

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Colbún S.A
Chile
C.T. Santa María
Informe Final de Ensayos - Control de
Tensión



CÓDIGO DE PROYECTO	EE-2021-023
CÓDIGO DE INFORME	EE-EN-2023-1399
REVISIÓN	D

5 sep. 25



Este documento **EE-EN-2023-1399-RD** fue preparado para Colbún S.A por el Grupo Estudios Eléctricos.

Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

Ing. Claudio Celman
Sub-Gerente Dpto. Ensayos
claudio.celman@estudios-electricos.com

Ing. Andrés Capalbo
Sub-Gerente Dpto. Ensayos
andres.capalbo@estudios-electricos.com

Ing. Pablo Rifrani
Gerente Dpto. Ensayos
pablo.rifrani@estudios-electricos.com

Informe realizado en colaboración con todas las empresas del grupo: **Estudios Eléctricos S.A., Estudios Eléctricos Chile, Estudios Eléctricos Colombia y Electrical Studies Corp.**

Este documento contiene 115 páginas y ha sido guardado por última vez el 05/09/2025 por Federico García; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	21.11.2023	Para presentar.	FG	AC	PR
B	3.1.2024	Corrección según observaciones del cliente	GE	AC	PR
C	11.7.2024	Corrección según observaciones del Coordinador	FG	GE	PR
D	5.9.2025	Se actualizan ensayos en vacío (FSNL) según observaciones del cliente	FG	CiC	AC

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



1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Descripción de los participantes	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
3	PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS	11
3.1	Procedimiento de pruebas	11
3.2	Uso de registros de ensayos previos	11
3.3	Instrumental utilizado para la adquisición de datos	12
3.4	Registro de señales con equipos de planta	13
3.5	Metodología general de los ensayos	14
3.5.1	Control de tensión	14
4	EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN	15
4.1	Ensayos con la unidad en vacío (FSNL)	16
4.1.1	Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión	16
4.1.2	Determinación de los techos de excitación	17
4.1.3	Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobreflujo	19
4.2	Ensayos con la unidad conectada a la red	20
4.2.1	Respuesta del sistema de excitación con la actuación del limitador de subexcitación	20
4.2.2	Respuesta del sistema de excitación con actuación del limitador de sobreexcitación	23
4.3	Análisis resultados pruebas dinámicas	27
4.3.1	Prueba con la unidad en vacío	27
4.3.2	Pruebas con la unidad conectada a la red	28
5	ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA PQ TEÓRICO MÁXIMO	29
5.1	Puntos operativos alcanzados	30
5.1.1	Análisis	36
5.2	Curvas de capacidad	38
5.2.1	Diagrama PQ de la unidad	39
5.2.2	Resumen de valores a informar	44



5.2.3	Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.90 pu	45
5.2.4	Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.95 pu	46
5.2.5	Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.0 pu	47
5.2.1	Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.05 pu	48
5.2.1	Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.10 pu	49
6	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	50
7	ANEXOS	51
7.1	Verificación de curvas de capacidad en diferentes niveles de tensión	51
7.1.1	Verificación curva PQ @ 0.90 pu	51
7.1.2	Verificación curva PQ @ 0.95 pu	60
7.1.3	Verificación curva PQ @ 1.0 pu	69
7.1.4	Verificación curva PQ @ 1.05 pu	78
7.1.5	Verificación curva PQ @ 1.10 pu	87
7.2	Datos del generador	96
7.3	Datos de la turbina	97
7.4	Curva de capacidad del generador	98
7.5	Protecciones del generador	99
7.6	Diagrama de bloques del regulador de tensión	102
7.7	Criterio de ajuste de limitadores según el fabricante	104
7.8	Valores de mínimo técnico y potencia máxima	106
7.9	Archivos adjuntos entregados	107
7.10	Acta de pruebas SSSC CT Santa María	110
7.11	Certificado de calibración del equipamiento utilizado	114



1 INTRODUCCIÓN

El presente documento resume los resultados del proceso de Verificación de Servicios Complementarios (SSCC) de la **Central Térmica Santa María**. En el mismo se incluye el servicio de **Control de Tensión (CT)** 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 el procedimiento elaborado por Estudios Eléctricos S.A. según el documento ***"EE-EN-2023-0886-RA-Procedimiento_Ensayos_SSCC_Control_Tension_Frecuencia_CT_Santa_María"*** y aprobado por el Coordinador Eléctrico Nacional.

La verificación del SSCC de CT se complementa con el informe de curvas PQ teóricas máximas de la unidad emitido en la etapa de análisis preliminar previo al desarrollo del procedimiento de ensayos, según el documento ***"EE-EN-2023-0689-RA-Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CT_Santa_María"***.

Sin embargo, como se verá más adelante (capítulo 5) se detectó un error en el trazado de la curva PQ teórica. En base a lo anterior, se consideró en este informe la curva PQ corregida.

En la última actualización de Guía de Verificación de Servicios Complementarios Control de Tensión (Julio 2025) se indica que, para centrales consideradas existentes, se podrán utilizar registros de ensayos realizados en el contexto de la validación del modelo dinámico de la instalación, siempre que se justifique que la dinámica del control de la planta sigue siendo válida a la fecha.

Durante los meses de septiembre y octubre de 2013, se realizaron las pruebas en el contexto del proceso de "Validación de Modelos Dinámicos" (VMD). Debido a que varias de las pruebas realizadas durante los procesos mencionados resultan similares a las pruebas solicitadas en la Norma Técnica de Servicios Complementarios vigente, Colbún propone para este proceso de verificación reutilizar los ensayos correspondientes a la evaluación de la respuesta del sistema de control de tensión para la unidad operando en vacío (FSNL) realizados en el contexto del proceso de "Validación de Modelos Dinámicos" (VMD) de la central y presentados en el documento ***"EE-EN-2013-0699-RA-Informe_de_Homologacio_Santa_María"***.

La **C.T. Santa María**, ubicada en la Región del Bío-Bío se compone de un generador sincrónico, marca General Electric modelo GE 270t771 de 397.8 MVA de potencia aparente nominal, impulsado por una turbina de vapor, marca General Electric modelo GE D5.



El **regulador de tensión** (AVR) de la unidad es marca General Electric modelo EX2100, completamente digital. Los reguladores operan en modo "**control de tensión**" cuando la unidad está sincronizada con el Sistema, el cual es el modo de operación normal del regulador.

El **regulador de velocidad** (GOV) es marca General Electric modelo MARK VI, completamente digital. En operación normal, la regulación primaria de frecuencia de la unidad se habilita cuando el control de turbina/caldera opera "control coordinado" y el regulador de velocidad Mark VI opera en control de carga.

La unidad se vincula al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) mediante un transformador elevador de relación 18 kV / (230 Kv $\pm$ 2 x 2.5%) de potencia nominal 490 MVA (ONAF).



1.1 Descripción de los participantes

Empresa	Personal	Cargo
Estudios Eléctricos	Andrés Capalbo	Experto Técnico
Estudios Eléctricos	Federico Garcia	
Colbún	Julián Larrea	Ingeniero Especialista
Colbún	Roberto Martínez Godoy	Jefe de Turno central Santa María
Colbún	José Poblete Pérez	Operador central Santa María

Tabla 1.1 – Personal Participante

Las pruebas se llevaron a cabo entre los días 25 a 29 de septiembre de 2023.



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
GOV	Regulador de velocidad
V/Hz	Limitador de sobre-flujo
OEL	Limitador de sobreexcitación
UEL	Limitador de subexcitación
CEN	Coordinador Eléctrico Nacional
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SSCC	Servicios Complementarios
NTSSCC	Norma Técnica de Servicios Complementarios.
TC	Transformador de Corriente
TP	Transformador de potencial
Pmax	Potencia activa bruta máxima de la unidad (374 MW)
Pmin	Potencia activa bruta correspondiente al mínimo técnico de la unidad (178 MW)
Trate	Potencia base bruta de turbina (369,9 MW)
TA	Technical Assistant
P1_CT	Despacho de la unidad a mínimo técnico (Pmin)
P2_CT	Despacho de la unidad a $(P_{max} + 2 \cdot P_{min}) / 3$
P3_CT	Despacho de la unidad a $(P_{max} + P_{min}) / 2$
P4_CT	Despacho de la unidad a $(2 \cdot P_{max} + P_{min}) / 3$
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 (NTSSCC), 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:

a) 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.



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 Térmica Santa María TV detallado en el informe de curvas PQ teórico máximo de la unidad según el documento *“EE-EN-2023-0689-RA-Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CT_Santa_María”*.

El procedimiento de pruebas se informa en el documento técnico *“EE-EN-2023-0886-RA-Procedimiento_Ensayos_SSCC_Control_Tension_Frecuencia_CT_Santa_María”*.

Ambos documentos fueron elaborados por Estudios Eléctricos S.A. y aprobados por el Coordinador Eléctrico Nacional. En dichos documentos se analiza la factibilidad de llegar a los límites de subexcitación y sobreexcitación de la unidad y se define el plan de trabajo.

Las pruebas realizadas en la **unidad TV** de la **Central Térmica Santa María** se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos ya mencionados. 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 Uso de registros de ensayos previos

Tal como se comentó en la sección 1, para la verificación de SSCC de Control de Tensión se analizaron un conjunto de ensayos realizados previamente durante el proceso de validación de proceso dinámicos de la unidad. Dichos ensayos se describen en la Tabla 3.1:

<i>Pruebas en vacío</i>	<i>Homologable para SSCC CT</i>	<i>Acción</i>
Respuesta temporal del lazo de regulación de tensión	Homologable	Se utilizan registros de ensayos de proceso VMD
Techos de excitación	Homologable	Se utilizan registros de ensayos de proceso VMD
Limitador de sobreflujo (V/Hz)	Homologable	Se utilizan registros de ensayos de proceso VMD

Tabla 3.1 – Detalle de pruebas en vacío

Por ende, los ensayos presentados en el capítulo 4.1 corresponden a los registros utilizados en el proceso de “Validación de Modelos Dinámicos” (VMD). Estos ensayos pueden ser consultados en el documento *“EE-EN-2023-0699-RA-Informe_de_Homologacio_Santa_María”*, correspondiente al informe de validación de modelos dinámicos de la unidad.

3.3 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 3.2.

Denominación	Canales	Tasa de muestreo	Bits de resolución	N serie	Certificado de calibración
Adquisidor de datos	16	0.1 – 10 kHz	16 bits	EEEQ20150794	Ver Anexo 7.11

Tabla 3.2 - Característica de los equipos de adquisición

Se mide tensión (punto de conexión, bornera 52 y 62) y corriente en terminales (punto de conexión, bornera 72) del generador, y adicionalmente tensión (punto de conexión, borneras 12 y 22) y corriente de excitación (punto de conexión, borneras 32 y 42, shunt 4000 A / 100 mV). El adquisidor calcula indirectamente la potencia activa y reactiva en bornes, y la frecuencia eléctrica. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.1.

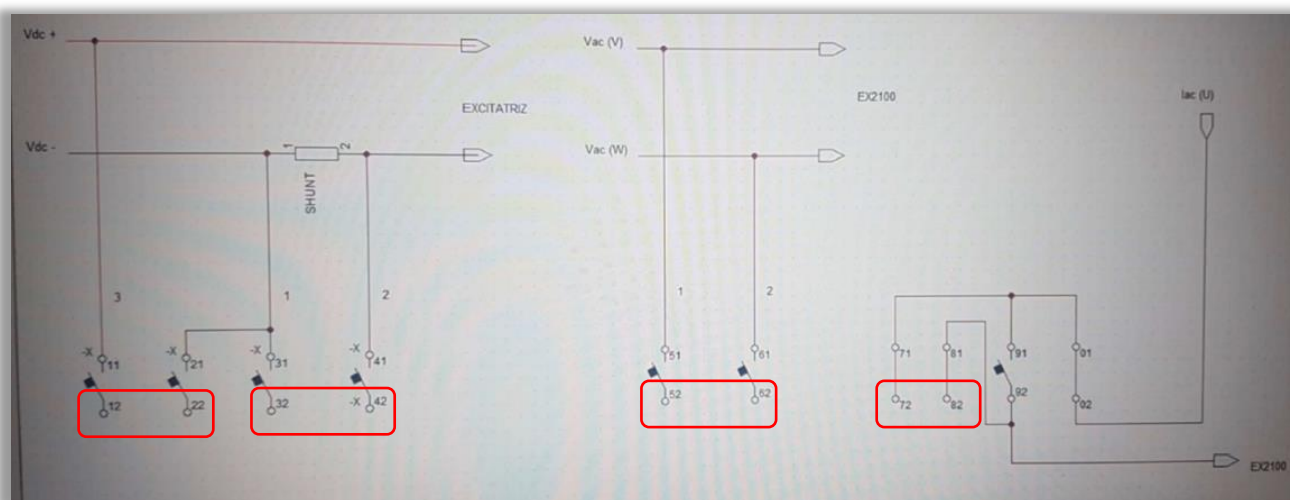


Figura 3.1 - Puntos de conexión de tensión, corriente de terminales, de tensión y corriente de campo en la unidad



3.4 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 320 ms. Los registros son exportados en formato .csv.

Las señales registradas fueron:

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. Frecuencia eléctrica.
6. Posición de válvulas.
7. Velocidad.
8. Valor de estatismo.



3.5 Metodología general de los ensayos

3.5.1 Control de tensión

Para realizar los ensayos correspondientes al control de tensión, se realizan escalones en la referencia de tensión de la unidad. Lo anterior se logra mediante la interfaz de control del AVR. En la Figura 3.2 se puede apreciar la pantalla "BodeIL" de la interfaz de control del AVR GE EX2100.

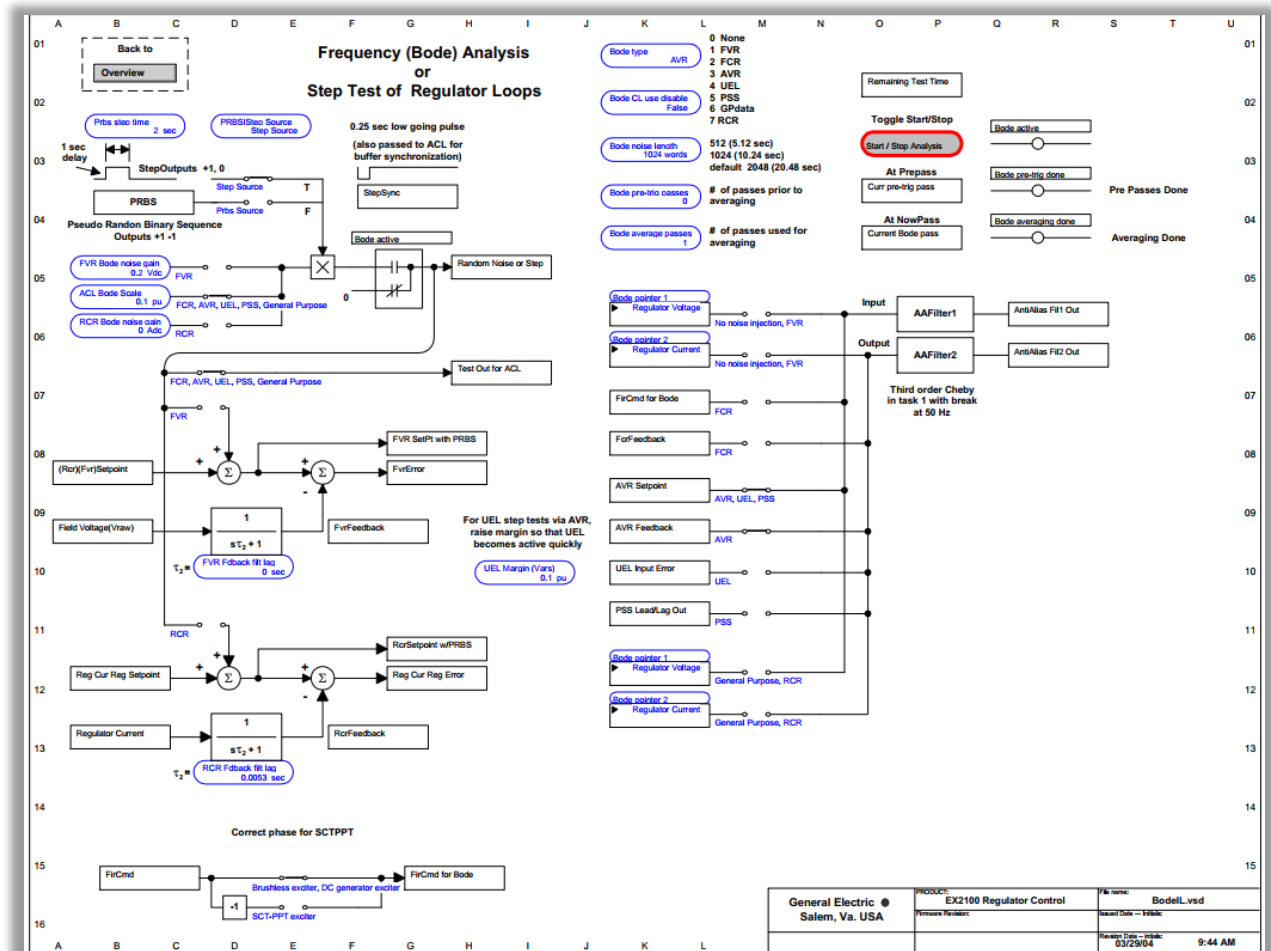


Figura 3.2 - Interfaz de control del AVR



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	178.0
P3_CT	276.0
P5_CT	374.0

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 y sobreexcitación. La Tabla 4.2 y Tabla 4.3 resumen los ensayos realizados en la unidad.

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

Tabla 4.2 – Ensayos vacío según guía de verificación

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 - Estados de carga ensayados



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. 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 en el artículo 3-12 de la NTSyCS. Para ello se aplica un escalón de 5% en la referencia de tensión del AVR de la unidad.

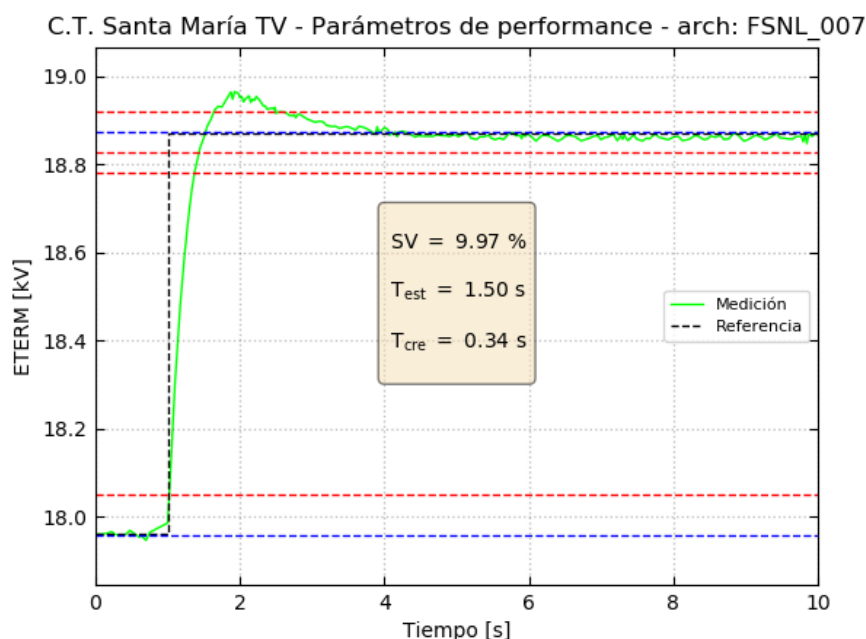


Figura 4.1 – Parámetros de performance – $ETERM_o = 1$ pu – Step = 5%

¹ La tensión nominal de terminales de la unidad es de 18 kV.



Parámetros	Valor Medido	Requerimiento Normativo
Sobreoscilación	9.97%	< 15%
Tiempo de crecimiento	340 ms	< 400 ms
Tiempo de establecimiento	1.5 seg	< 1.5 seg
Error estacionario ²	0%	< 0.25%

Tabla 4.4 – Ensayos vacío según guía de Análisis de requerimiento establecidos por NTSyCS

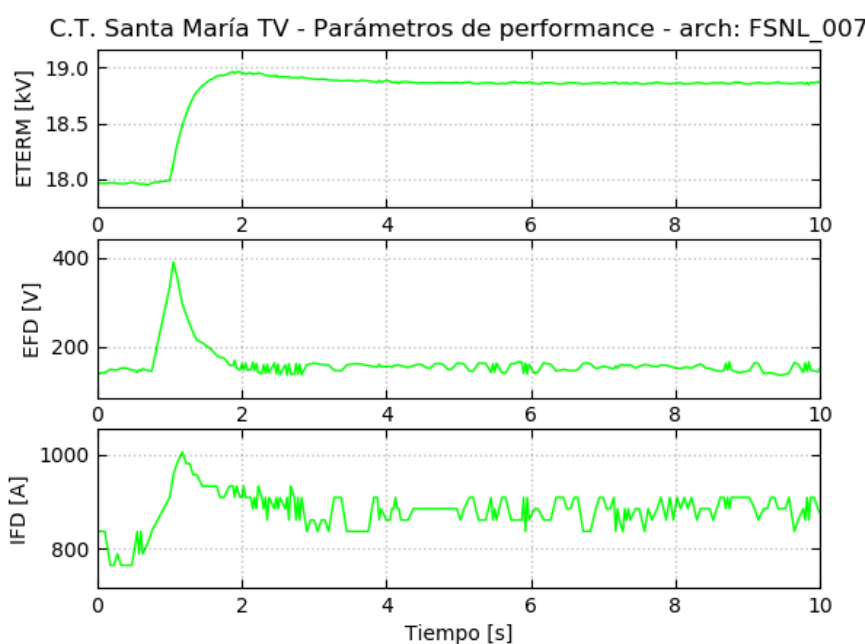


Figura 4.2 – Respuesta en vacío – $E_{TERMo} = 1 pu$ – Step = 5%

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 15% 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.

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 normativa.

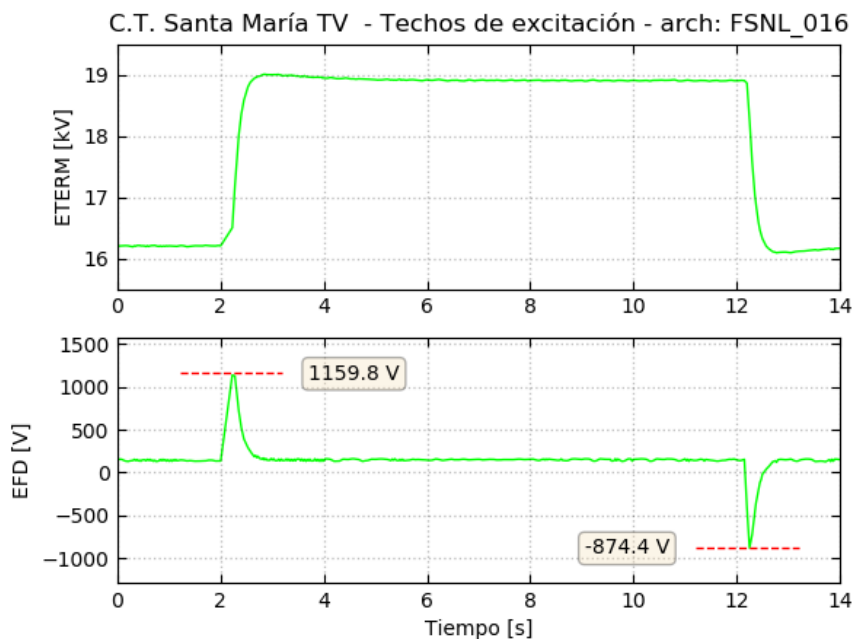


Figura 4.3 – Techos de excitación – $ETERM_o = 0.9 \text{ pu}$ – Step = 15%

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

Parámetros	Valor Medido
Techo positivo	1159.8 V
Techo negativo	-874.4 V

Tabla 4.5 – Techos de excitación

El valor de techo obtenido mediante ensayos está en línea con lo esperado en este tipo de excitación.

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

El limitador establece una máxima referencia de tensión en base a la frecuencia medida, dicho valor de referencia se encuentra en un valor de 1.09 p.u. en condiciones de frecuencia nominal, como se muestra en la Figura 7.94. Para frecuencias menores a 50 Hz, la referencia máxima de tensión comienza a disminuir gradualmente. Con el fin de evidenciar la actuación del limitador, se hace necesario disminuir su seteo original como se muestra en la Tabla 4.6.

Parámetro	Valor original	Valor transitorio
Auto V/Hz limit	1.09 p.u.	1.03 p.u.

Tabla 4.6 – Ajuste del limitador V/Hz

En la Figura 4.4 se muestra la respuesta del limitador V/Hz ante un escalón del 5% en la referencia de tensión de la unidad. La línea roja segmentada representa el escalón del 5% y se visualiza que el limitador actúa en el valor parametrizado de 1.03 p.u.

