrumentos patrón:</p> | | |
| Instrumento | Número de Serie | Última Calibración |
| Valija de Inyección FREJA 300 | 4501345 | 04/05/2020 |

Fecha de evaluación: 20/08/21
Certificado número: EE-CI-2021-1562

Nombre Inspector: Leiss, Jorge

Firma:



Power System Studies & Power Plant Field Testing and
Electrical Commissioning

Figura 8.74: Certificado de calibración de equipo de medición

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.