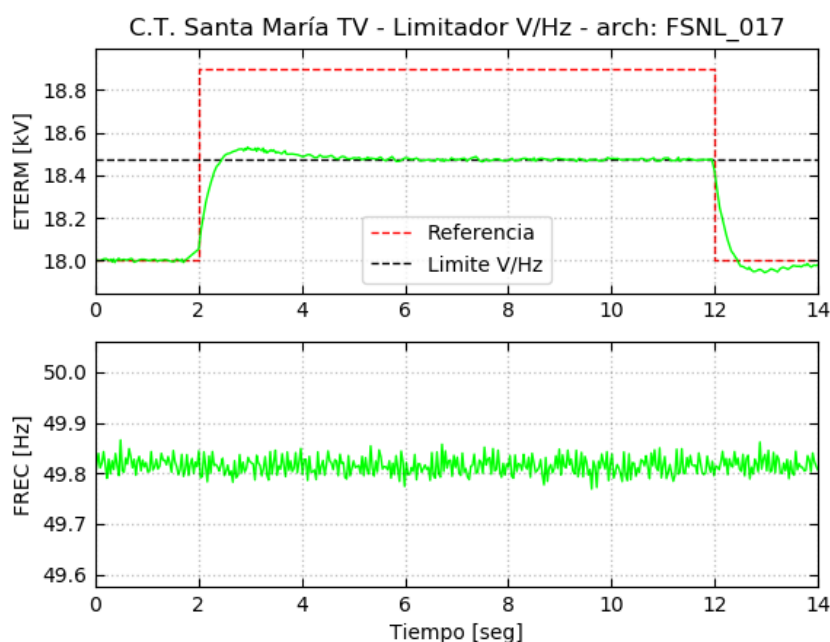


Figura 4.4 – Respuesta del limitador V/Hz– $ETERM_o = 1 pu$ – Step = 5%



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 la 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 3 niveles distintos de potencia activa (P1_CT, P3_CT y P5_CT).

Durante el desarrollo de los ensayos, las condiciones del Sistema no permiten realizar la prueba con ajuste permanente, por lo que se utiliza un ajuste transitorio tal que produzca la activación del limitador a valores de menor absorción de reactivos. Por ende, se modifica transitoriamente el valor de actuación del límite UEL mediante un offset en la variable **UEL margin (Vars)** (ver Figura 7.91) para que actúe frente a un escalón en la referencia de tensión del -3%.

<i>Despacho</i>	<i>Ajuste permanente</i>	<i>Ajuste transitorio</i>
P1	0.1 p.u.	0.15 p.u.
P3	0.1 p.u.	0.15 p.u.
P5	0.1 p.u.	0.15 p.u.

Tabla 4.7 – Ajuste del limitador UEL

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 = 178 MW

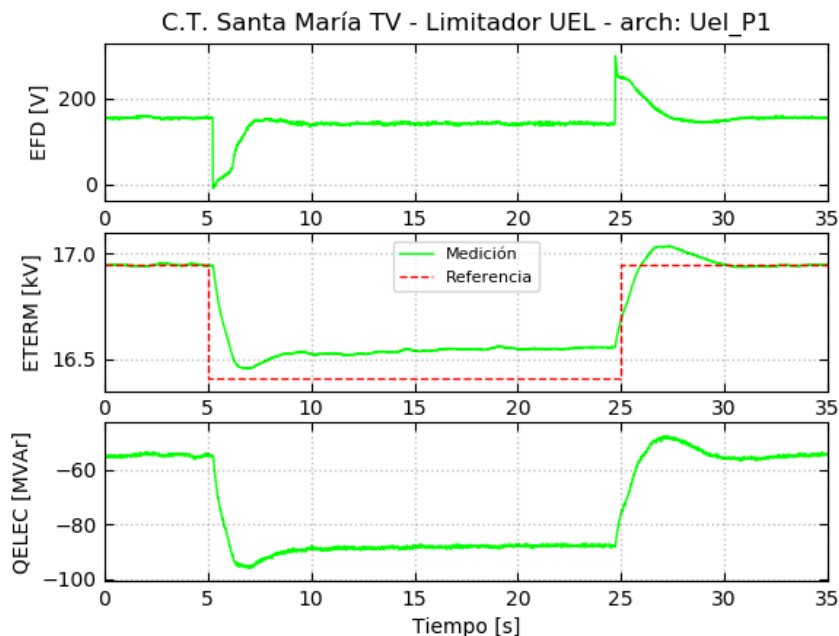


Figura 4.5 – Respuesta limitador UEL – $ETERMo = 0.942 \text{ pu}$ – Step = -3%

P3 CT = 276 MW

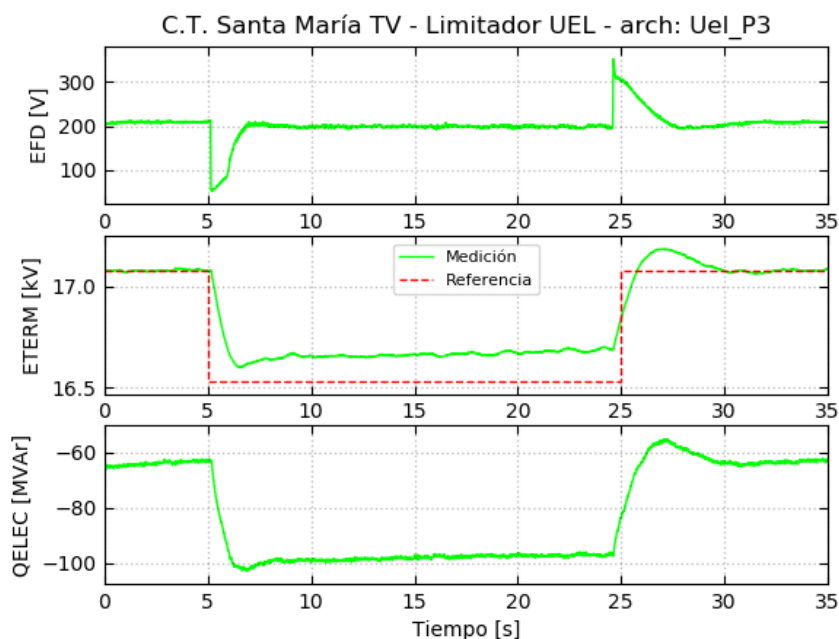


Figura 4.6 – Respuesta limitador UEL – $ETERMo = 0.949 \text{ pu}$ – Step = -3%



P5 CT = 374 MW

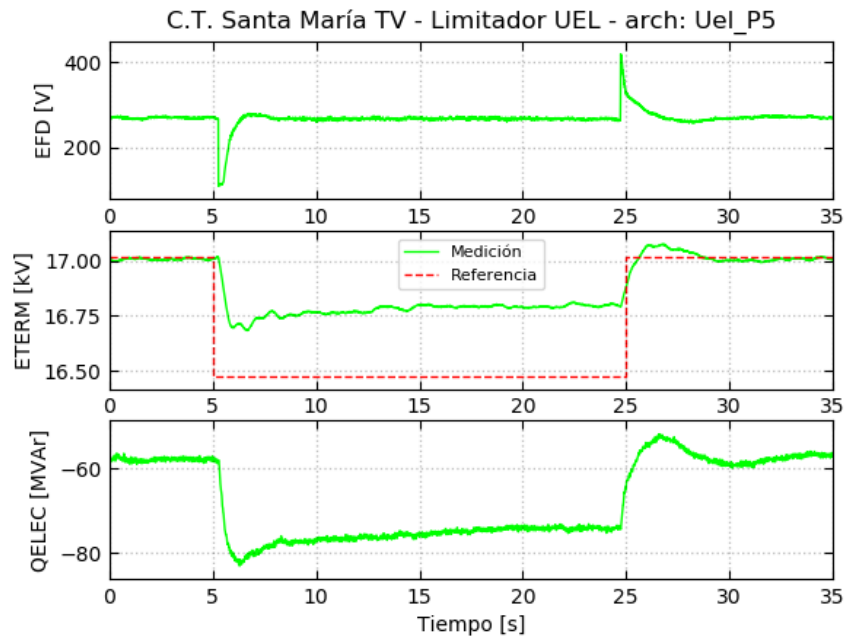


Figura 4.7 – Respuesta limitador UEL – $ETERMo = 0.945 pu$ – Step = -3%

Se observa un control rápido y estable que limita efectivamente la potencia reactiva generada. Por otra parte, si bien el ensayo se realizó a seteos reducidos, del análisis de curva PQ y protecciones del Capítulo 5 se puede concluir que este limitador tiene una adecuada coordinación con la protección de mínima excitación (40G).



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

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

Al momento de los ensayos, el Sistema presenta imposibilidad de 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 siguiente tabla:

<i>Parámetro</i>	<i>Ajuste original</i>	<i>Ajuste transitorio P1</i>	<i>Ajuste transitorio P3</i>	<i>Ajuste transitorio P5</i>
FcrRefLo (Limitación)	2444.0 A	1370 A	1500 A	1700 A
OE_PU	2492.88 A	1397.4 A	1530 A	1734 A
OE_Inf	2590.64 A	1452.2 A	1590 A	1802 A
OE_TripLev	2737.28 A	1534.4 A	1680 A	1904 A

Tabla 4.8 – Ajustes del limitador OEL temporizado

En la Figura 4.8, Figura 4.10 y Figura 4.12 se muestra la respuesta del limitador OEL temporizado mediante un aumento escalonado en la referencia de tensión de la unidad. Una vez alcanzado se espera el tiempo necesario para que el limitador OEL actúe. El valor de la corriente de campo a la cual limita se encuentra representado con una línea roja segmentada en la Figura 4.9, Figura 4.11 y Figura 4.13.



P1 CT = 178 MW

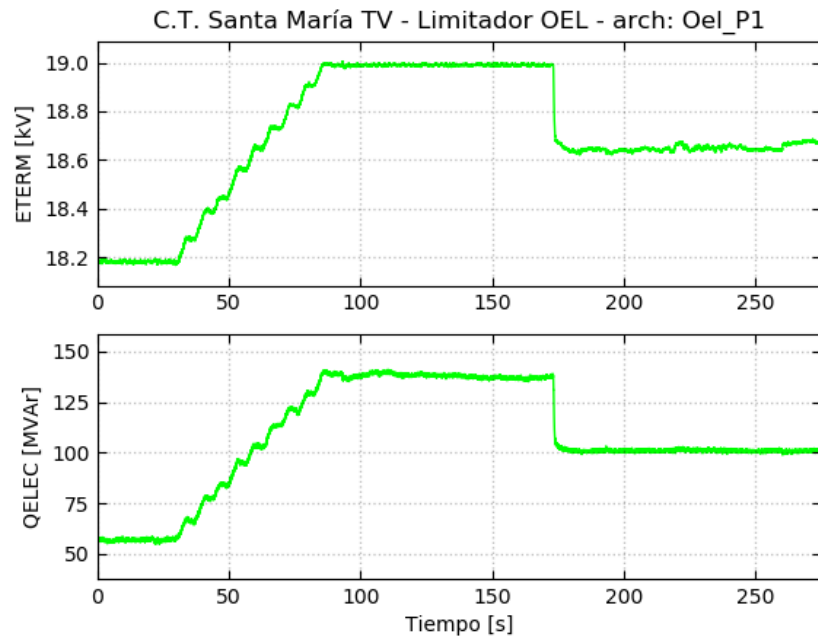


Figura 4.8 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.01 pu$

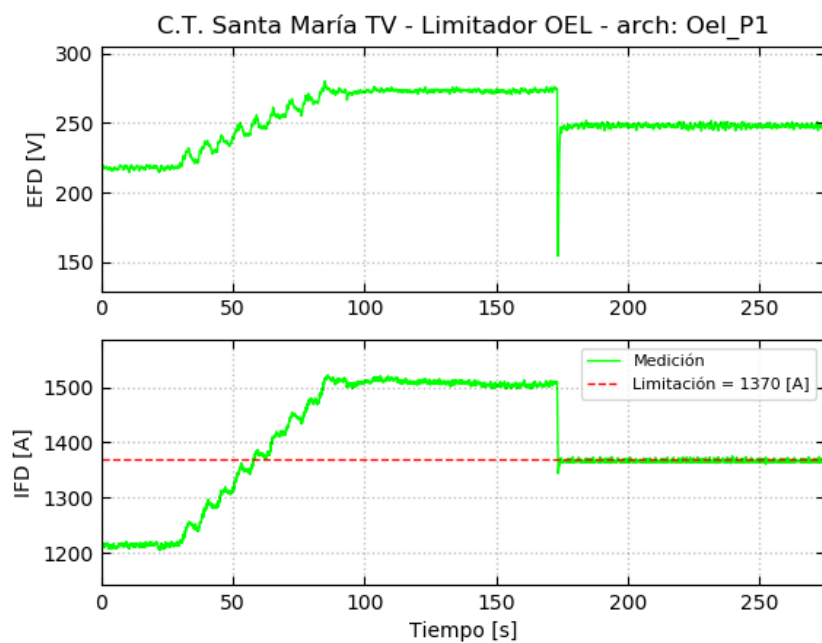


Figura 4.9 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.01 pu$



P3 CT = 276 MW

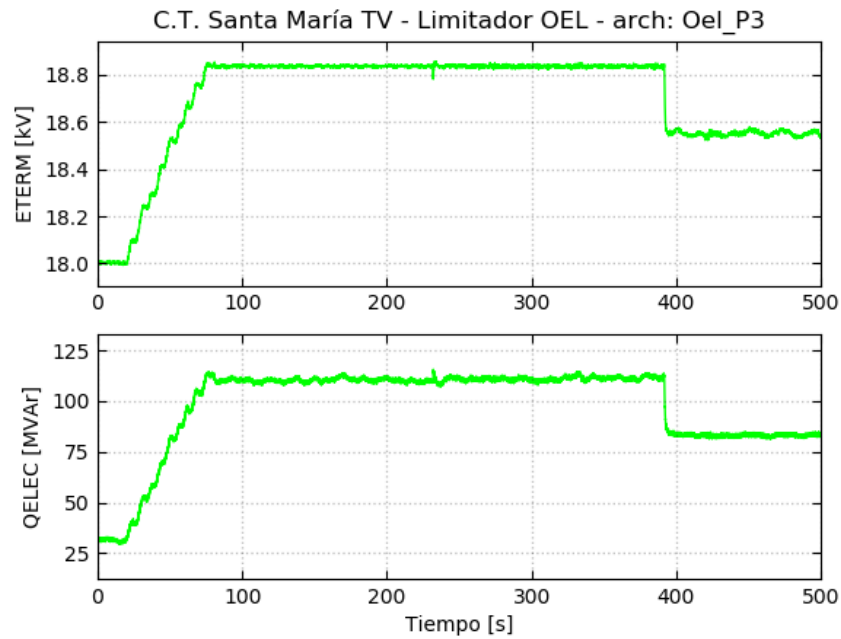


Figura 4.10 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.0 pu$

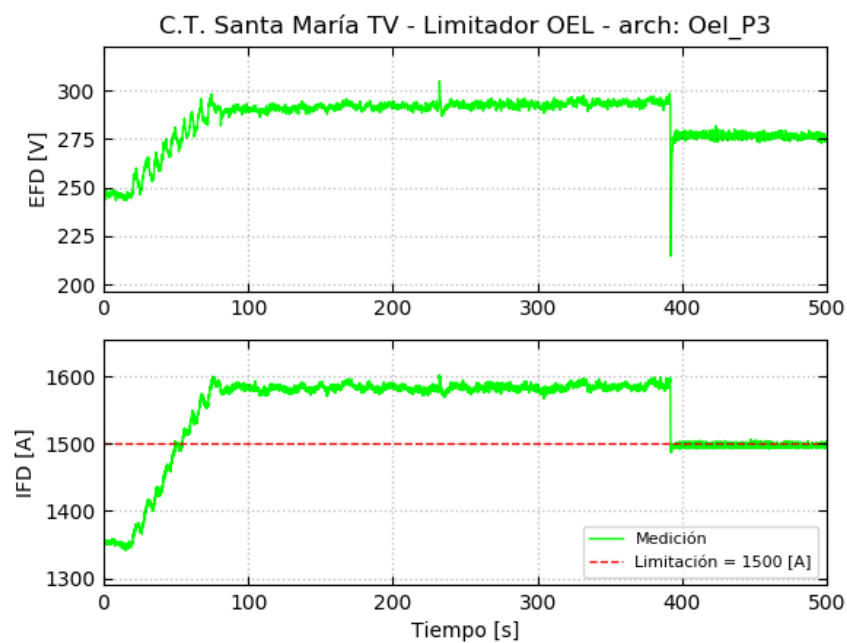


Figura 4.11 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.0 pu$



P5 CT = 374 MW

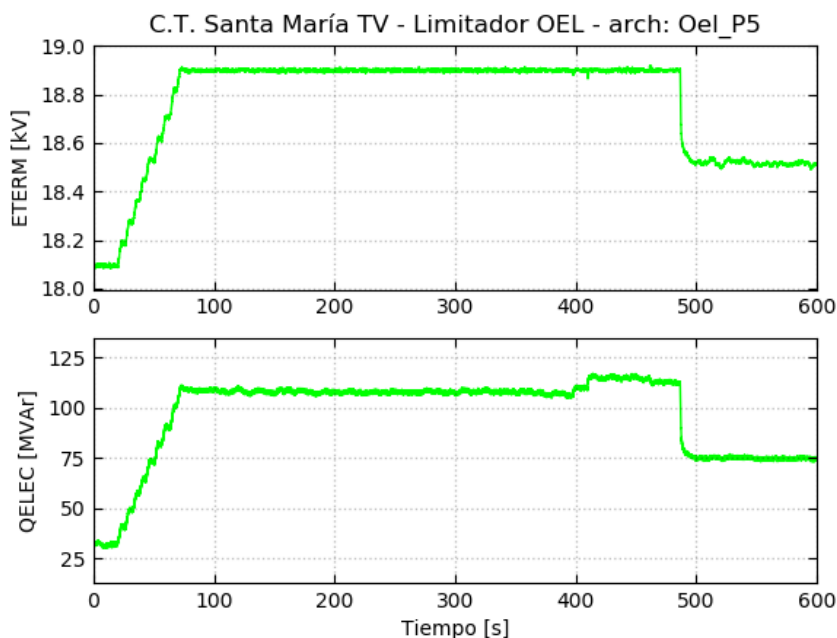


Figura 4.12 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.006 pu$

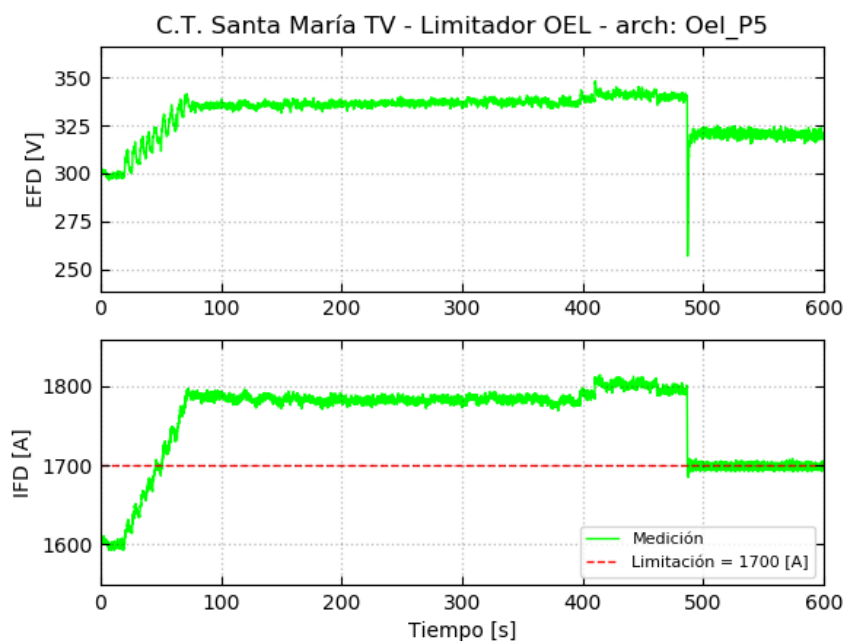


Figura 4.13 – Respuesta limitador OEL – $ETERMo = 1.006 pu$



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 TV de la Central Térmica Santa María.

4.3.1 Prueba 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 NTSyCS vigente en su artículo 3-12, literal a) debido a que posee un tiempo de crecimiento menor a 400 ms y su tiempo de establecimiento resulta igual a 1.5 s. Adicionalmente, dado que el AVR cuenta con acción integral en su lazo principal de control, el error estacionario resulta nulo. La Tabla 4.9 resume los parámetros obtenidos en la unidad.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor Medido</i>	<i>Requerimiento Normativo</i>
Sobreoscilación	9.97%	< 15%
Tiempo de crecimiento	340 ms	< 400 ms
Tiempo de establecimiento	1.5 seg	< 1.5 seg
Error estacionario³	0%	< 0.25%

Tabla 4.9 – Ensayos vacío según guía de Análisis de requerimiento establecidos por NTSyCS

- **Techos de excitación:** Para la verificación del cumplimiento de las exigencias de la NTSyCS en lo que respecta a la relación $EFD_{m\acute{a}x}/EFD_{nom}$. Se procedió a obtener el valor de $EFD_{m\acute{a}x}$ a partir del resultado obtenido en la prueba de determinación de techo de excitación en la Figura 4.3 y EFD_{nom} a partir del valor obtenido por simulación para las condiciones nominales de operación.

Los valores obtenidos se muestran a continuación:

- $EFD_{m\acute{a}x} = 1159.8 \text{ V}$
- $EFD_{nom} = 446.5 \text{ V}$

De esta forma, la relación obtenida se muestra en la Tabla 4.10 y se verifica el cumplimiento de las exigencias de la NTSyCS:

³ 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 normativa.



Parámetros	Valor Medido	Requerimiento Normativo
EFDMáx/EFDNom	2.59	> 2.0

Tabla 4.10 – Resultados techos de excitación

- **Limitador de sobreflujo (V/Hz):** Se ha probado la correcta actuación del limitador de sobreflujo, adicionalmente se verifica el cumplimiento del artículo 3-11, literal a) de la NTSyCS, por cuanto el rango operativo exigido en dicho artículo (49-51 Hz y 0.95-1.05 p.u. de tensión) no se ve interferido por el limitador.

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 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 absorbida por la unidad en el valor ajustado lo que permite inferir una correcta actuación en su valor de ajuste permanente. También se puede concluir a partir del análisis de las curvas PQ y protecciones del Capítulo 5, que el limitador tiene una adecuada coordinación con la protección de pérdida de 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 ***“EE-EN-2023-0689-RA-Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CT_Santa_María”*** donde se han desarrollado las curvas de capacidad PQ teóricas máximas.

Cabe aclarar que se detectó un error en el trazado de la curva PQ teórica en los puntos operativos de la zona de subexcitación. En base a lo anterior, se han realizado las correcciones correspondientes y este informe verifica los resultados en sitio respecto de la curva PQ teórica corregida.

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

Los ensayos consisten en pruebas estáticas, donde se intenta consignar la tensión objetivo en terminales de la unidad mediante la colaboración del CEN, para ajustar la tensión en la barra S/E Santa María 220 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: ***“EE-EN-2023-0886-RA-Procedimiento_Ensayos_SSCC_Control_Tension_Frecuencia_CT_Santa_María”***

Durante el desarrollo de las pruebas se solicitó colaboración al despacho en reiteradas oportunidades, los cuales se mostraron con total predisposición para intentar ajustar la tensión en la barra S/E Santa María 220 kV con el propósito de llegar al punto de potencia reactiva objetivo.



5.1 Puntos operativos alcanzados

Para los puntos objetivos alcanzados (P, Q, V) se han registrado las principales magnitudes durante al menos 15 minutos para el estado de carga P5_CT y al menos 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 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.

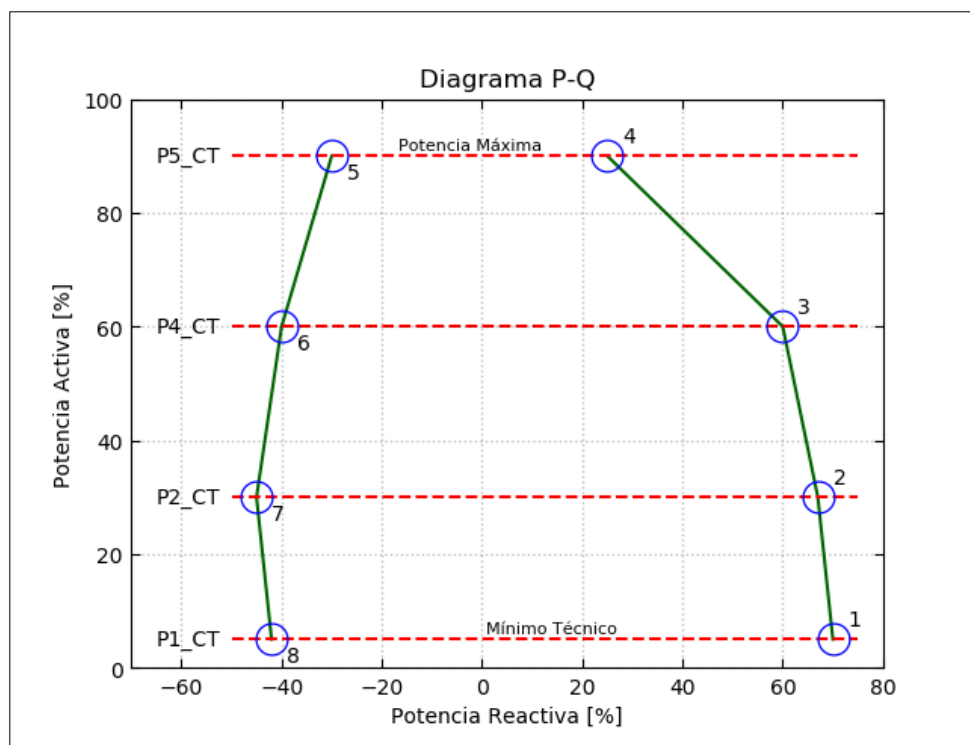


Figura 5.1 – Puntos PQ referenciales a verificar en régimen estacionario para los 5 niveles de tensión

Despacho de Potencia Activa	Valor [MW]
P1_CT	178.0
P2_CT	243.3
P4_CT	308.7
P5_CT	374.0

Tabla 5.1 - Distribución de los puntos a verificar según el despacho de potencia activa



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

Anexo 7.1.1: Verificación curva PQ @ 0.90 pu.

Anexo 7.1.2: Verificación curva PQ @ 0.95 pu.

Anexo 7.1.3: Verificación curva PQ @ 1.0 pu.

Anexo 7.1.4: Verificación curva PQ @ 1.05 pu.

Anexo 7.1.5: Verificación curva PQ @ 1.1 pu.

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.

Cabe mencionar que no fue posible alcanzar la tensión de 1.1 p.u. puesto que no es posible aumentar la tensión del generador por encima de 1.09 p.u. debido al ajuste del limitador de sobreflujo. Los resultados para los niveles de tensión 1.1 p.u. se corresponden a tensiones cercanas a dicho valor, llegando a operar en 1.09 p.u. como tensión más próxima a 1.1 p.u. y al límite del V/Hz.



Subexcitación								
Objetivo			Alcanzado			Origen de la limitación	Resultado prueba	Valida Curva PQ
ETERM [p.u.]	PELEC [MW]	QELEC [MVar]	ETERM [p.u.]	PELEC [MW]	QELEC [MVar]			
0.90	178.0	-122.3	0.9	178.36	-120.63	Actúa límite UEL	Alcanzado	SI
	243.3	-114.3	0.91	244.57	-118.32	Actúa límite UEL	Alcanzado aumentando la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.91pu/244.6MW=-117.3 MVar)
	308.7	-99.2	0.91	307.6	-103.27	Actúa límite UEL	Alcanzado aumentando la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.91pu/307.6MW=-103.48 MVar)
	374.0	-80.4	0.92	366.31	-83.45	Actúa límite UEL	Alcanzado aumentando la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.92pu/366.3MW=-88.4 MVar)
0.95	178.0	-137.4	0.91	177.15	-108.45	Comentario ⁴	No Alcanzable	N/A
	243.3	-131.4	0.91	244.55	-118.24	Actúa límite UEL	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.91pu/244.6MW=-117.3 MVar)
	308.7	-119.5	0.91	311.14	-103.66	Actúa límite UEL	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.91pu/311.1MW=-106.6 MVar)
	374.0	-101.5	0.91	368.52	-83.68	Actúa límite UEL	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador	SI (Q _{OBJ} @0.91pu/368.5MW=-87.4 MVar)
1.00	178.0	-153.3	0.96	178.56	-33.4	Comentario ⁴	No Alcanzable	N/A
	243.3	-149.1	0.96	243.83	-44.36		No Alcanzable	N/A
	308.7	-139.5	0.96	310.15	-35.44		No Alcanzable	N/A
	374.0	-124.3	0.96	369.85	-17.73		No Alcanzable	N/A
1.05	178.0	-168.5	1.01	177.36	48.6	Comentario ⁴	No Alcanzable	N/A
	243.3	-166.4	1.01	243.99	40.3		No Alcanzable	N/A
	308.7	-158.9	1.01	307.91	47.65		No Alcanzable	N/A
	374.0	-146.7	1.01	369.44	65.67		No Alcanzable	N/A

⁴ No se alcanza el punto objetivo aun cuando se han ultimado todas las instancias posibles. Se pidió colaboración al centro de despacho, este no pudo seguir ajustando la tensión de la barra por condiciones desfavorables del Sistema. Ante esto, y siguiendo los lineamientos del procedimiento de ensayos, se opta por bajar la tensión del generador, pero se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo.



1.10 ⁵	178.0	-184.4	1.06	178.5	148.12	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	243.3	-183.9	1.06	243.21	119.95	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	308.7	-178.5	1.06	307.84	136.29	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	374.0	-168.7	1.06	372.06	155.13	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A

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

⁵ Debido a la imposibilidad de llegar a 1.10 p.u. de tensión de terminales del generador por limitador de V/Hz seteado en 1.09 p.u., no se logra verificar la curva registrando, incluso con valores cercanos a 1.09 pu.



Sobrexcitación								
Objetivo			Alcanzado			Origen de la limitación	Resultado prueba	Valida Curva PQ
ETERM [p.u.]	PELEC [MW]	QELEC [MVar]	ETERM [p.u.]	PELEC [MW]	QELEC [MVar]			
0.90	178.0	381.6	0.94	178.5	-61.46	Comentario ⁶	No Alcanzable	N/A
	243.3	343.6	0.94	241.43	-82.54		No Alcanzable	N/A
	308.7	286.4	0.94	308.76	-63.07		No Alcanzable	N/A
	374.0	193.7	0.94	370.47	-47.96		No Alcanzable	N/A
0.95	178.0	405.5	0.99	177.11	16.02	Comentario ⁶	No Alcanzable	N/A
	243.3	372.1	0.99	243.06	-9.95		No Alcanzable	N/A
	308.7	320.0	0.99	308.14	17.28		No Alcanzable	N/A
	374.0	240.0	0.99	366.09	28.56		No Alcanzable	N/A
1.00	178.0	407.5	1.04	177.7	104.22	Comentario ⁶	No Alcanzable	N/A
	243.3	387.9	1.04	243.46	86.46		No Alcanzable	N/A
	308.7	351.6	1.04	307.8	103.63		No Alcanzable	N/A
	374.0	280.9	1.04	371.24	100.52		No Alcanzable	N/A
1.05	178.0	403.9	1.09	175.68	201.28	Comentario ⁶	No Alcanzable	N/A
	243.3	385.6	1.09	242.48	180.81		No Alcanzable	N/A
	308.7	360.8	1.09	307.11	189.57		No Alcanzable	N/A
	374.0	318.4	1.09	370.07	196.99		No Alcanzable	N/A
1.10 ⁷	178.0	393.6	1.09	178.78	209.56	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	243.3	376.6	1.09	242.5	180.96	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	308.7	353.7	1.09	307.52	185.91	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A
	374.0	324.0	1.09	367.05	199.86	Se llega a límite de tensión consignable	No alcanzado debido a ajuste limitador V/HZ	N/A

Tabla 5.3 - Resumen de puntos operativos alcanzados – Zona de sobrexcitación

⁶ No se alcanza el punto objetivo aun cuando se han ultimado todas las instancias posibles. Se pidió colaboración al centro de despacho, este no pudo seguir ajustando la tensión de la barra por condiciones desfavorables del Sistema. Ante esto, y siguiendo los lineamientos del procedimiento de ensayos, se opta por subir la tensión del generador, pero se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo.

⁷ Debido a la imposibilidad de llegar a 1.10 p.u. de tensión de terminales del generador por limitador de V/Hz seteado en 1.09 p.u., no se logra verificar la curva registrando, incluso con valores cercanos a 1.09 pu.



Donde:

- **Alcanzado:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que pudieron ser verificados.
- **Verificado 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 alcanzado:** se utiliza el término para indicar los puntos operativos objetivo (P, Q, V) que no pudieron ser verificados debido a una restricción operativa de la central. (ej. ajuste protecciones de los generadores).
- **No alcanzable:** 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.



5.1.1 Análisis

A partir de la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 se observa que existen puntos objetivos que no son alcanzados de acuerdo con las exigencias de la guía de verificación, debido a que no se puede llevar la tensión del sistema por fuera del rango de operación normal.

Las pruebas fueron llevadas a cabo por medio de cambios en la consigna de tensión de la unidad, verificando en cada nivel de carga todos los niveles de tensión que permitieran los limitadores, pudiendo validar correctamente los casos subexcitados para tensiones entre 0.90 p.u., 0.95 p.u.

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. ⁸
P1 = 178	Alcanzado	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P2 = 243.3	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.91 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P4 = 307.8	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.91 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P5 = 374	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.92 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)

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

⁸ El nivel de tensión 1.1 p.u. no fue ensayado debido a la actuación del límite V/Hz seteado en 1.09 p.u. Las gráficas mostradas en el Anexo corresponden al nivel de tensión cercano 1.09 p.u.



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. ⁸
P1 = 178	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P2 = 243.3	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P4 = 307.8	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P5 = 374	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)

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



5.2 Curvas de capacidad

Las curvas de capacidad de la unidad han sido calculadas en el informe PQ teórico máximo ***“EE-EN-2023-0689-RA-Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CT_Santa_Maria”***, pero las mismas han sido reajustadas porque se detectó un error en el trazado de la curva PQ teórica en los puntos operativos de la zona de subexcitación. En base a los anterior, se considera en este informe la curva PQ corregida.

Cabe mencionar que para el nivel de tensión de 1.1 p.u. en bornes de generador no es posible operar la unidad porque existe restricción en el ajuste del límite de sobreflujo seteado a 1.09 p.u., que impiden alcanzar dichos valores. 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.

A continuación, se presentan las curvas de capacidad definidas para cada nivel de tensión operable en Central Térmica Santa Maria.

Se muestran las siguientes curvas:

- Corriente nominal de estator (trazo verde oscuro continuo).
- 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).
- Mínima corriente de campo de generador (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 Diagrama PQ de la unidad

Tensión en terminales 0.90 pu

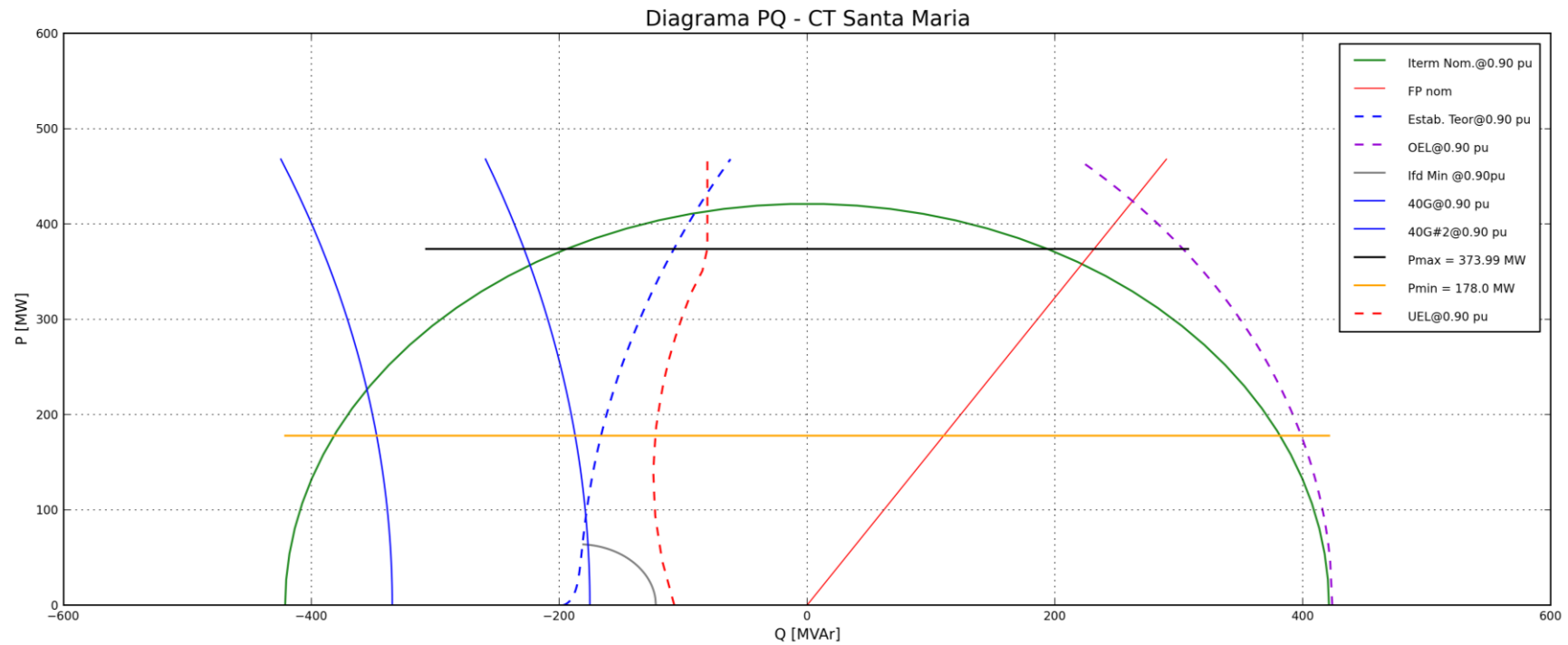


Figura 5.2 – Diagrama PQ teórico – $E_{TERM} = 0.90 \text{ p.u.}$



Tensión en terminales 0.95 pu

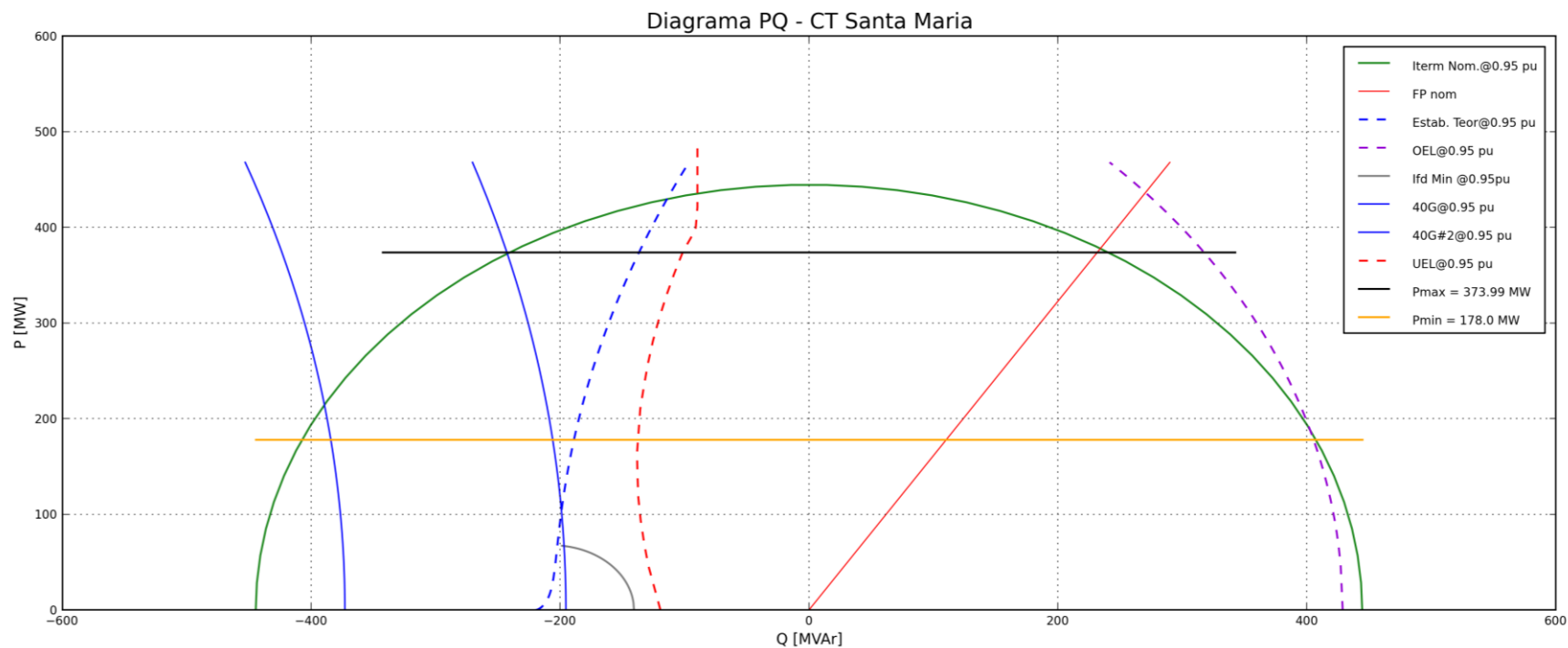


Figura 5.3 – Diagrama PQ teórico – $E_{TERM} = 0.95 \text{ p.u.}$



Tensión en terminales 1.0 pu

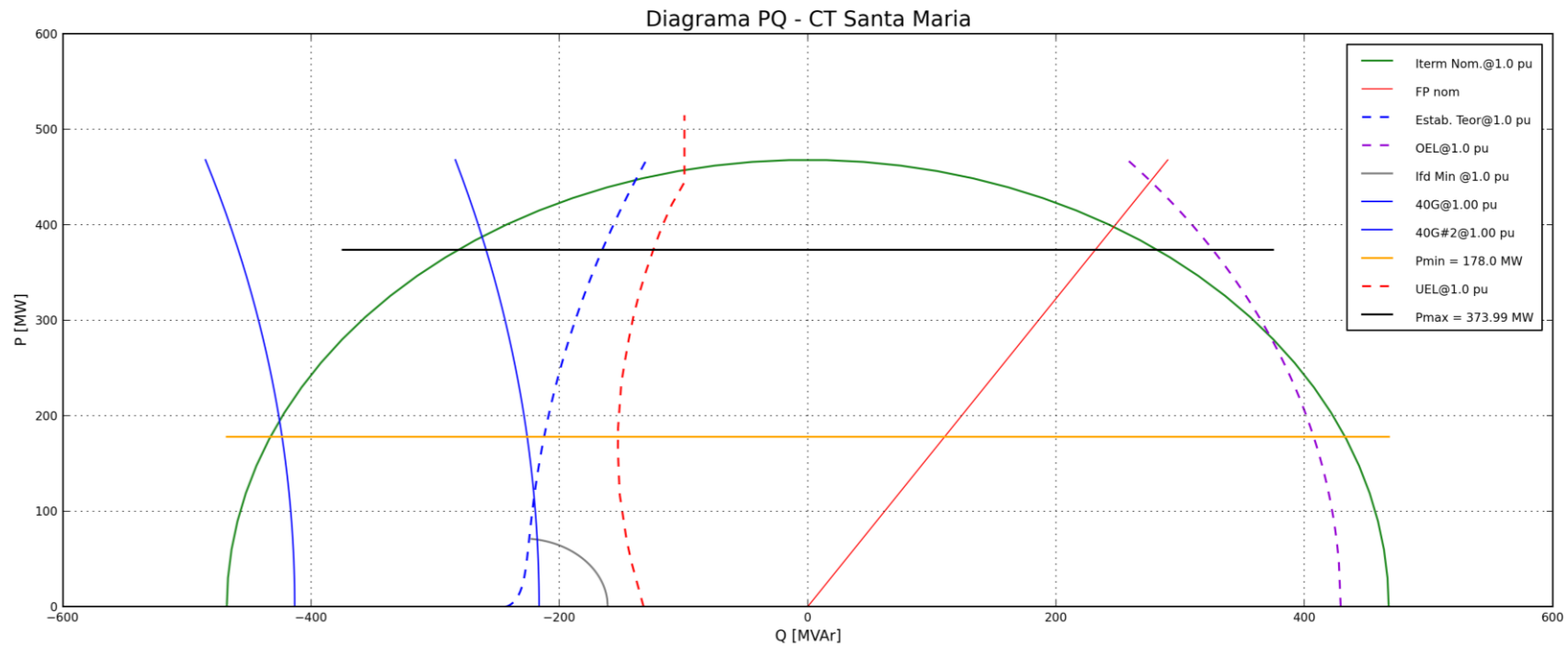


Figura 5.4 – Diagrama PQ teórico – ETERM = 1.0 p.u.



Tensión en terminales 1.05 pu

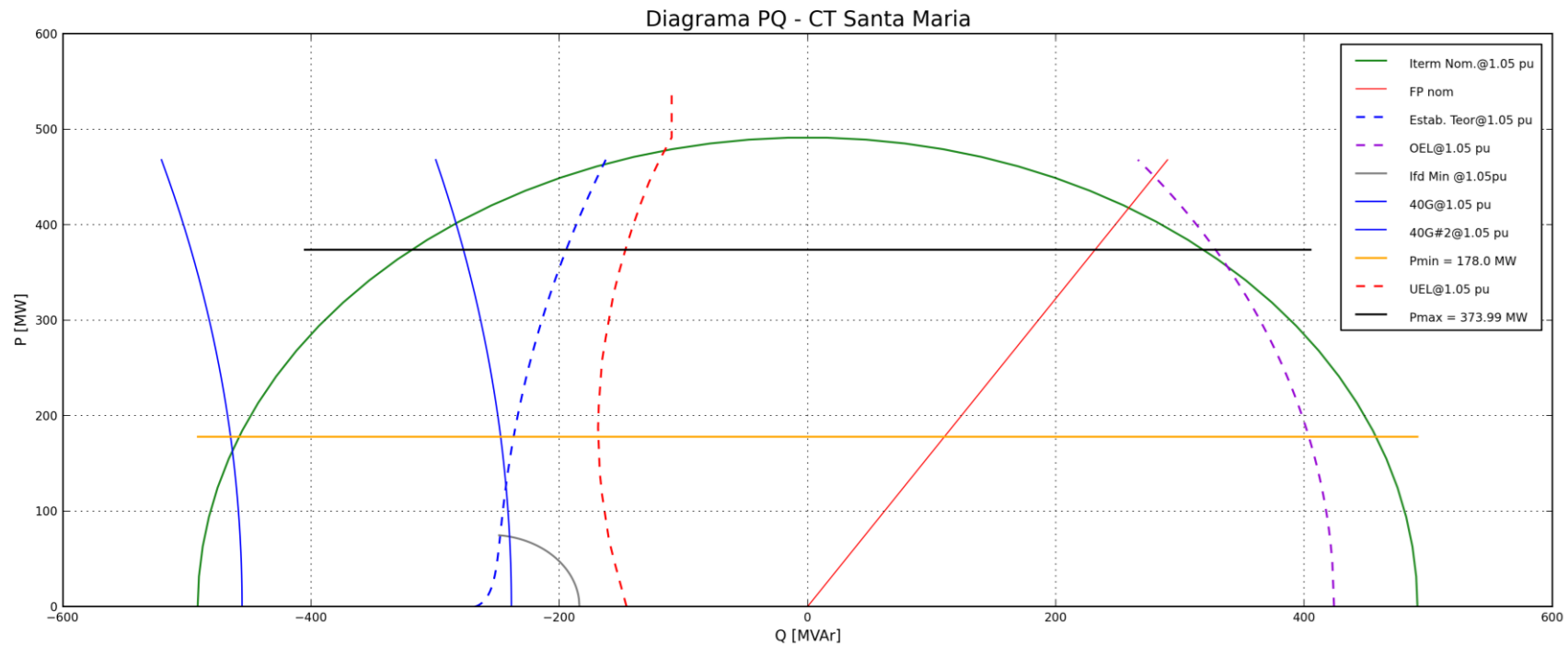


Figura 5.5 – Diagrama PQ teórico – ETERM = 1.05 p.u.



Tensión en terminales 1.10 pu

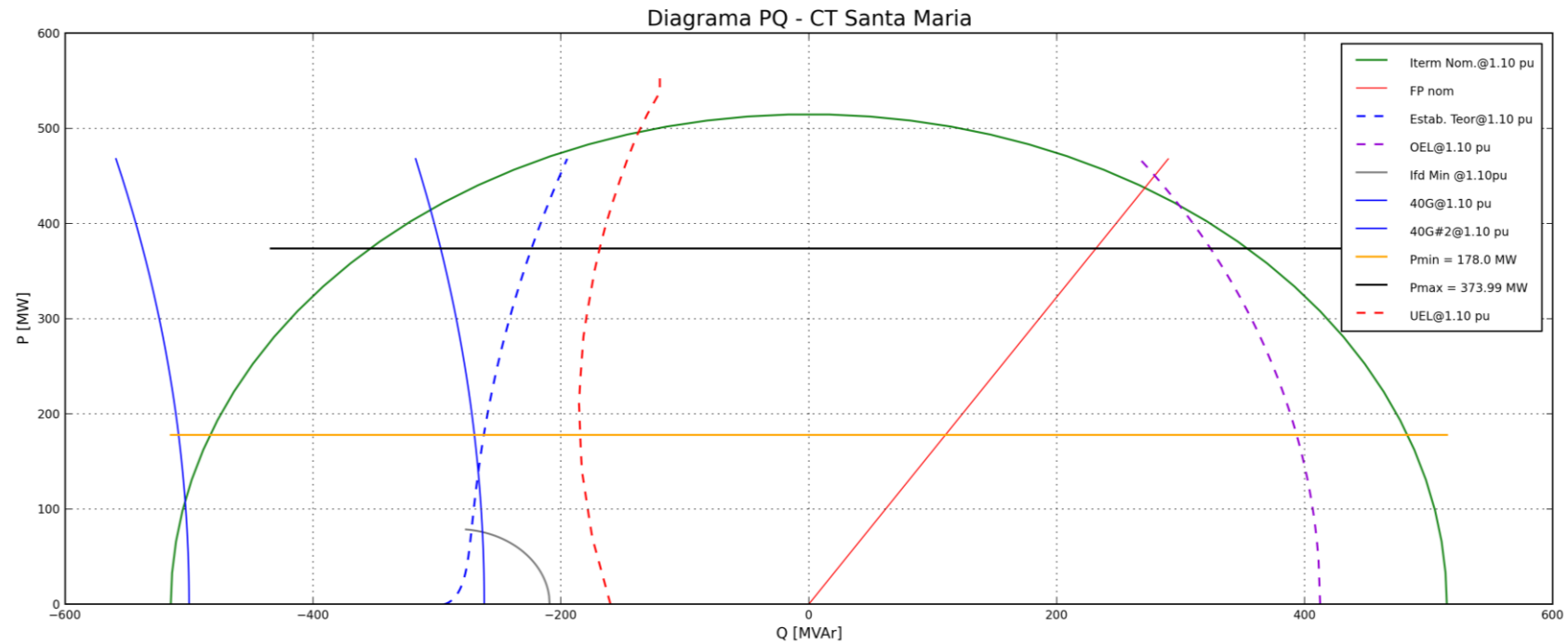


Figura 5.6 – Diagrama PQ teórico – ETERM = 1.10 p.u.



5.2.2 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-2023-1399-RD-Curva_PQ_Final_CT_Santa_Maria.xlsx"***.

Potencia [MW]	Tensión [pu]	178.0	243.3	308.7	374.0	374.0	308.7	243.3	178.0
Unidad [MVar] (0.9 pu)	0.90	-122.3	-114.3	-99.2	-80.4	193.7	286.4	343.6	381.6
Unidad [MVar] (0.95 pu)	0.95	-137.4	-131.4	-119.5	-101.5	240.0	320.0	372.1	405.5
Unidad [MVar] (1 pu)	1.0	-153.3	-149.1	-139.5	-124.3	280.9	351.6	387.9	407.5
Unidad [MVar] (1.05 pu)	1.05	-168.5	-166.4	-158.9	-146.7	318.4	360.8	385.6	403.9
Unidad [MVar] (1.10 pu)	No Operable								

Tabla 5.6 – Resumen de valores curvas PQ



5.2.3 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.90 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo	Q obtenida	VT	Vfd	Ifd	Desviación	T°estator	Vbarra	Origen de la Limitación	Observaciones
		H:MM (inicio)	H:MM (fin)	P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]	[kV]	[V]	[A]	[%]	[°C]	[kV]		
1	29-09-2023	5:45	5:48	178	381.6	178.5	-61.46	16.92	153.66	862.71	N/A	30	222.3	No se alcanza el punto objetivo ya que al subir la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se sube tensión en bornes a 0,94 pu. Punto no alcanzado
2	29-09-2023	3:12	3:15	243.3	343.6	241.43	-82.54	16.93	181.74	1012	N/A	35	224.2		Se sube tensión en bornes a 0,94 pu. Punto no alcanzado
3	28-09-2023	7:31	7:34	308.7	286.4	308.76	-63.07	16.94	230.18	1260.29	N/A	40	223.3		Se sube tensión en bornes a 0,94 pu. Punto no alcanzado
4	29-09-2023	0:07	0:10	374	193.7	370.47	-47.96	16.93	277.29	1493.04	N/A	49	223.0		Se sube tensión en bornes a 0,94 pu. Punto no alcanzado
5	28-09-2023	3:12	3:27	374	-80.4	366.31	-83.45	16.56	266.74	1449.27	3.79	49	221.1	Actúa Límite UEL	Punto alcanzado con la tensión en bornes a 0,92 pu.
6	28-09-2023	6:20	6:25	308.7	-99.2	307.6	-103.27	16.37	221.62	1218.61	4.10	42	219.4	Actúa Límite UEL	Punto alcanzado con la tensión en bornes a 0,91 pu.
7	29-09-2023	2:41	2:46	243.3	-114.3	244.57	-118.32	16.42	174.35	971.43	3.52	35	221.0	Actúa Límite UEL	Punto alcanzado con la tensión en bornes a 0,91 pu.
8	29-09-2023	5:37	5:42	178	-122.3	178.36	-120.63	16.2	131.25	736.92	1.37	29	218.3	Actúa Límite UEL	Punto alcanzado

Tabla 5.7 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 0.90 pu



5.2.4 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 0.95 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo	Q obtenida	VT	Vfd	Ifd	Desviación	T°estator	Vbarra	Origen de la Limitación	Observaciones
		H:MM (inicio)	H:MM (fin)	P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]	[kV]	[V]	[A]	[%]	[°C]	[kV]		
1	29-09-2023	5:52	5:55	178	405.5	177.11	16.02	17.81	194.09	1082.82	N/A	29	227.5	No se alcanza el punto objetivo ya que al subir la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se sube tensión en bornes a 0,99 pu. Punto no alcanzado
2	29-09-2023	3:21	3:24	243.3	372.1	243.06	-9.95	17.82	211.72	1172.72	N/A	34	229.8		Se sube tensión en bornes a 0,99 pu. Punto no alcanzado
3	28-09-2023	7:22	7:25	308.7	320	308.14	17.28	17.83	259.21	1406.54	N/A	40	228.4		Se sube tensión en bornes a 0,99 pu. Punto no alcanzado
4	28-09-2023	23:37	23:40	374	240	366.09	28.56	17.83	299.15	1593	N/A	47	228.0		Se sube tensión en bornes a 0,99 pu. Punto no alcanzado
5	28-09-2023	23:48	29/9/2023 00:03	374	-101.5	368.52	-83.68	16.44	269.86	1455.96	17.56	50	219.7	Actúa Límite UEL	Punto alcanzado disminuyendo la tensión en bornes a 0,91 pu.
6	28-09-2023	5:50	5:55	308.7	-119.5	311.14	-103.66	16.43	223.65	1227.28	13.26	40	220.3		Punto alcanzado disminuyendo la tensión en bornes a 0,91 pu.
7	29-09-2023	2:32	2:37	243.3	-131.4	244.55	-118.24	16.41	174.75	972.23	10.02	34	221.0		Punto alcanzado disminuyendo la tensión en bornes a 0,91 pu.
8	29-09-2023	5:31	5:34	178	-137.4	177.15	-108.45	16.37	134.38	754.11	N/A	29	218.3	No se alcanza el punto objetivo ya que al bajar la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se baja tensión en bornes a 0,91 pu. Punto no alcanzado

Tabla 5.8 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 0.95 pu



5.2.5 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.0 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo	Q obtenida	VT	Vfd	Ifd	Desviación	T°estator	Vbarra	Origen de la Limitación	Observaciones
		HH:MM (inicio)	HH:MM (fin)	P[MW]	Q[MVar]	P[MW]	Q[MVar]	[kV]	[V]	[A]	[%]	[°C]	[kV]		
1	29-09-2023	6:00	6:03	178	407.5	177.7	104.22	18.73	251.76	1385.05	N/A	30	233.2	No se alcanza el punto objetivo ya que al subir la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se sube tensión en bornes a 1,04 pu. Punto no alcanzado
2	29-09-2023	3:30	3:33	243.3	387.9	243.46	86.46	18.71	265.74	1448.35	N/A	34	234.4		Se sube tensión en bornes a 1,04 pu. Punto no alcanzado
3	28-09-2023	6:31	6:34	308.7	351.6	307.8	103.63	18.74	304.29	1635.59	N/A	40	234.2		Se sube tensión en bornes a 1,04 pu. Punto no alcanzado
4	28-09-2023	1:39	1:42	374	280.9	371.24	100.52	18.73	337.75	1771.64	N/A	48	234.3		Se sube tensión en bornes a 1,04 pu. Punto no alcanzado
5	28-09-2023	3:02	3:05	374	-124.3	369.85	-17.73	17.29	284.9	1526.2	N/A	48	225.0	No se alcanza el punto objetivo ya que al bajar la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se baja tensión en bornes a 0,96 pu. Punto no alcanzado
6	28-09-2023	5:42	5:45	308.7	-139.5	310.15	-35.44	17.29	239.6	1307.4	N/A	40	225.9		Se baja tensión en bornes a 0,96 pu. Punto no alcanzado
7	29-09-2023	2:24	2:27	243.3	-149.1	243.83	-44.36	17.28	196.99	1089.76	N/A	33	225.9		Se baja tensión en bornes a 0,96 pu. Punto no alcanzado
8	29-09-2023	5:24	5:27	178	-153.3	178.56	-33.4	17.29	167.19	933.4	N/A	29	224.7		Se baja tensión en bornes a 0,96 pu. Punto no alcanzado

Tabla 5.9 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 1.0 pu



5.2.1 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.05 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo	Q obtenida	VT	Vfd	Ifd	Desviación	T°estator	Vbarra	Origen de la Limitación	Observaciones
		H:MM (inicio)	H:MM (fin)	P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]	[kV]	[V]	[A]	[%]	[°C]	[kV]		
1	29-09-2023	6:08	6:11	178	403.9	175.68	201.28	19.62	330.55	1766.36	N/A	33	238.8	No se alcanza el punto objetivo ya que al subir la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo. Actúa Límite V/Hz en 1,09 pu.	Se sube tensión en bornes a 1,09 pu. Punto no alcanzado
2	29-09-2023	3:40	3:43	243.3	385.6	242.48	180.81	19.61	336.42	1784.75	N/A	35	240.1		Se sube tensión en bornes a 1,09 pu. Punto no alcanzado
3	28-09-2023	6:45	6:48	308.7	360.8	307.11	189.57	19.64	370.11	1920.23	N/A	42	239.9		Se sube tensión en bornes a 1,09 pu. Punto no alcanzado
4	28-09-2023	2:02	2:05	374	318.4	370.07	196.99	19.65	405.8	2063.46	N/A	50	239.9		Se sube tensión en bornes a 1,09 pu. Punto no alcanzado
5	28-09-2023	23:29	23:32	374	-146.7	369.44	65.67	18.2	319.06	1681.64	N/A	48	230.2	No se alcanza el punto objetivo ya que al bajar la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se baja tensión en bornes a 1,01 pu. Punto no alcanzado
6	28-09-2023	7:14	7:17	308.7	-158.9	307.91	47.65	18.2	275.17	1478.09	N/A	42	230.9		Se baja tensión en bornes a 1,01 pu. Punto no alcanzado
7	29-09-2023	2:14	2:17	243.3	-166.4	243.99	40.3	18.2	239.06	1311.32	N/A	33	231.2		Se baja tensión en bornes a 1,01 pu. Punto no alcanzado
8	29-09-2023	5:15	5:18	178	-168.5	177.36	48.6	18.18	214.34	1188.74	N/A	29	230.1		Se baja tensión en bornes a 1,01 pu. Punto no alcanzado

Tabla 5.10 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 1.05 pu



5.2.1 Ensayos de Curva PQ para tensión en terminales 1.10 pu

Puntos	Fecha	Periodo de Evaluación		Puntos Teóricos		P de ensayo	Q obtenida	VT	Vfd	Ifd	Desviación	T°estator	Vbarra	Origen de la Limitación	Observaciones
		H:MM (inicio)	H:MM (fin)	P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]	[kV]	[V]	[A]	[%]	[°C]	[kV]		
1	29-09-2023	6:15	6:18	178	393.6	178.78	209.56	19.61	340.81	1801.21	N/A	33	238.8	Actúa Límite V/Hz en 1,09 pu.	Punto no alcanzado
2	29-09-2023	3:45	3:48	243.3	376.6	242.5	180.96	19.61	338.52	1785.89	N/A	37	240.4		Punto no alcanzado
3	28-09-2023	6:53	6:56	308.7	353.7	307.52	185.91	19.64	368.22	1908.86	N/A	43	239.9		Punto no alcanzado
4	28-09-2023	2:20	2:23	374	324	367.05	199.86	19.64	409.05	2070.28	N/A	50	239.9		Punto no alcanzado
5	28-09-2023	23:20	23:23	374	-168.7	372.06	155.13	19.09	371.81	1929.54	N/A	48	235.6	Actúa Límite V/Hz en 1,09 pu. No se alcanza el punto objetivo ya que al bajar la tensión se alcanza el siguiente nivel de tensión objetivo	Se baja tension en bornes a 1,06 pu. Punto no alcanzado
6	28-09-2023	7:05	7:08	308.7	-178.5	307.84	136.29	19.09	330.56	1733.45	N/A	43	236.4		Se baja tension en bornes a 1,06 pu. Punto no alcanzado
7	29-09-2023	3:55	3:58	243.3	-183.9	243.21	119.95	19.08	290.64	1557.44	N/A	38	237.1		Se baja tension en bornes a 1,06 pu. Punto no alcanzado
8	29-09-2023	6:24	6:27	178	-184.4	178.5	148.12	19.08	287.68	1545.18	N/A	35	234.7		Se baja tension en bornes a 1,06 pu. Punto no alcanzado

Tabla 5.11 – Resumen de valores curvas PQ con tensión en terminales de 1.10 pu



6 ANALISIS Y CONCLUSIONES

La unidad TV de la **Central Térmica Santa María** 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 SCCC"* vigente.

En lo que respecta al **SCCC 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 funcionamiento 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-2023-0689-RA-Diagrama_PQ_Teórico_Máximo_CT_Santa_Maria"***.
- 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 el valor de tensión de 1.10 p.u., el cual no se logró verificar debido a encontrarse el limitador de sobreflujo en 1.09 p.u. Sin embargo, para los puntos verificados, no se observan restricciones y se comprueba que las unidades pueden operar estables en tales niveles de potencia reactiva.
- No se evidencia restricción por parte de la unidad para operar dentro de las curvas de operación teóricas, exceptuando la curva de operación para el nivel de tensión 1.1 p.u., ya que la operación de la unidad se ve restringida por el limitador V/Hz en 1.09 p.u.



7 ANEXOS

7.1 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 en el terminal (señal QELEC).
- Potencia activa en el terminal (señal PELEC).
- Tensión de campo (señal EFD).
- Corriente de campo (señal IFD)

7.1.1 Verificación curva PQ @ 0.90 pu

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 0.90 pu desde el lado sobreexcitado hacia la parte subexcitada.



Punto P1_CT-Q1

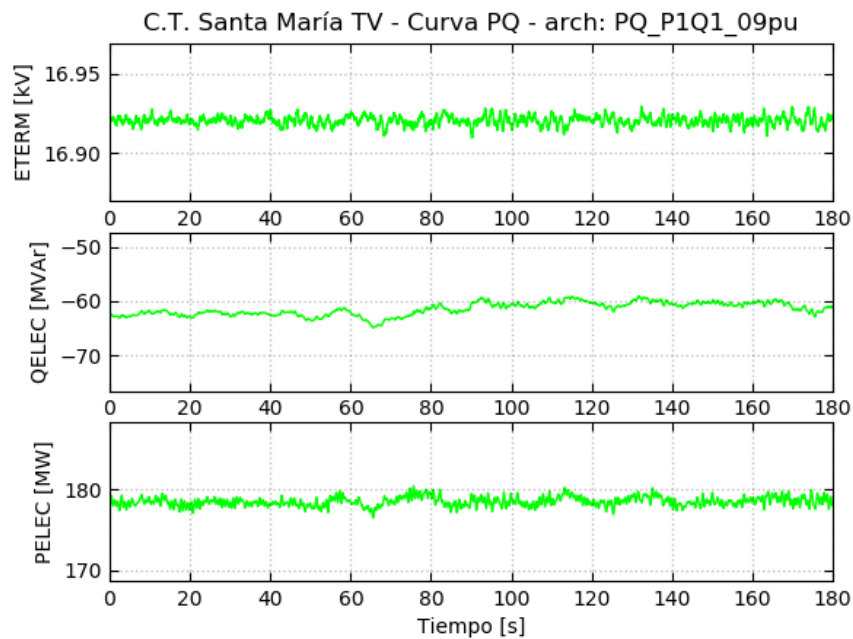


Figura 7.1 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

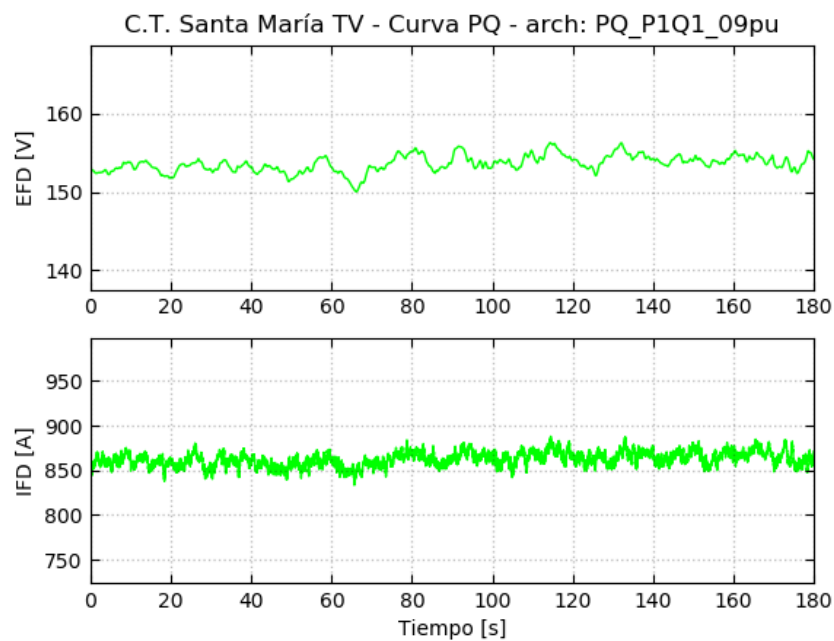


Figura 7.2 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q2

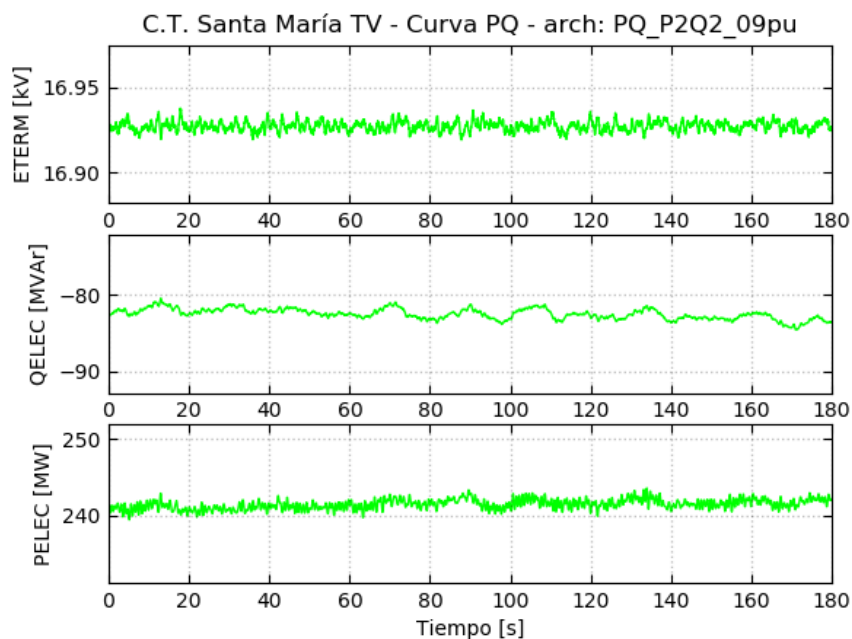


Figura 7.3 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

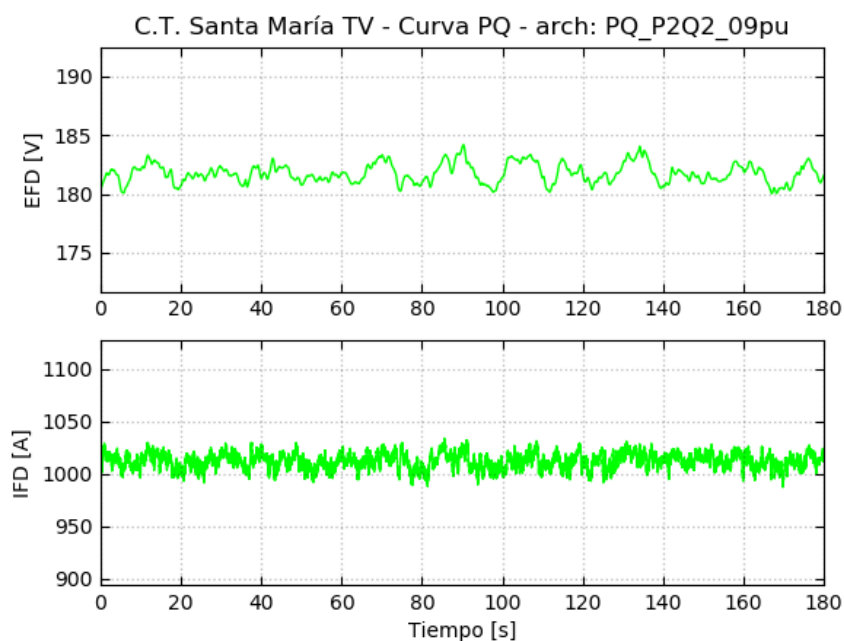


Figura 7.4 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q3

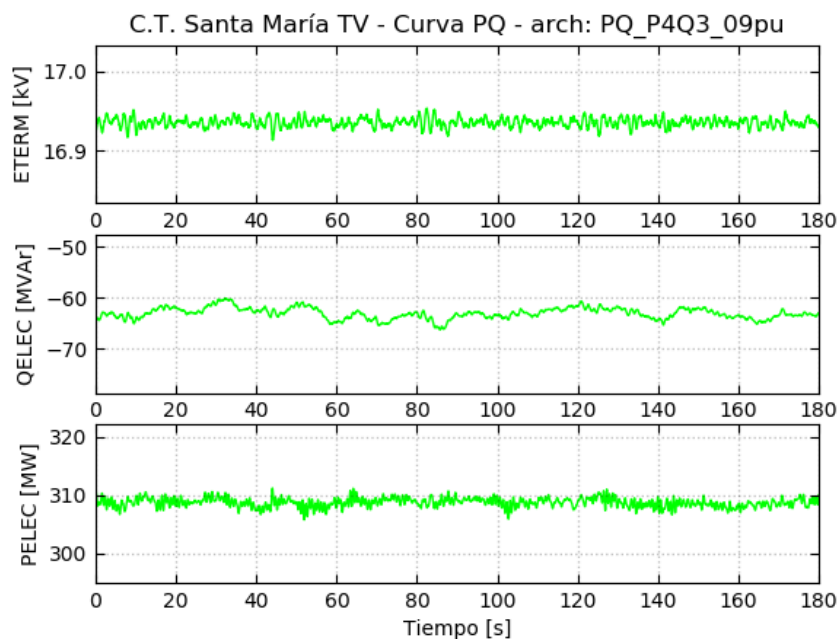


Figura 7.5 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

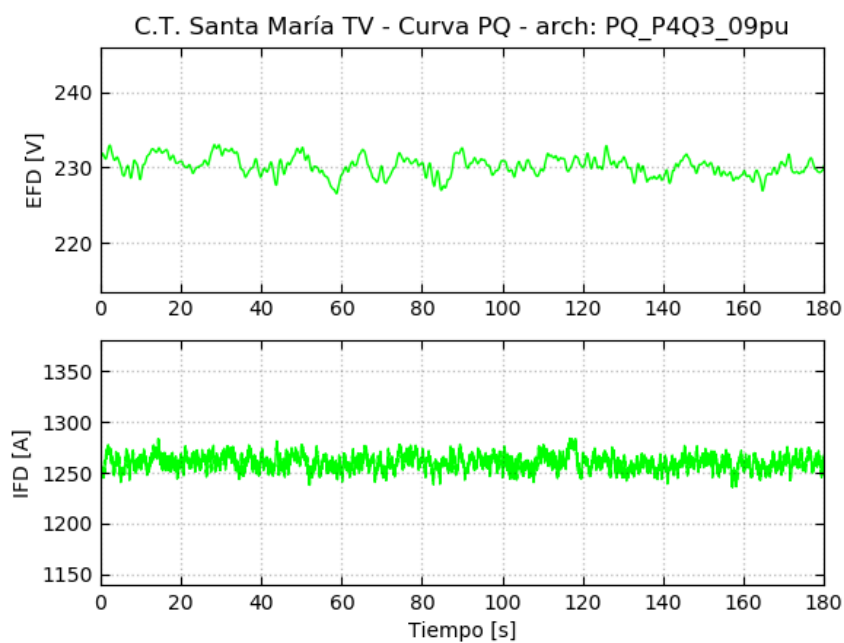


Figura 7.6 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q4

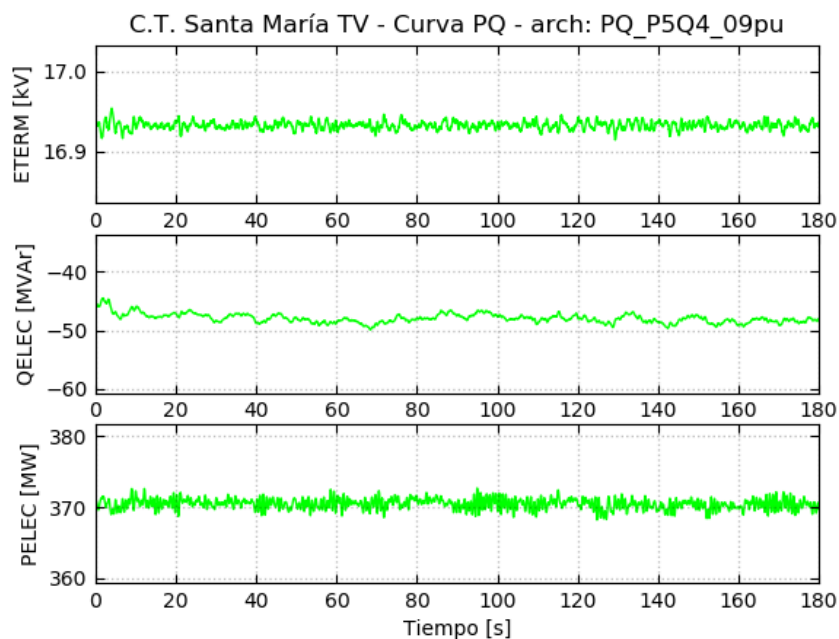


Figura 7.7 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

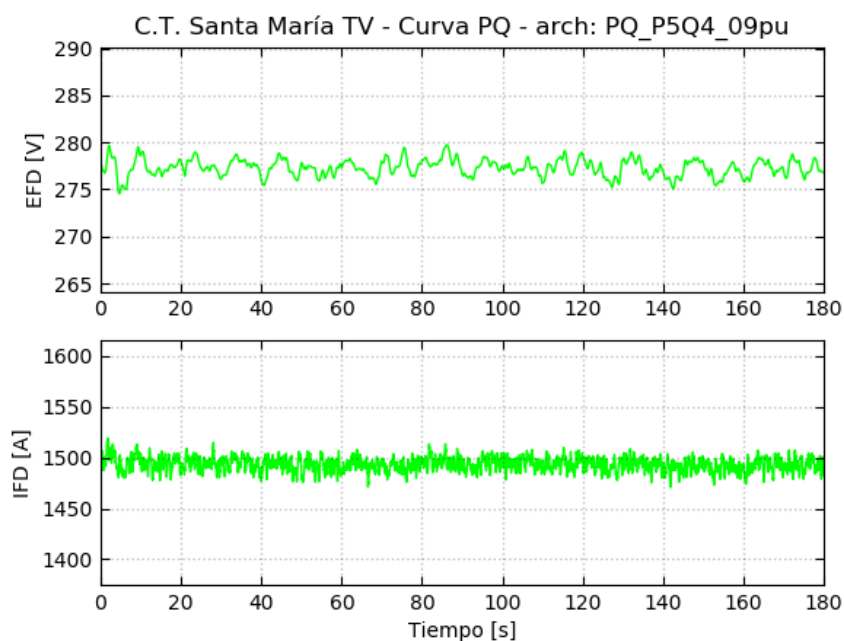


Figura 7.8 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q5

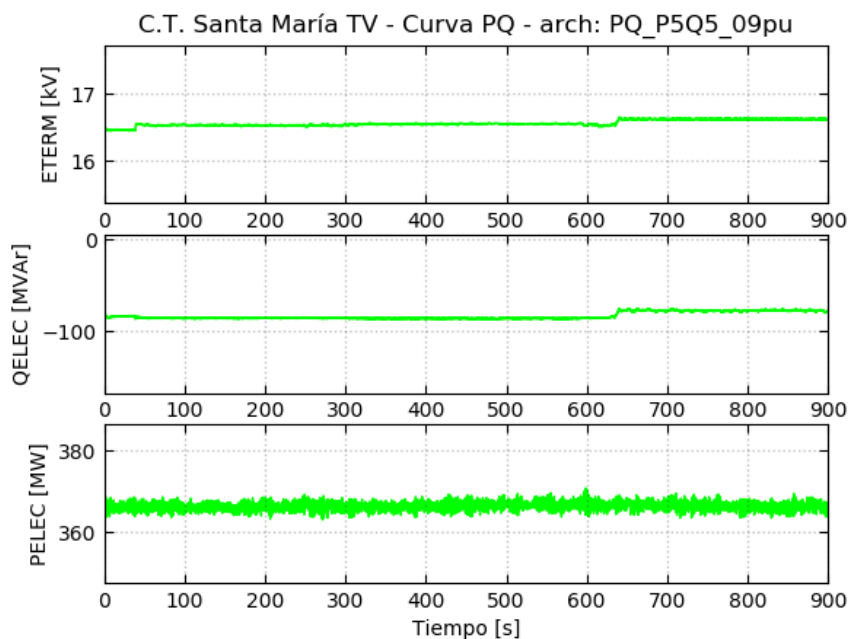


Figura 7.9 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

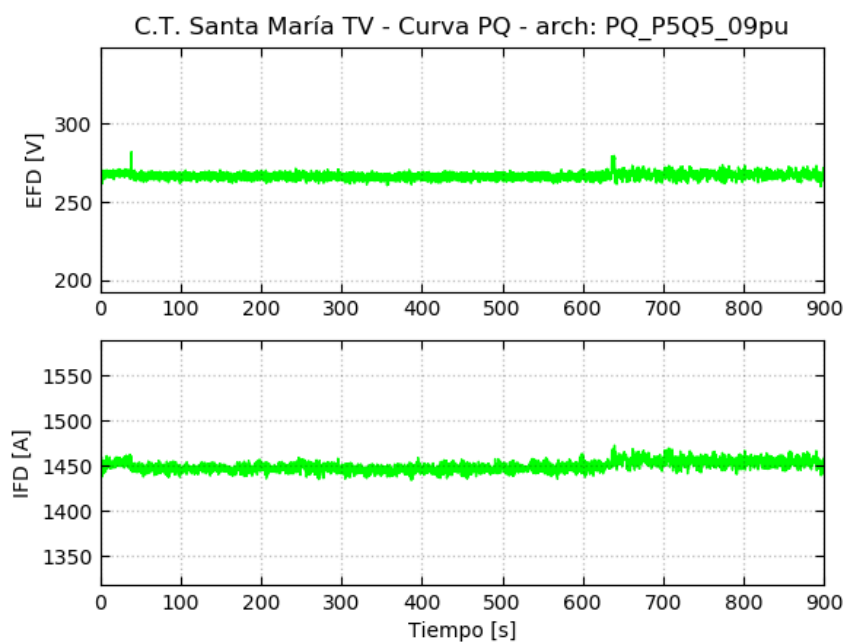


Figura 7.10 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q6

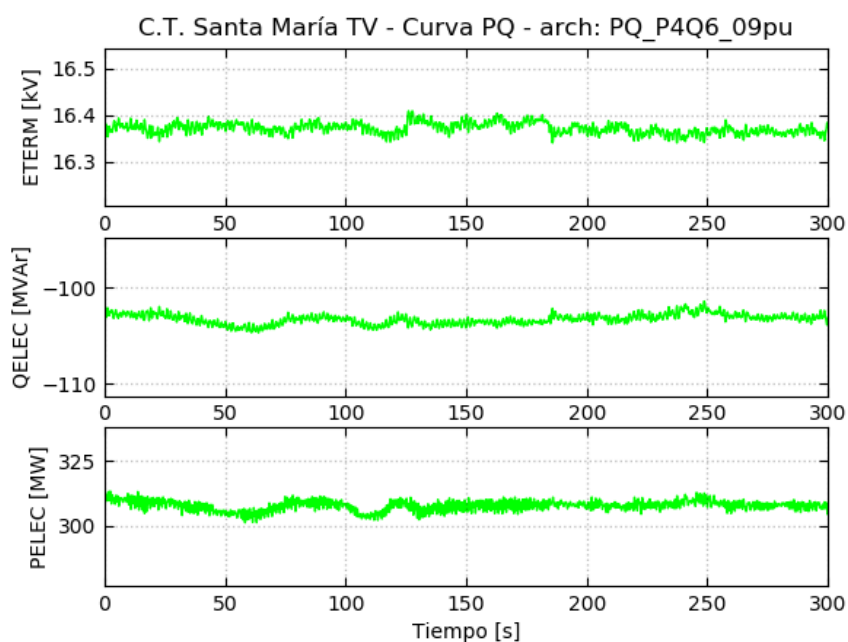


Figura 7.11 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

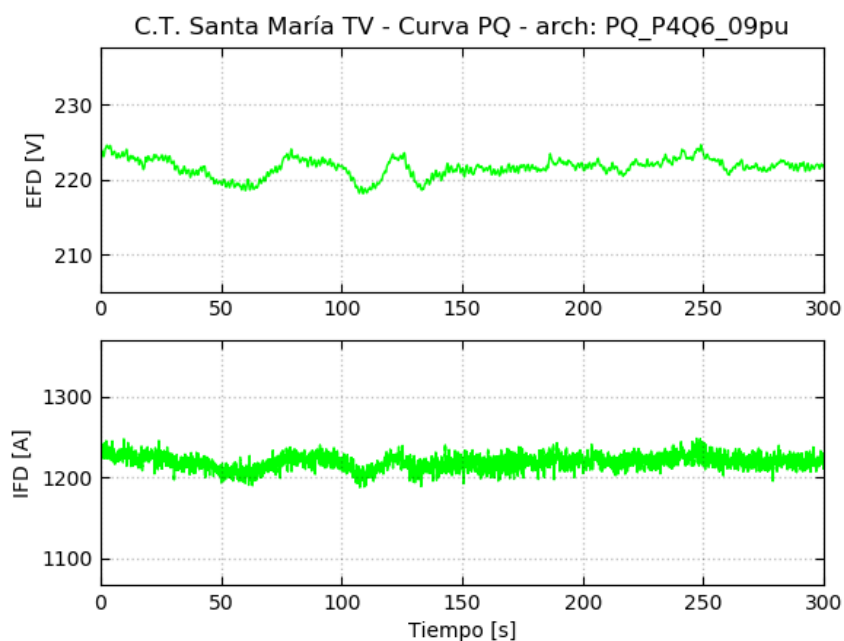


Figura 7.12 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q7

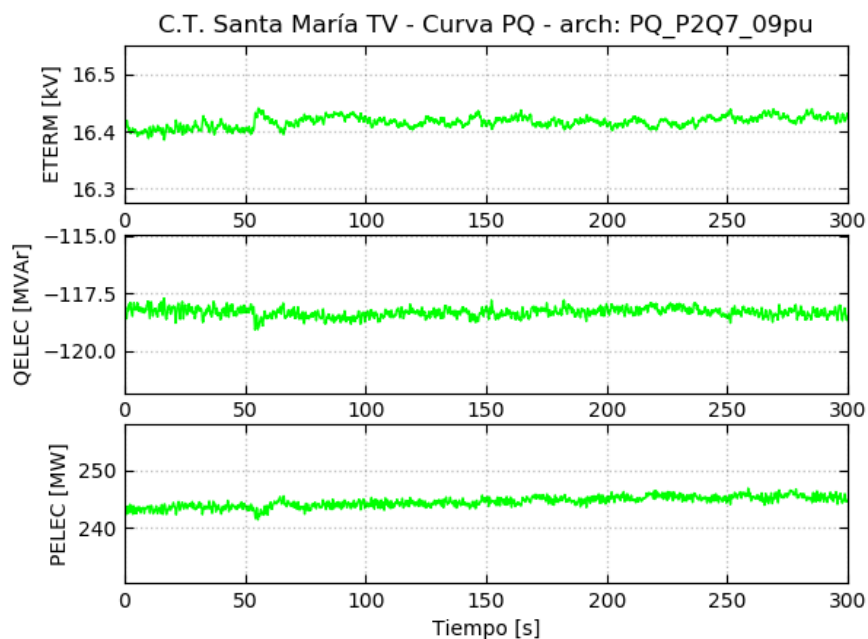


Figura 7.13 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

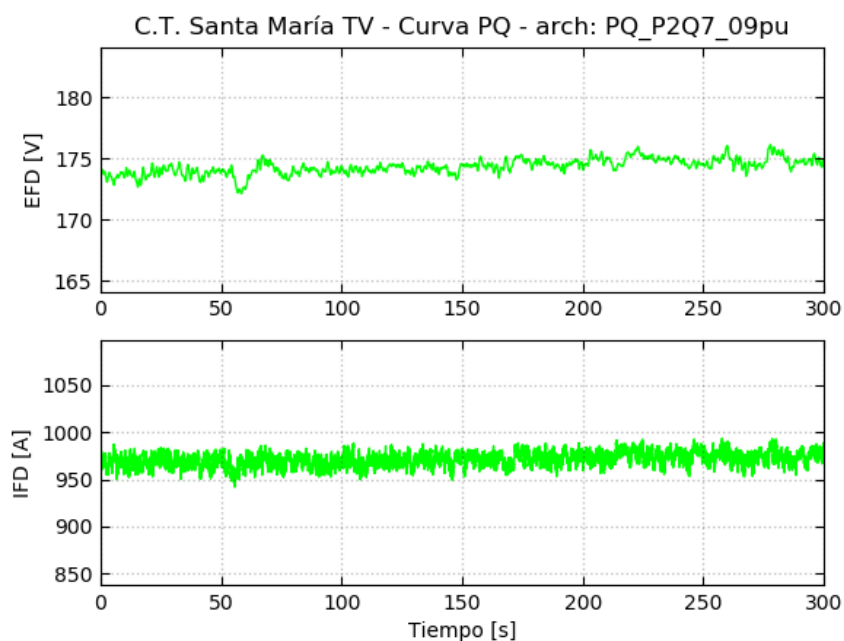


Figura 7.14 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P1_CT-Q8

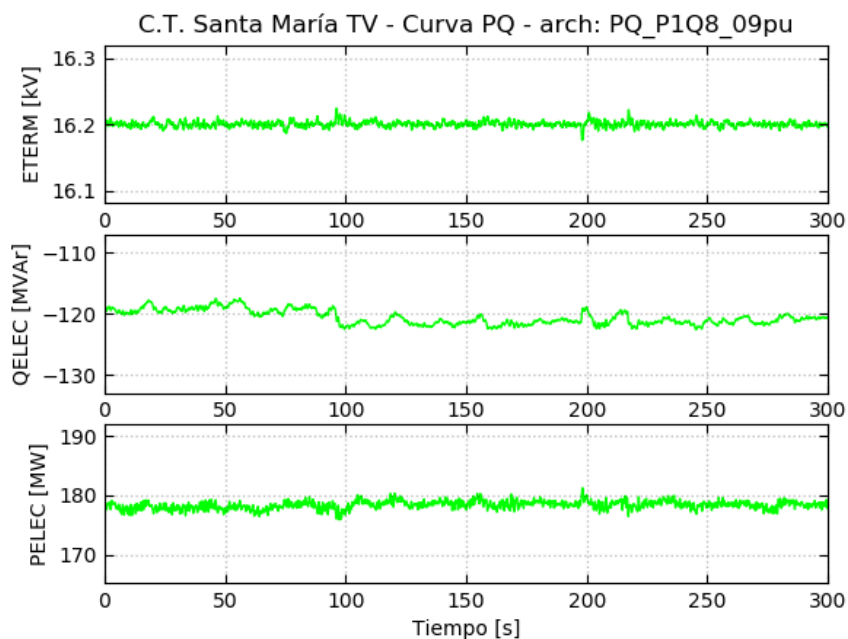


Figura 7.15 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

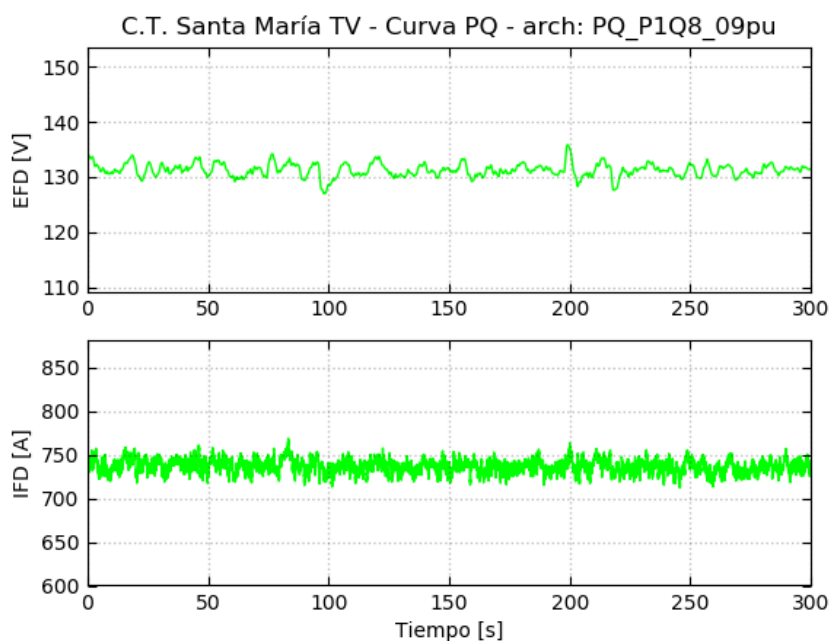


Figura 7.16 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



7.1.2 Verificación curva PQ @ 0.95 pu

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 pu desde el lado sobreexcitado hacia la parte subexcitada.



Punto P1_CT-Q1

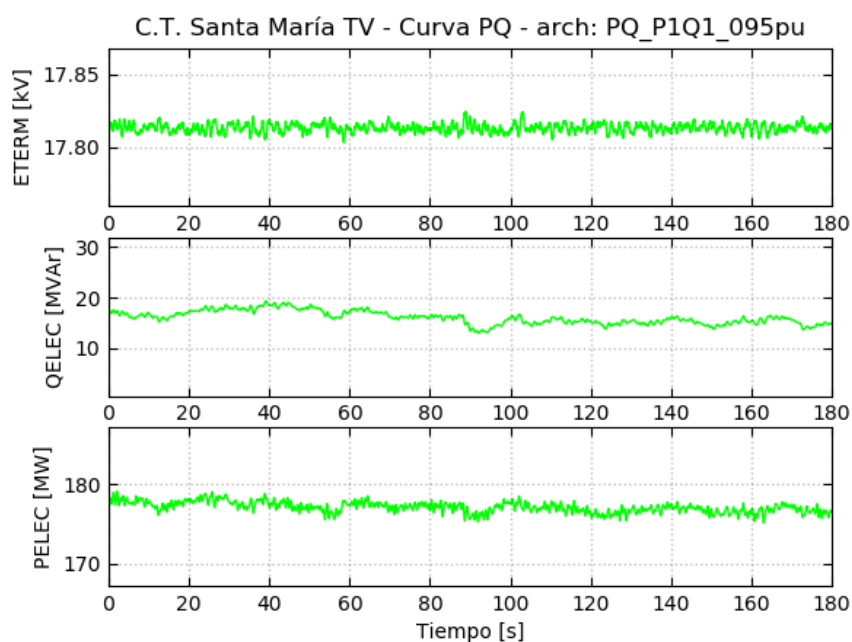


Figura 7.17 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

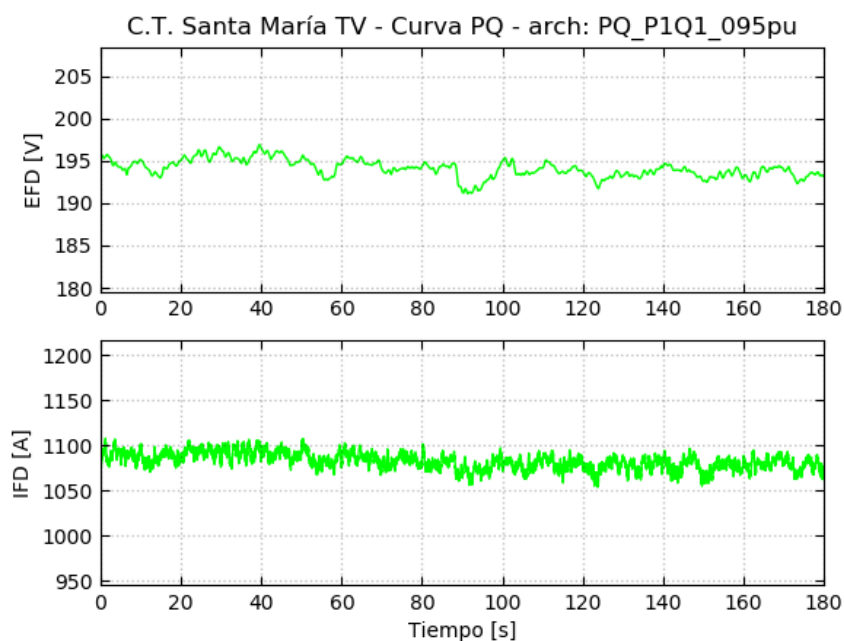


Figura 7.18 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q2

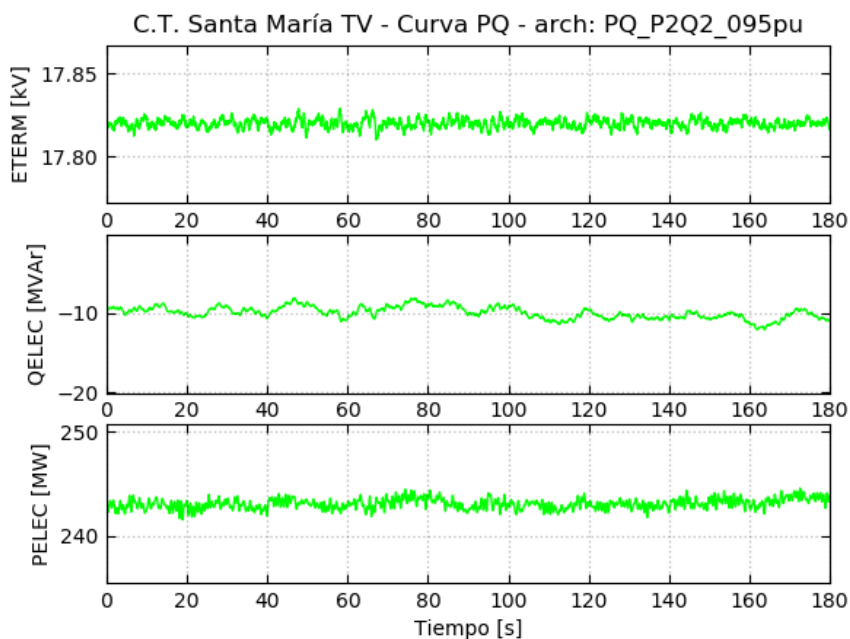


Figura 7.19 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

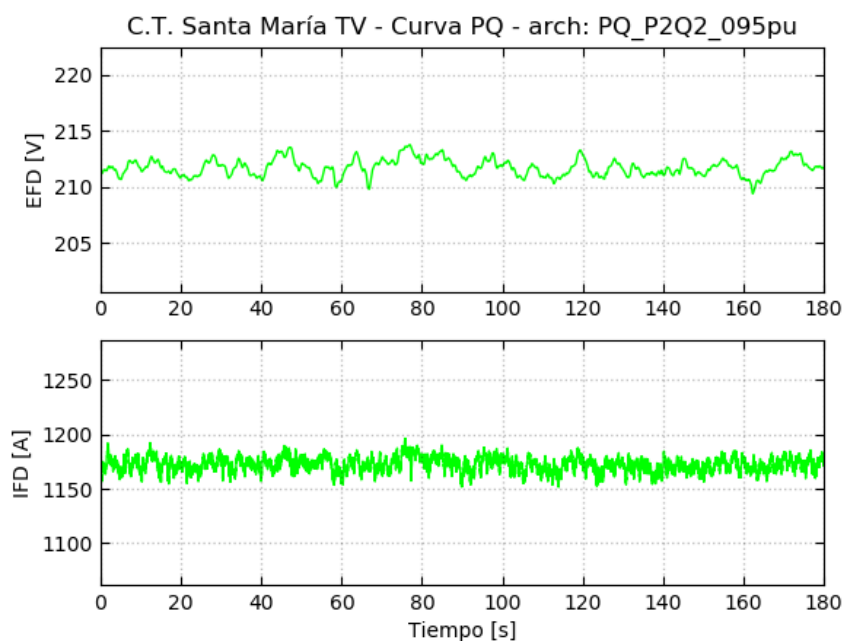


Figura 7.20 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q3

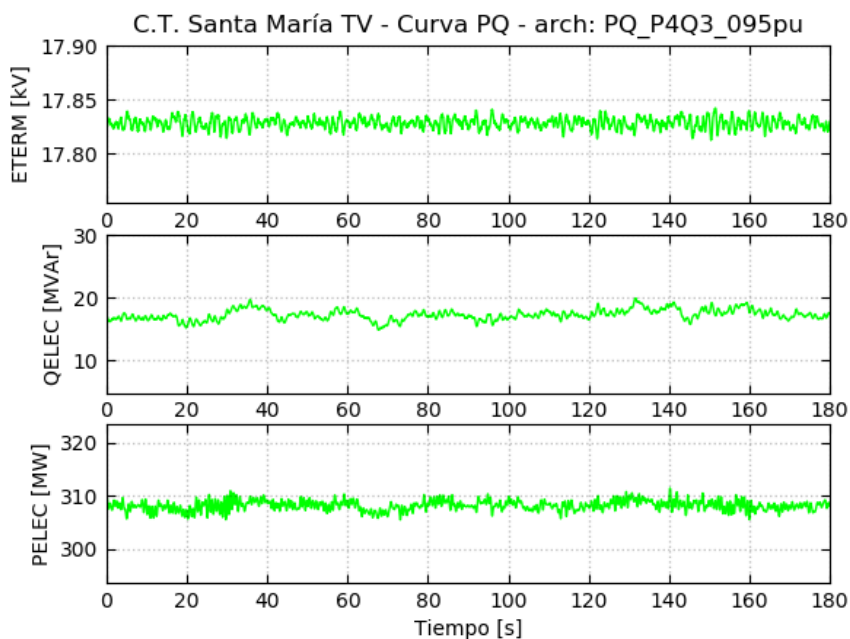


Figura 7.21 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

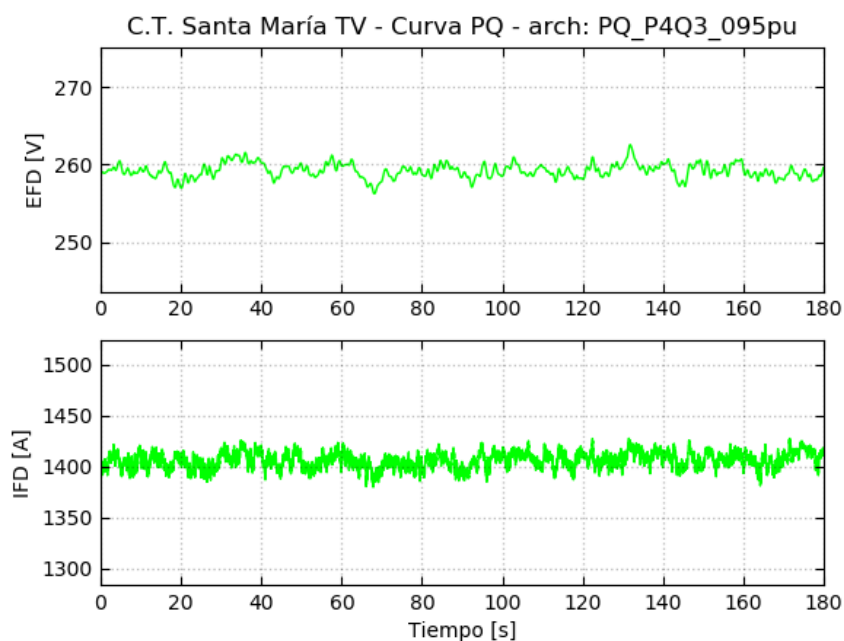


Figura 7.22 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q4

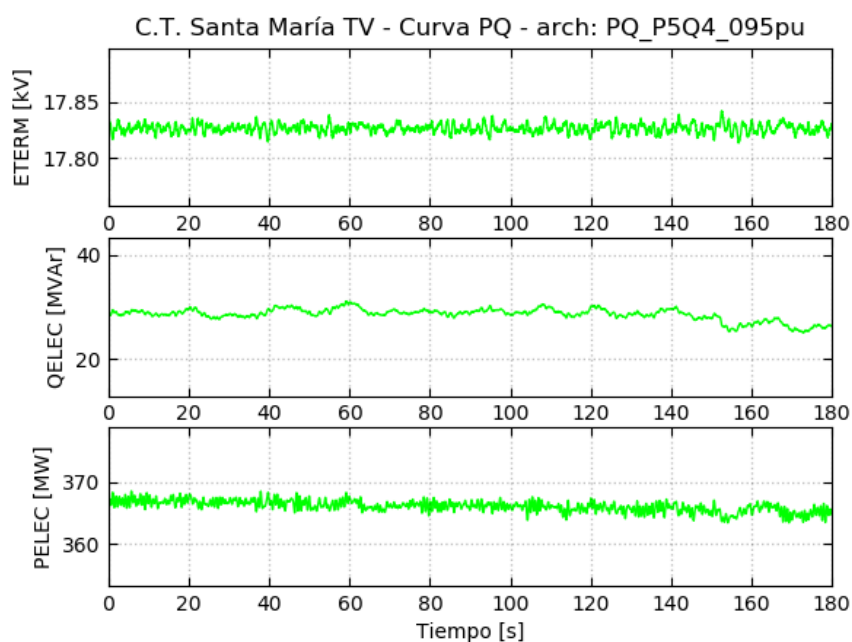


Figura 7.23 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

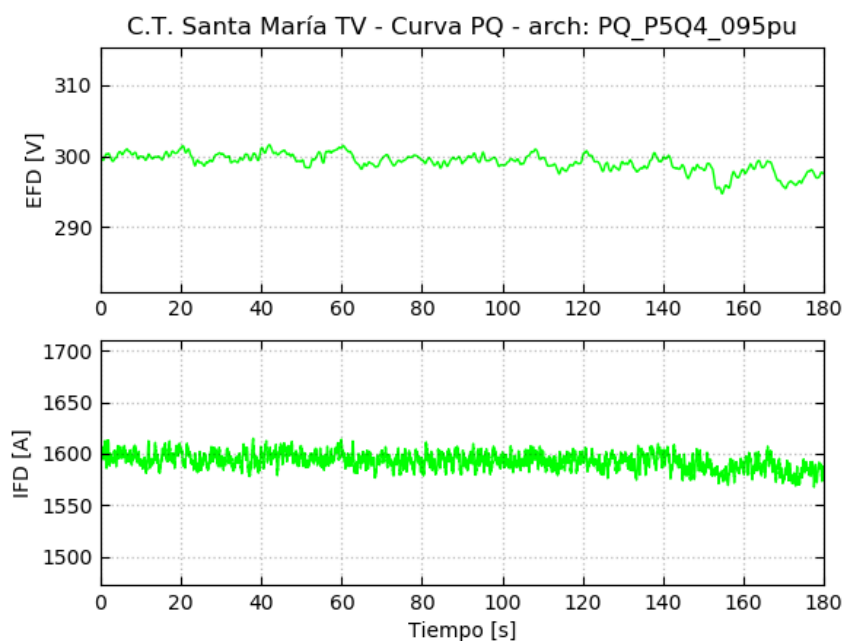


Figura 7.24 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q5

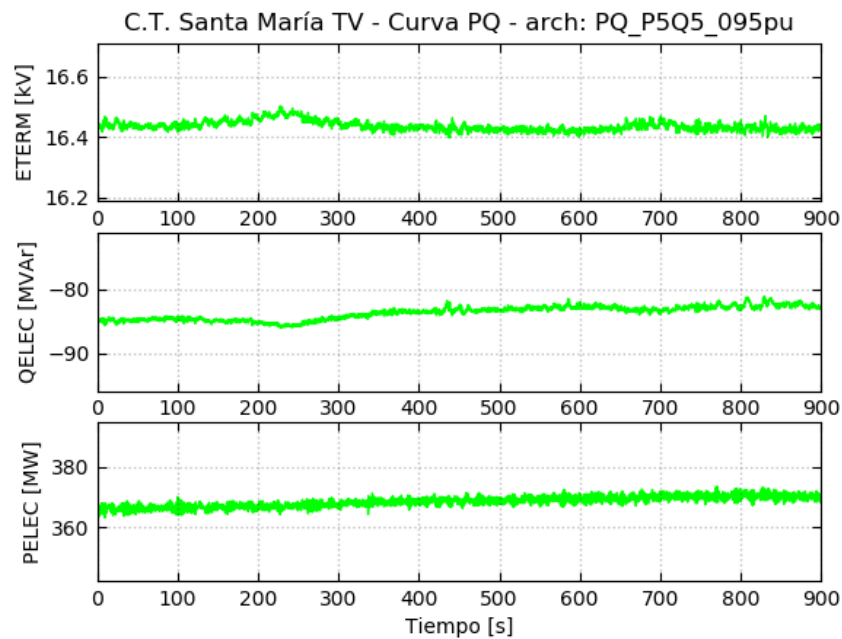


Figura 7.25 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

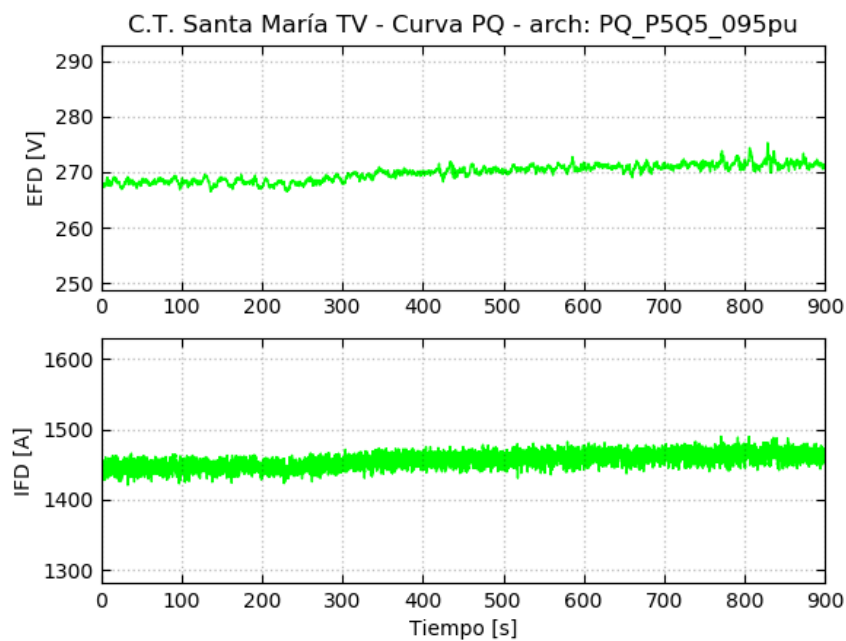


Figura 7.26 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q6

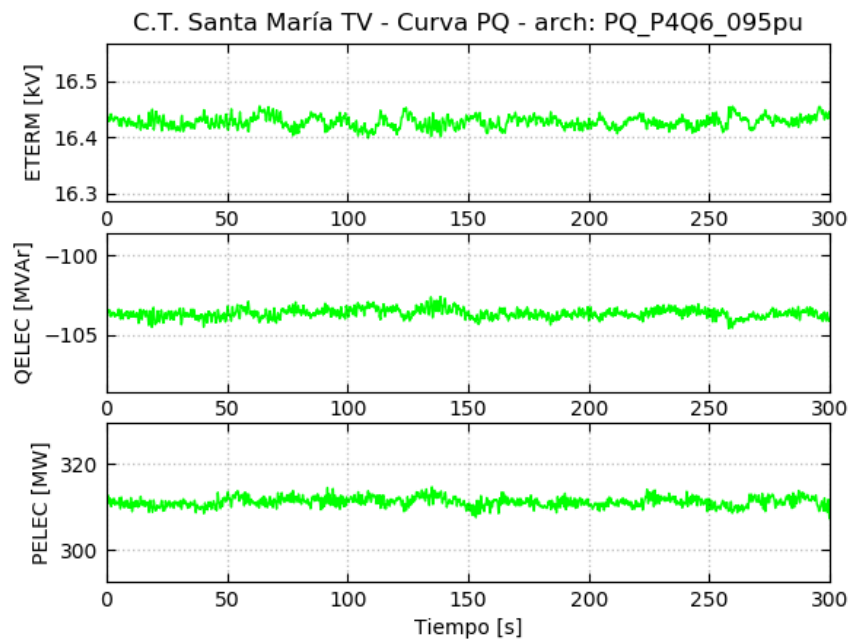


Figura 7.27 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

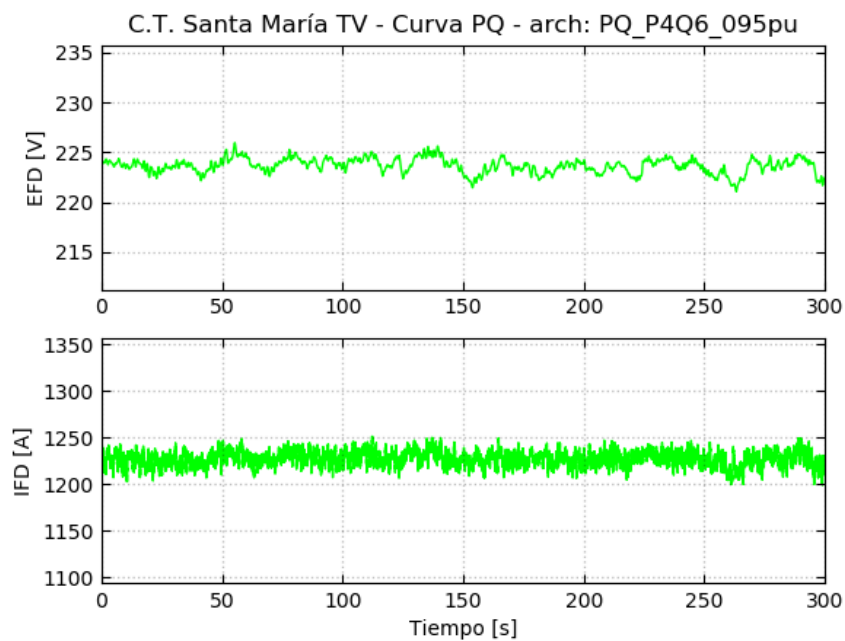


Figura 7.28 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q7

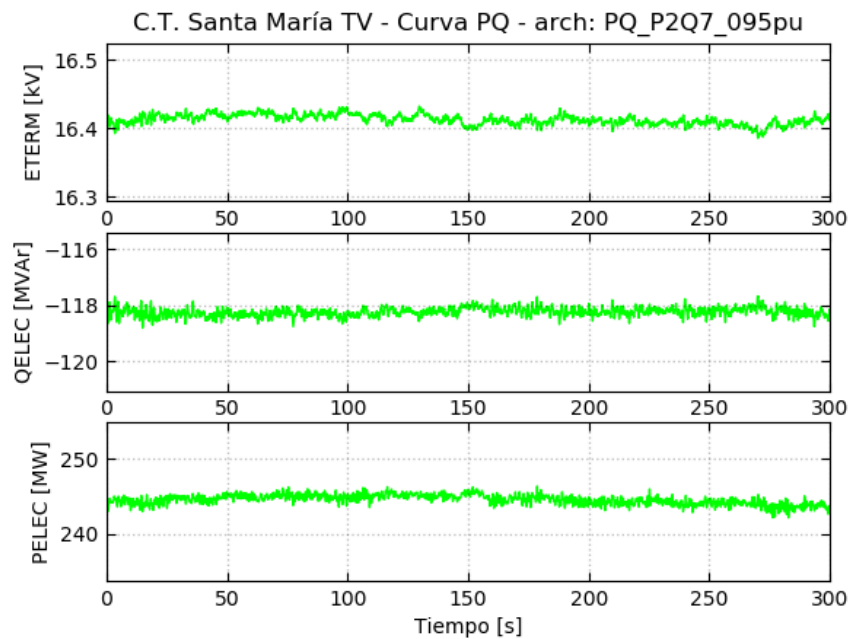


Figura 7.29 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

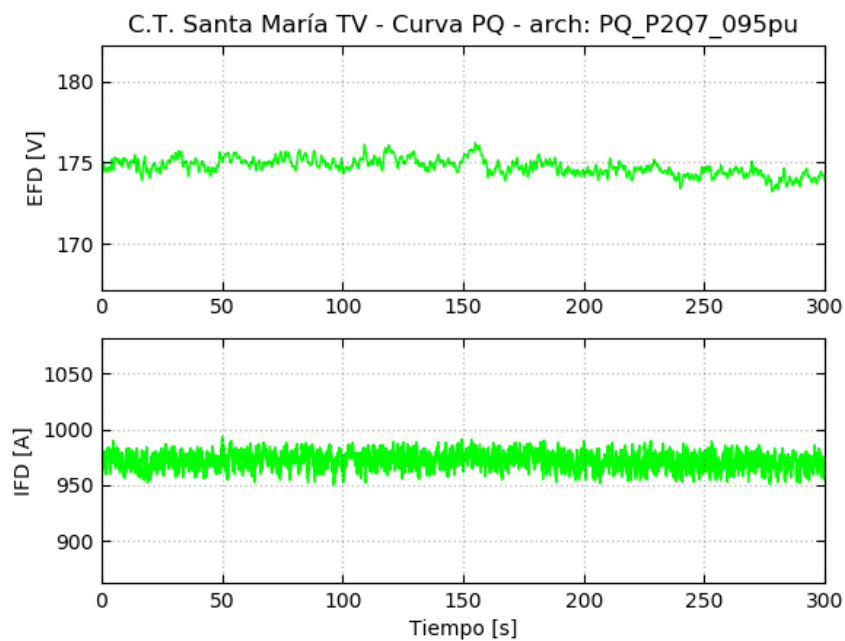


Figura 7.30 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P1_CT-Q8

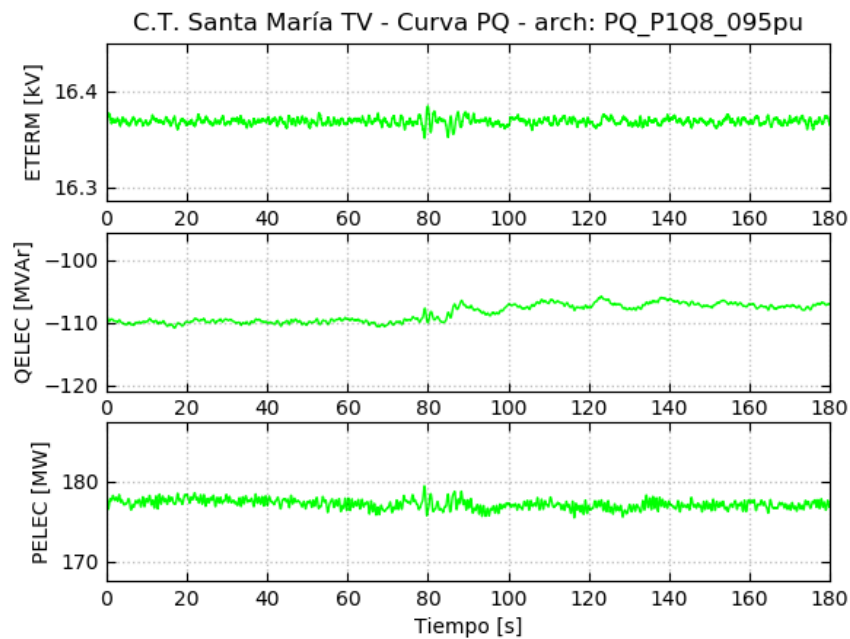


Figura 7.31 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

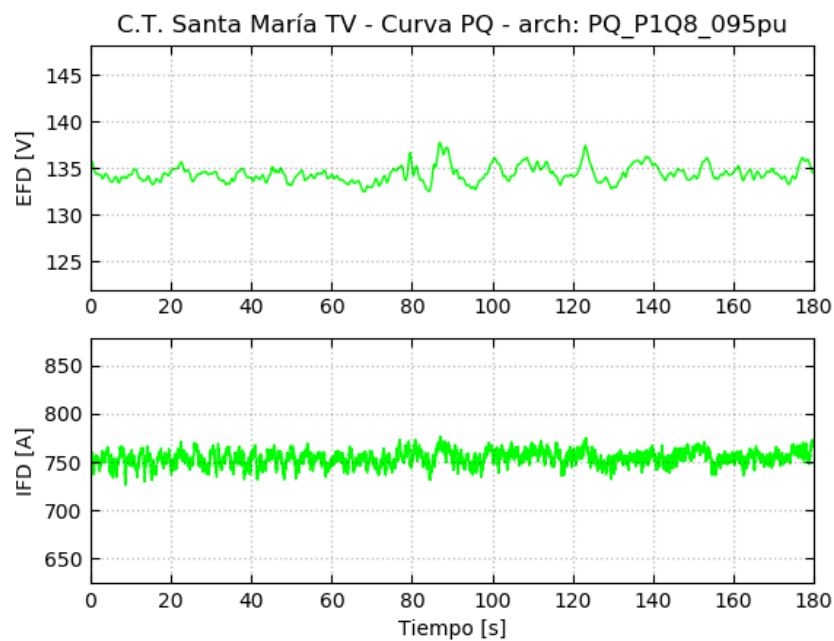


Figura 7.32 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



7.1.3 Verificación curva PQ @ 1.0 pu

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 1.0 pu desde el lado sobreexcitado hacia la parte subexcitada.



Punto P1_CT-Q1

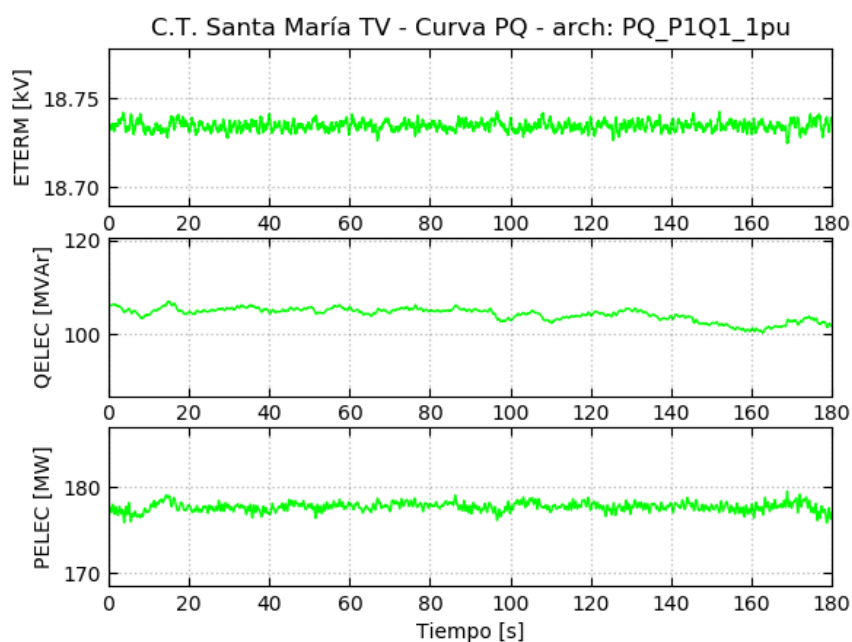


Figura 7.33 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

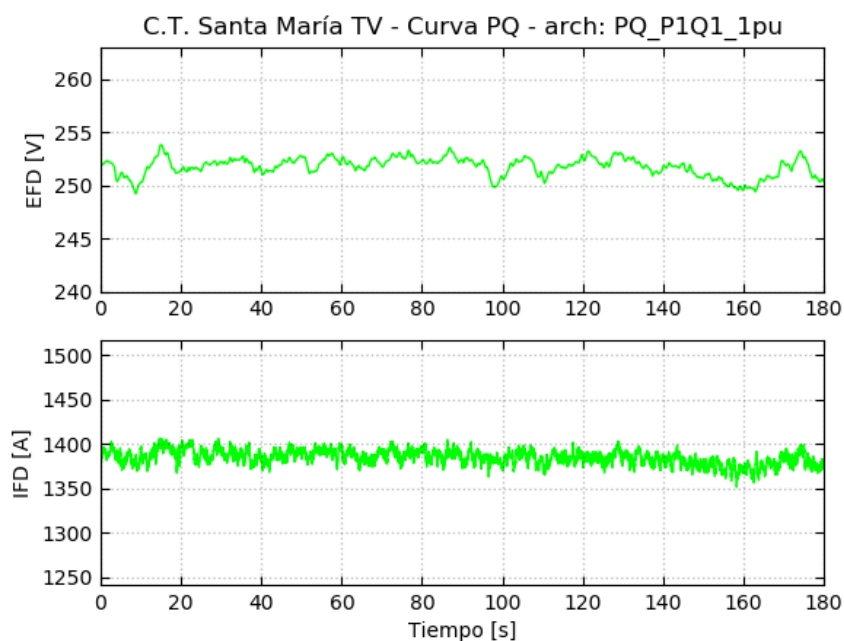


Figura 7.34 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q2

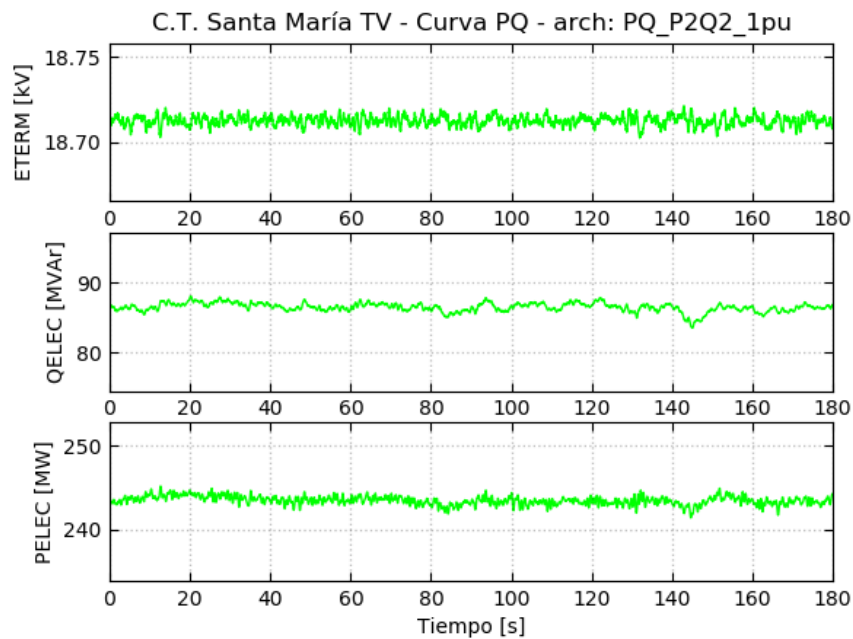


Figura 7.35 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

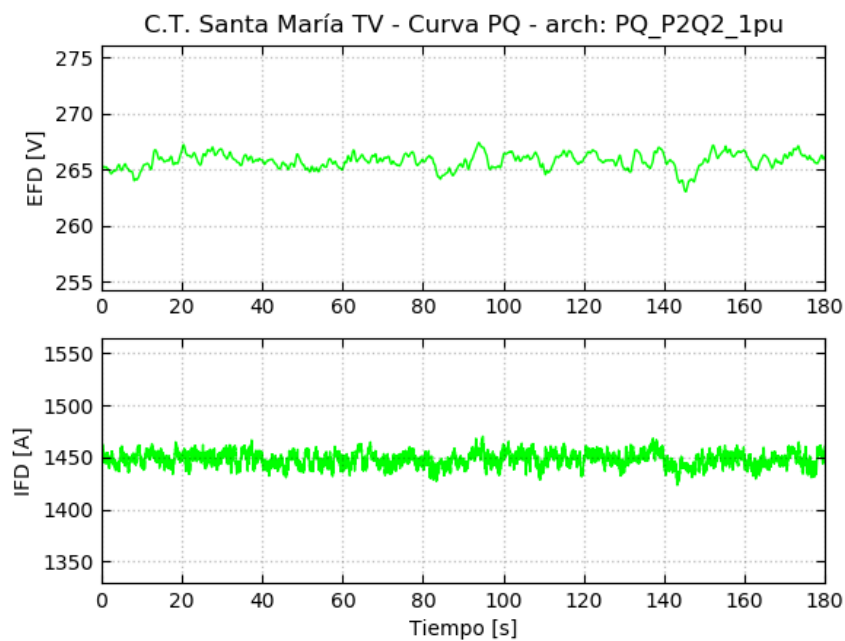


Figura 7.36 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q3

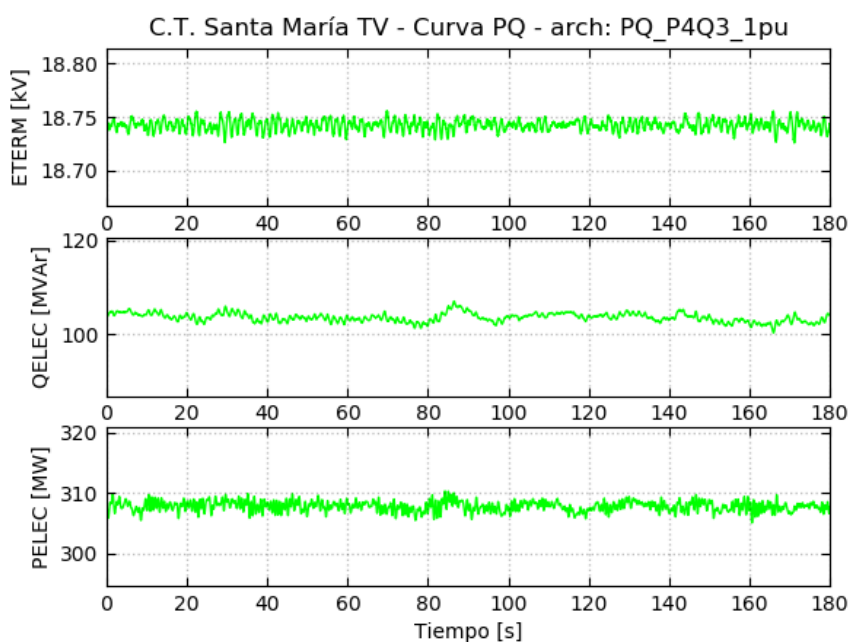


Figura 7.37 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

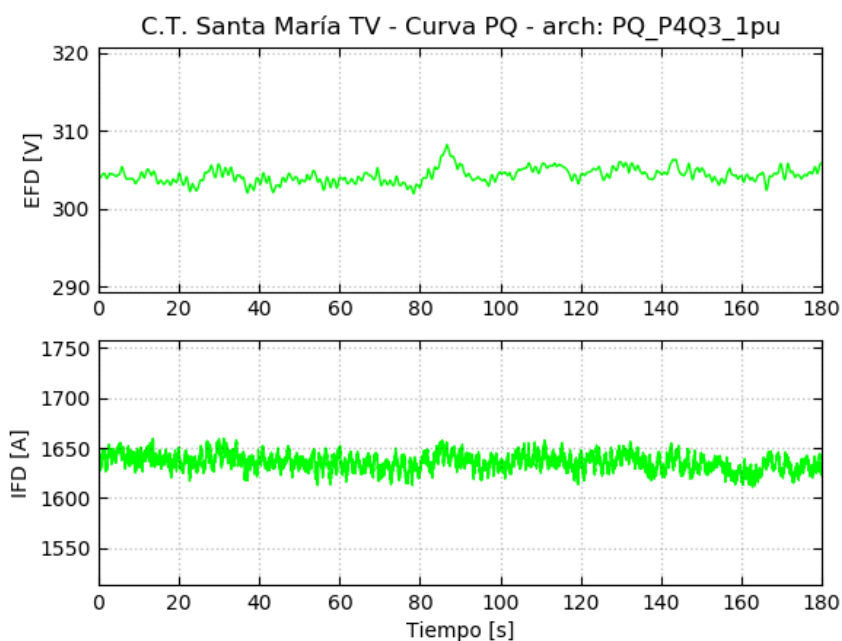


Figura 7.38 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q4

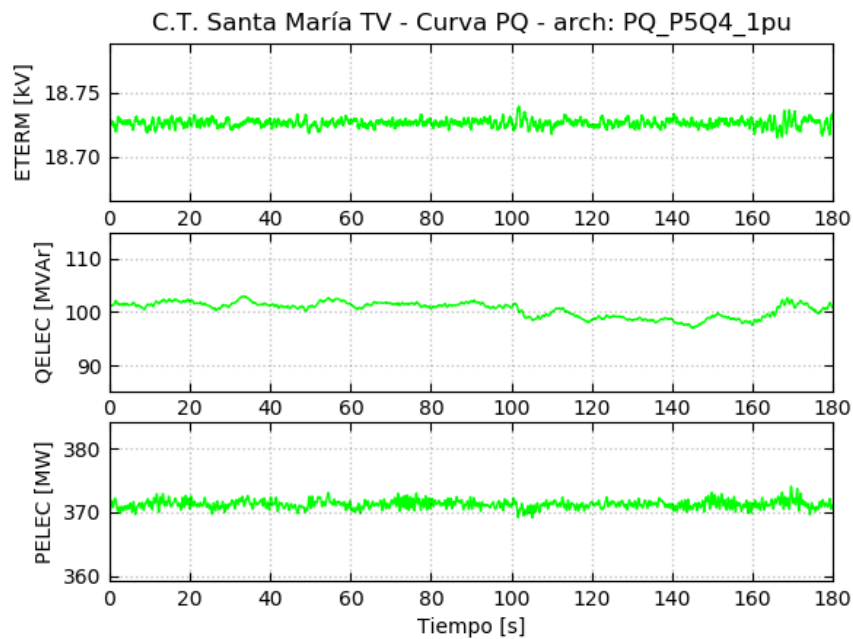


Figura 7.39 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

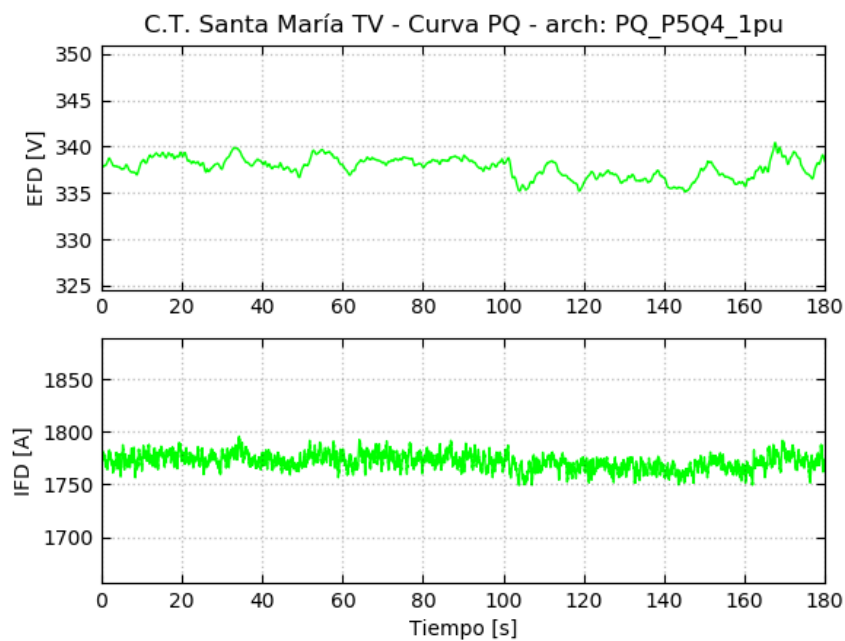


Figura 7.40 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q5

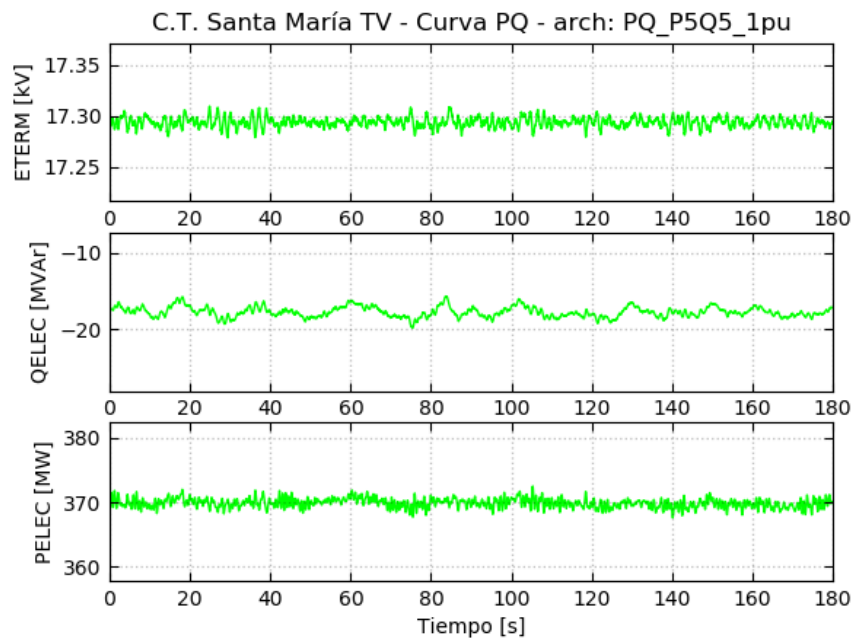


Figura 7.41 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

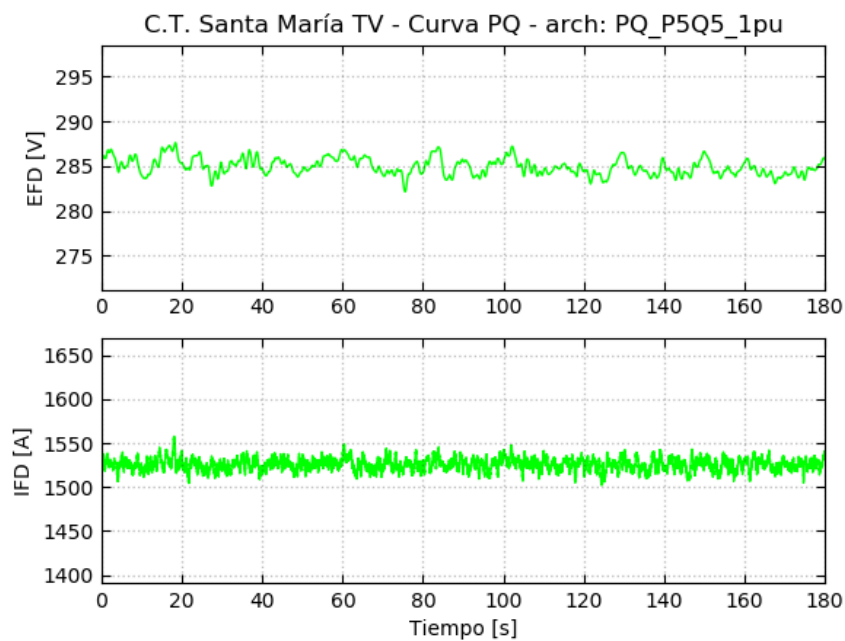


Figura 7.42 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q6

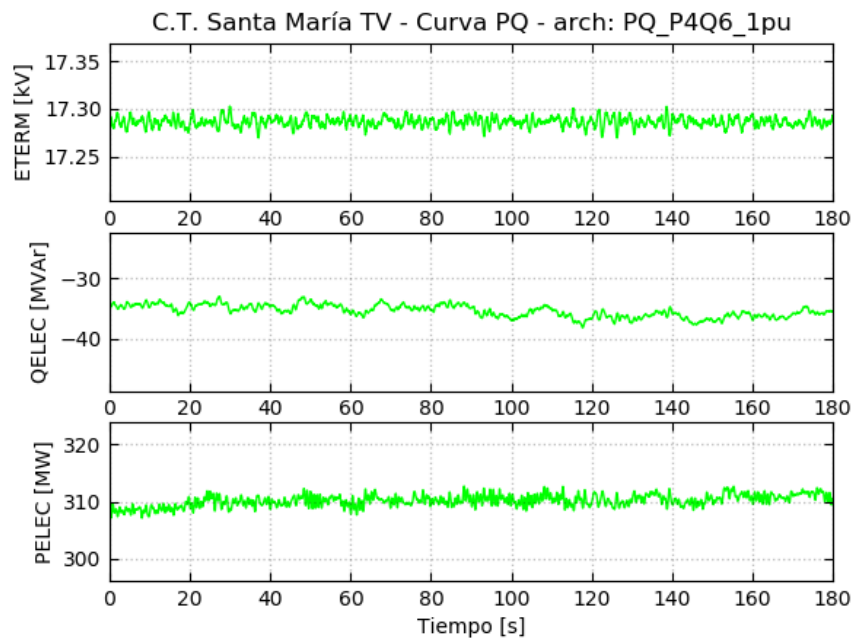


Figura 7.43 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

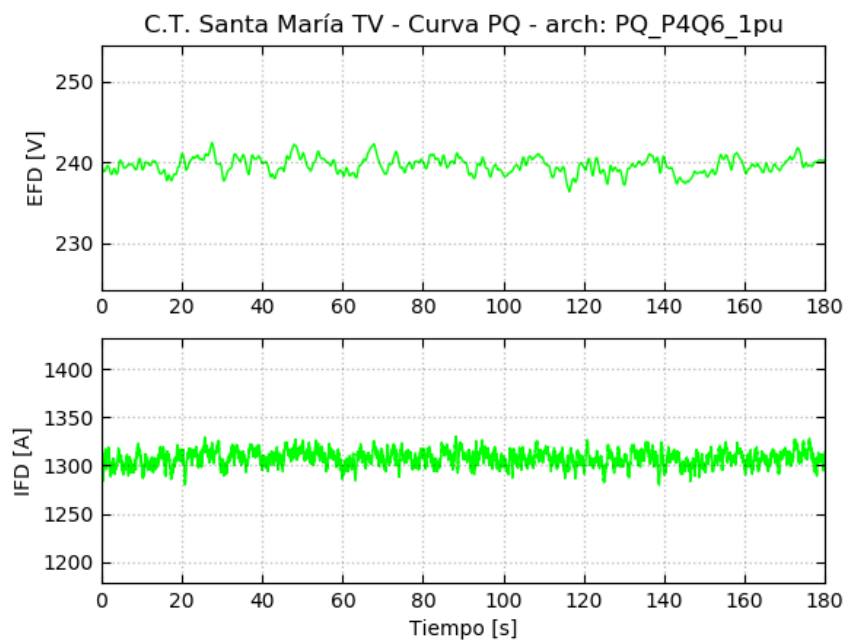


Figura 7.44 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q7

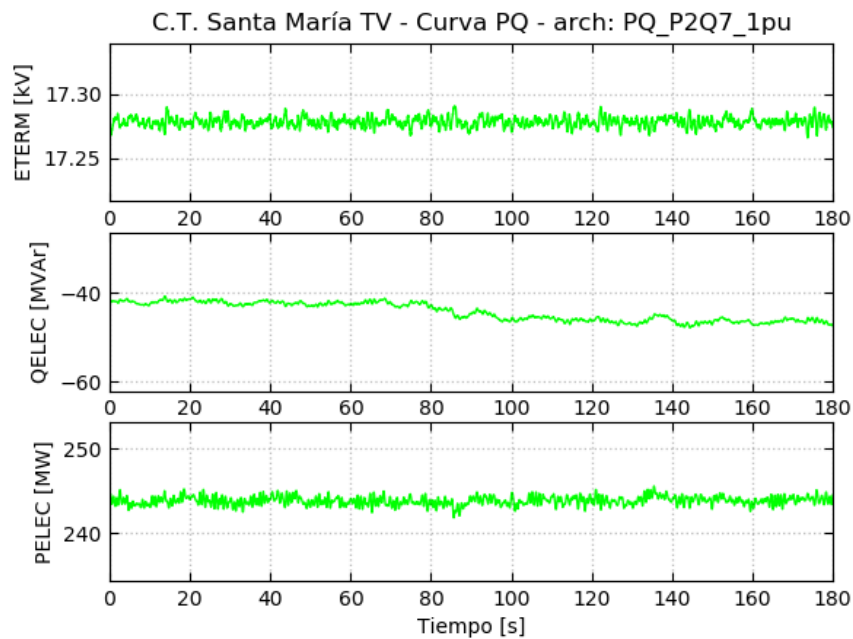


Figura 7.45 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

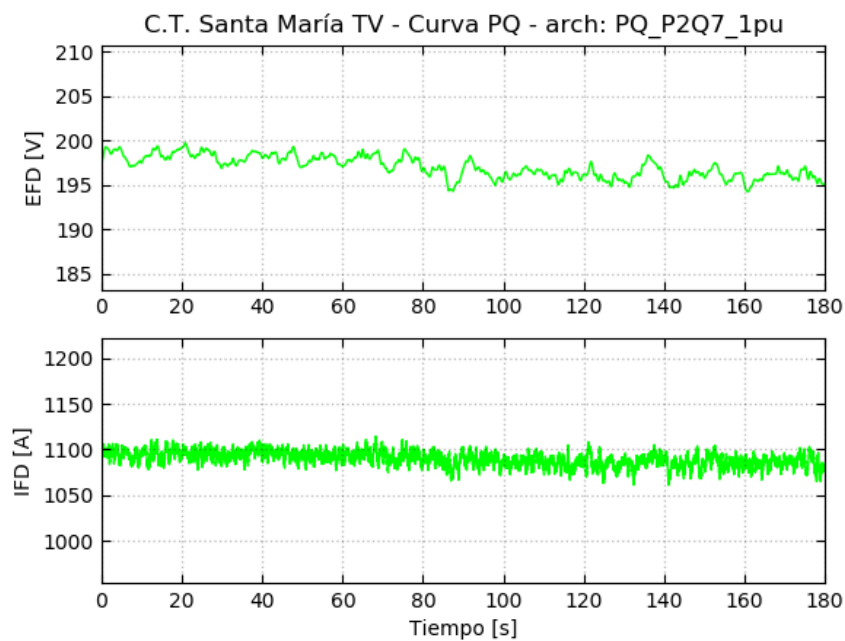


Figura 7.46 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P1_CT-Q8

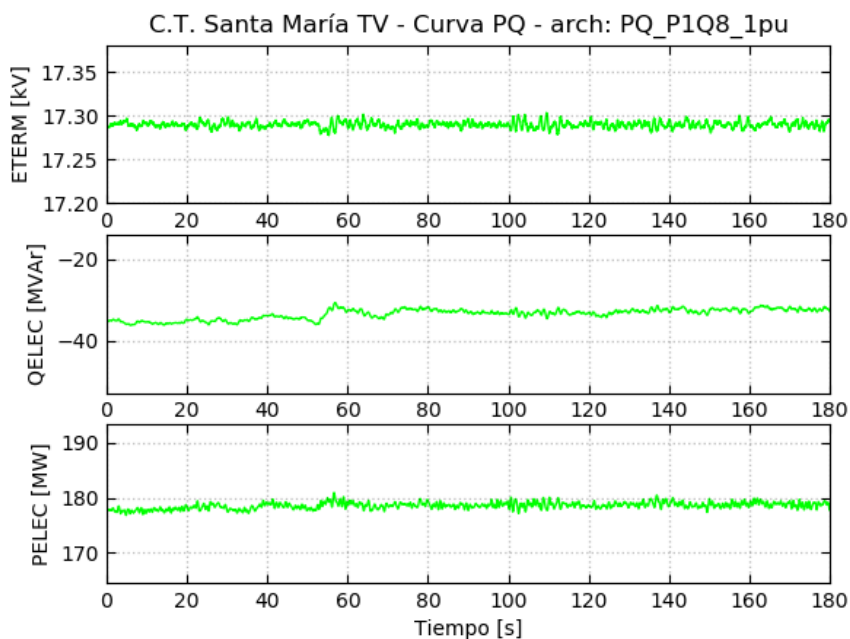


Figura 7.47 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

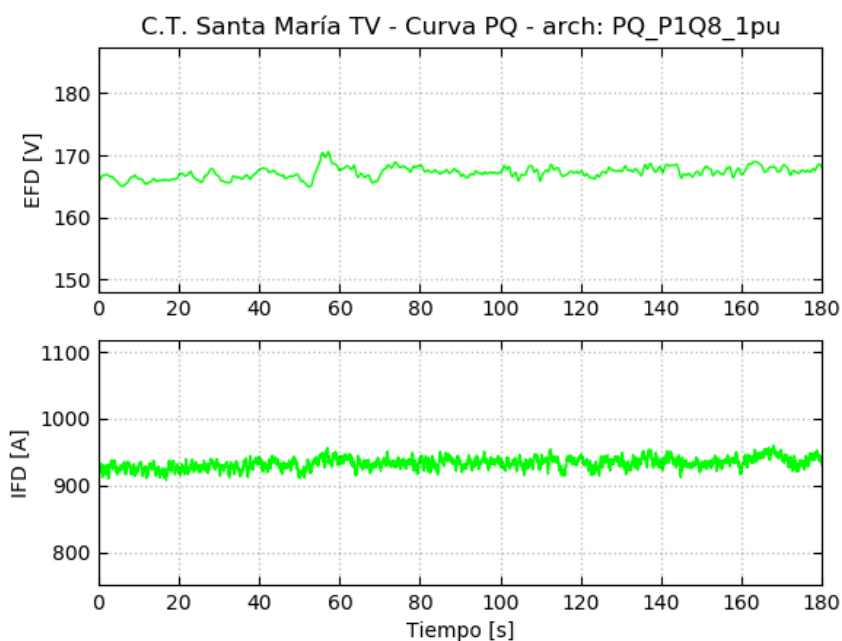


Figura 7.48 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



7.1.4 Verificación curva PQ @ 1.05 pu

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 pu desde el lado sobreexcitado hacia la parte subexcitada.



Punto P1_CT-Q1

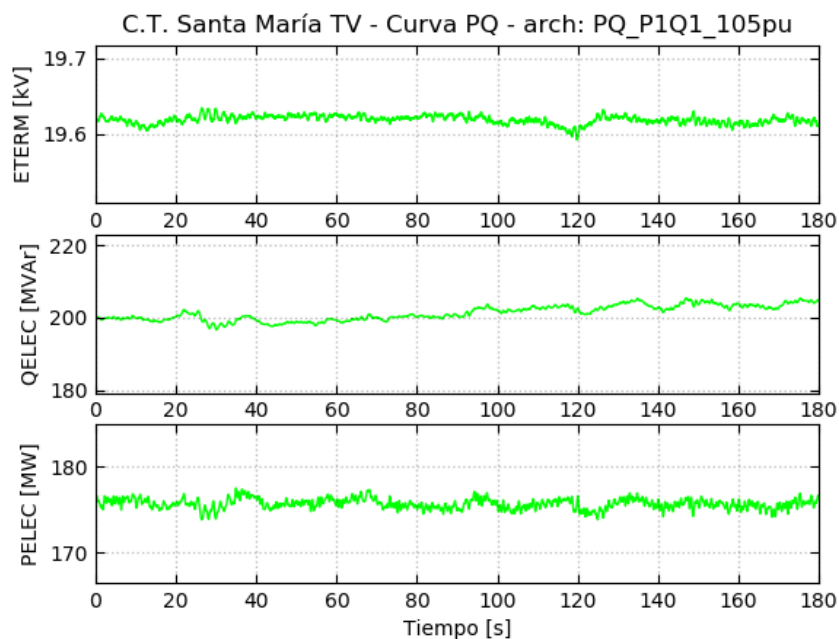


Figura 7.49 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

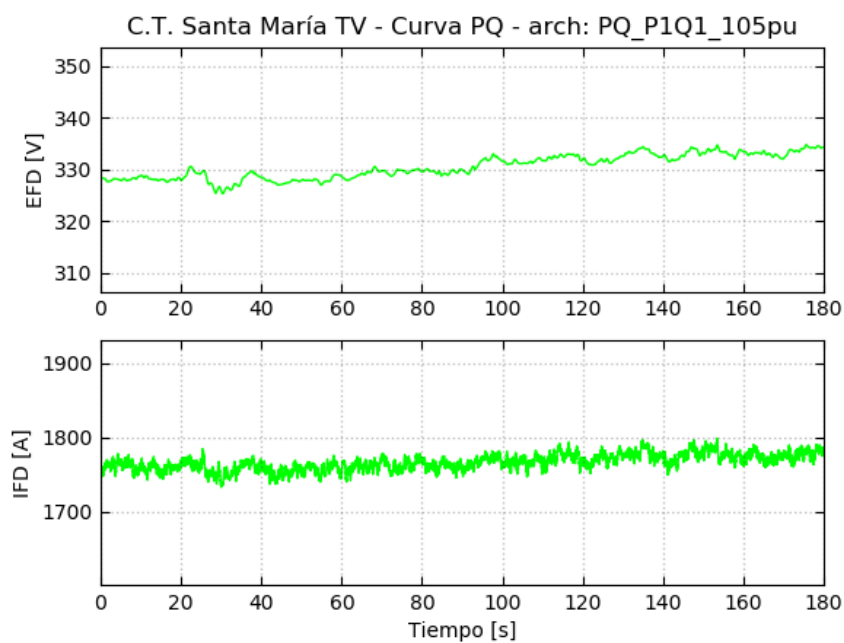


Figura 7.50 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q2

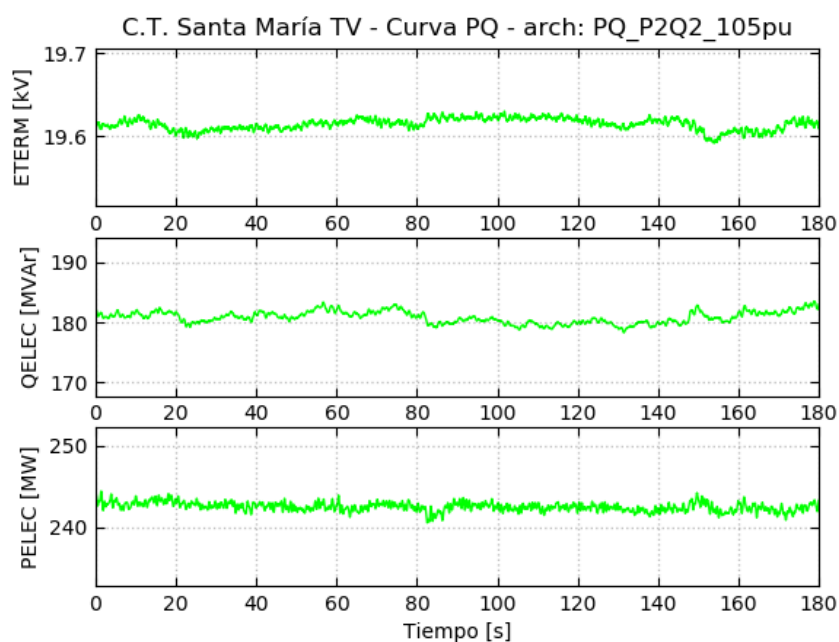


Figura 7.51 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

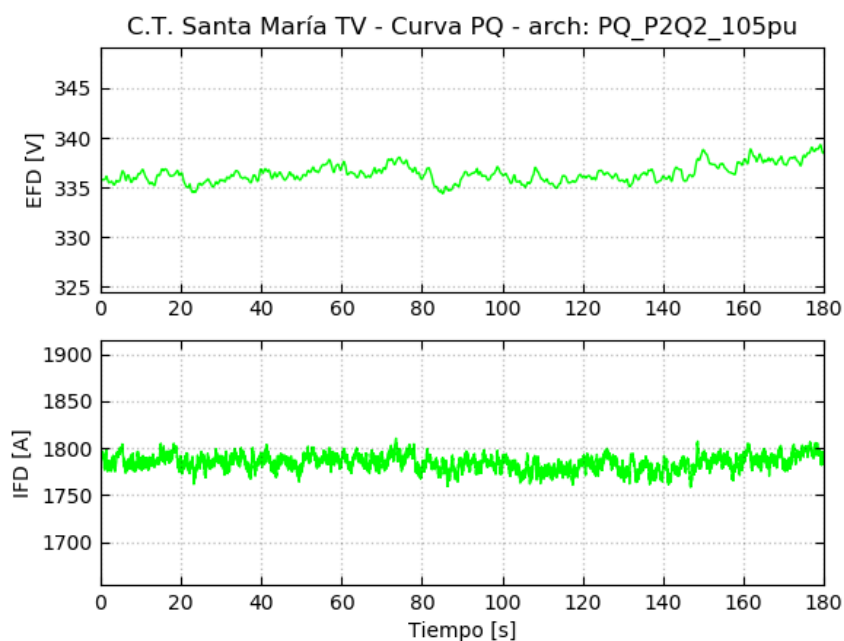


Figura 7.52 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q3

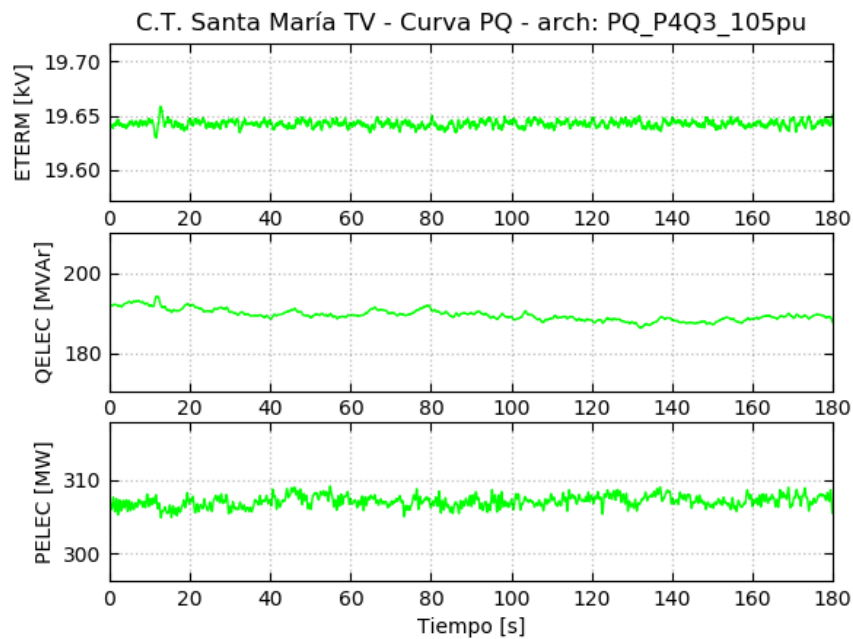


Figura 7.53 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

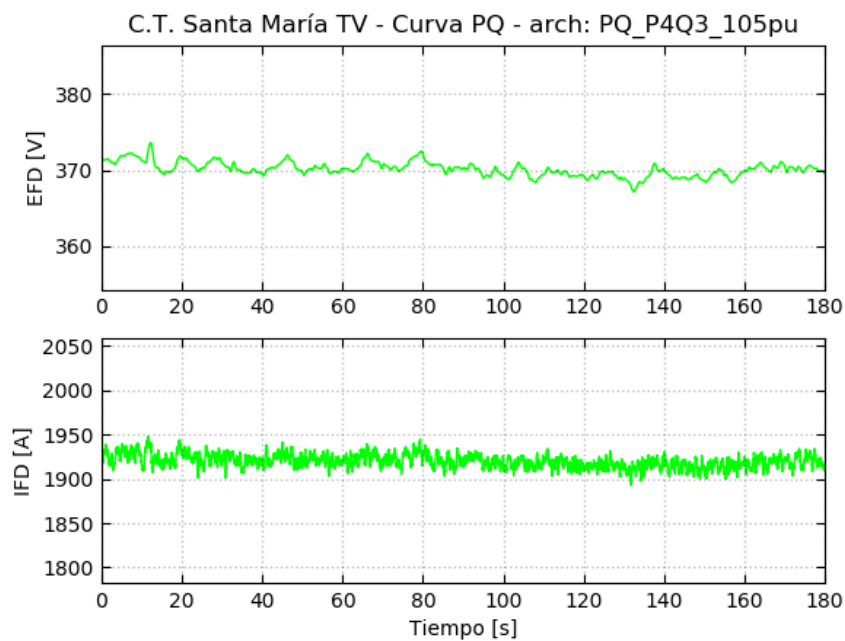


Figura 7.54 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q4

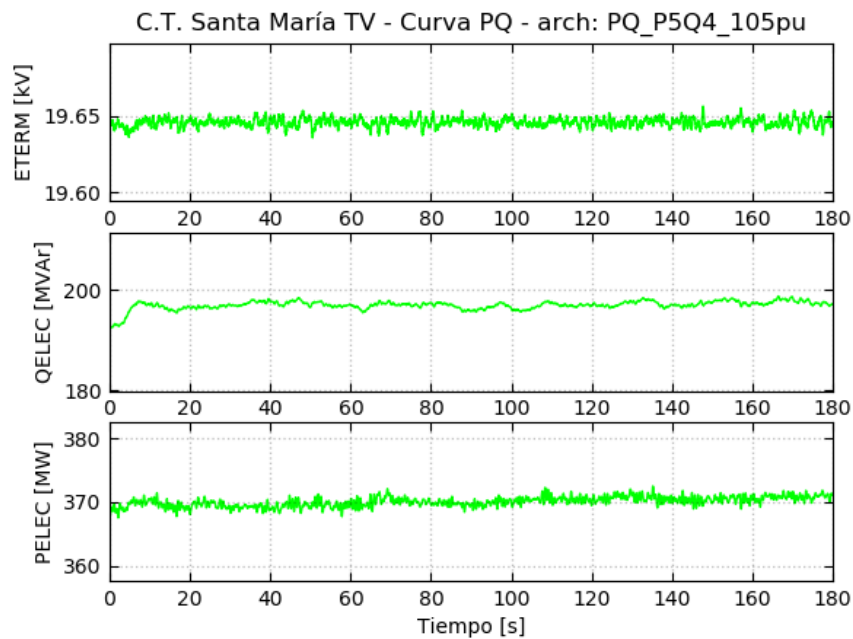


Figura 7.55 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

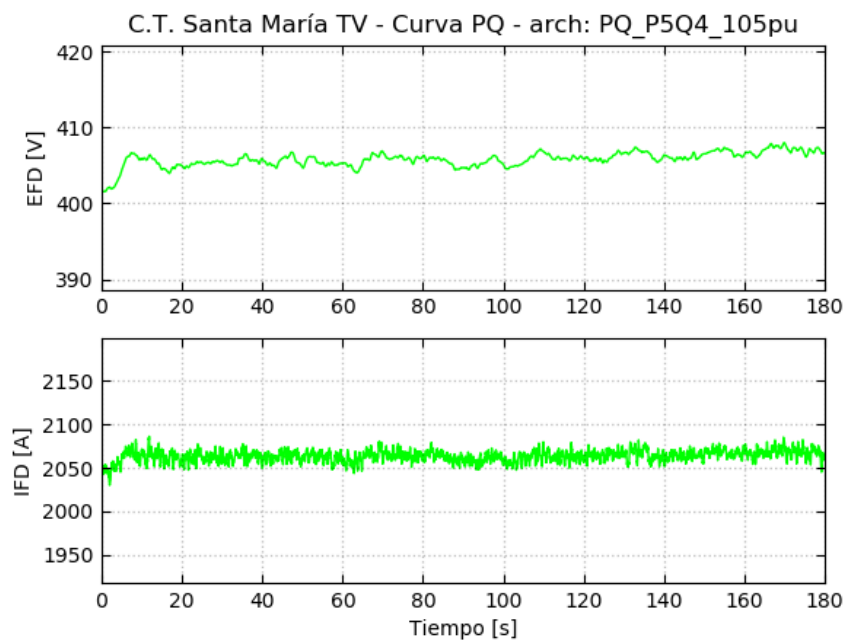


Figura 7.56 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q5

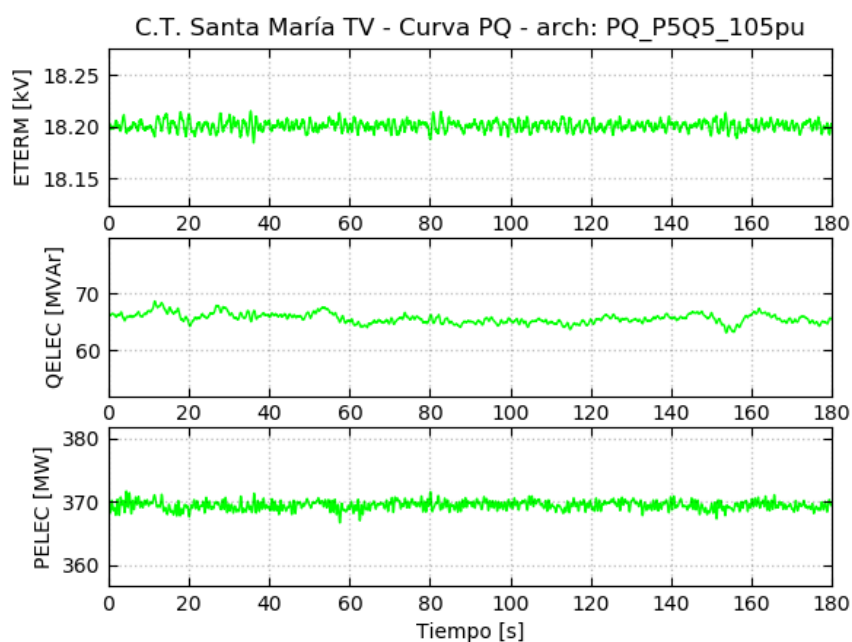


Figura 7.57 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

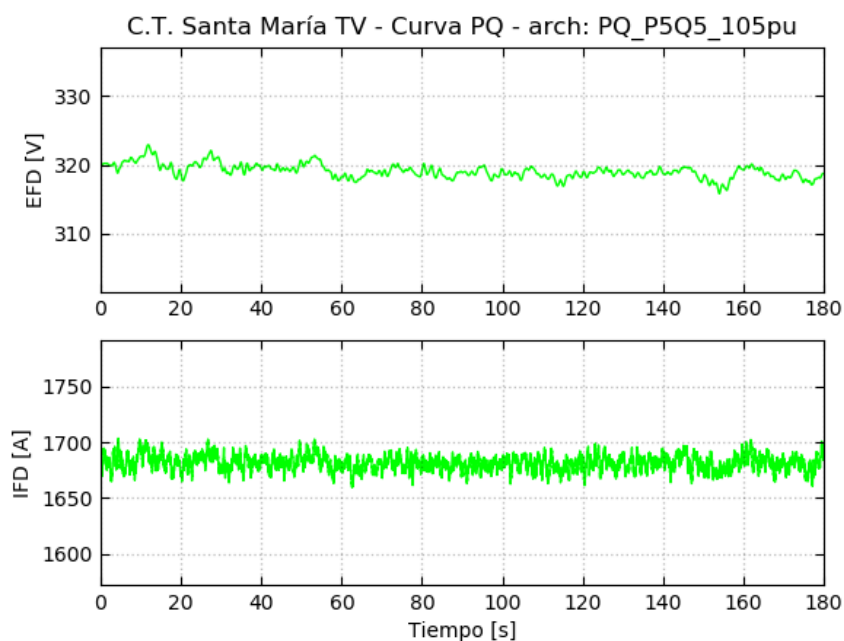


Figura 7.58 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q6

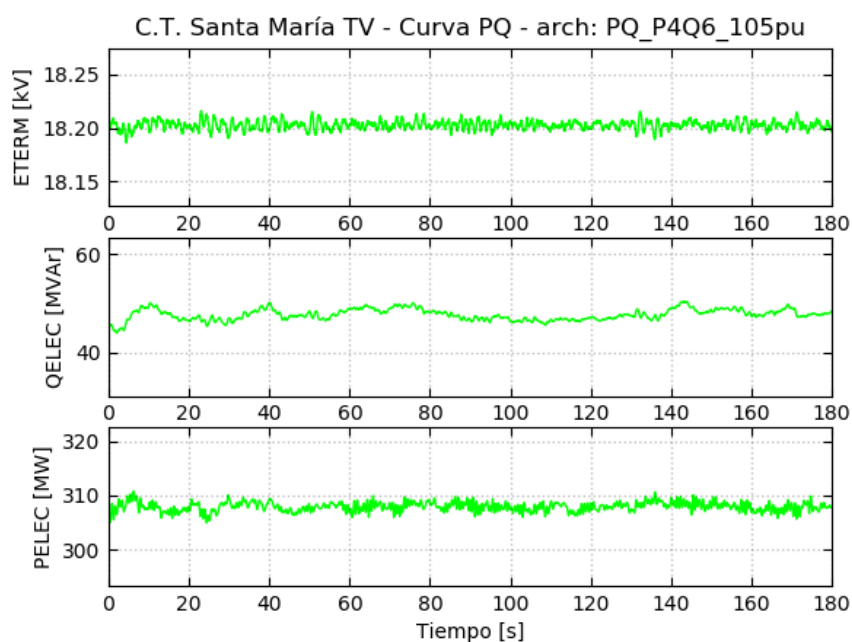


Figura 7.59 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

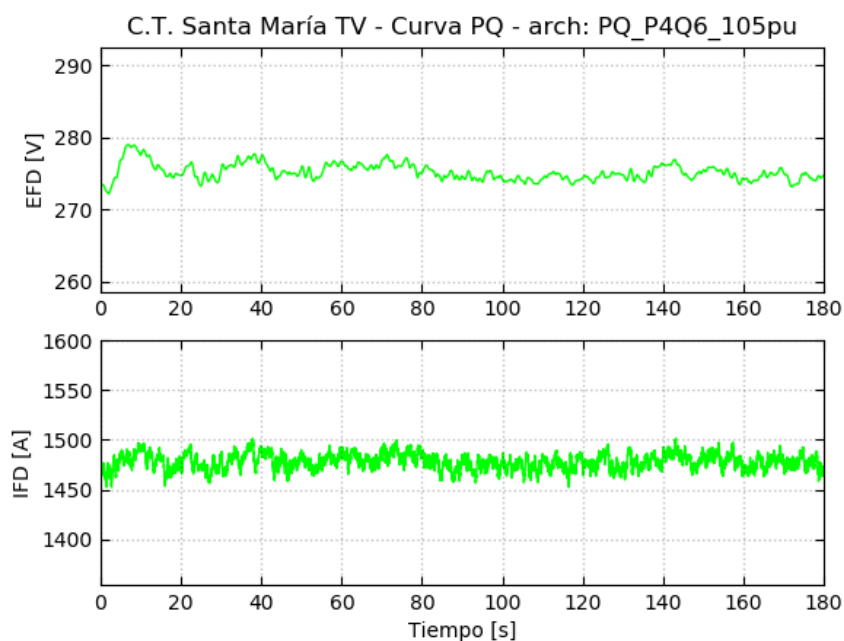


Figura 7.60 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q7

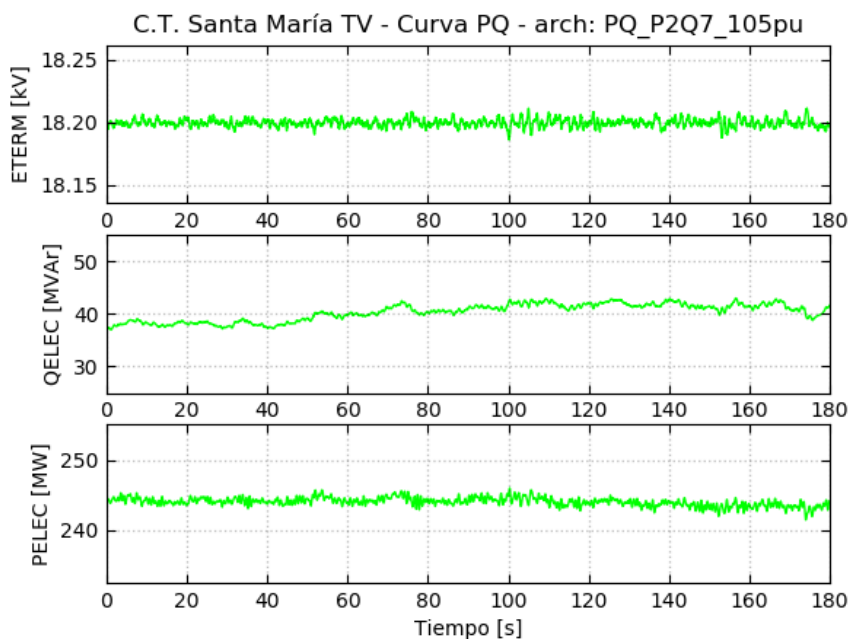


Figura 7.61 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

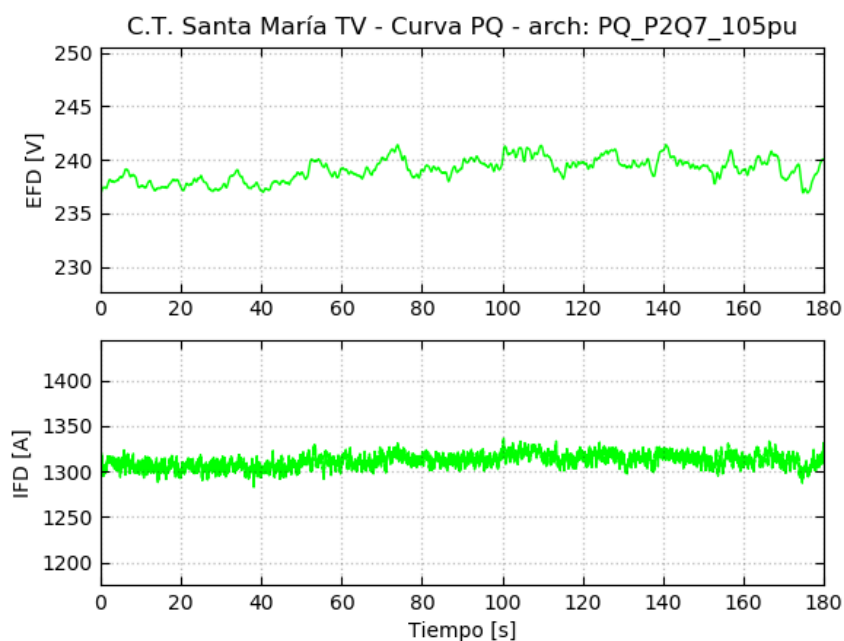


Figura 7.62 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P1_CT-Q8

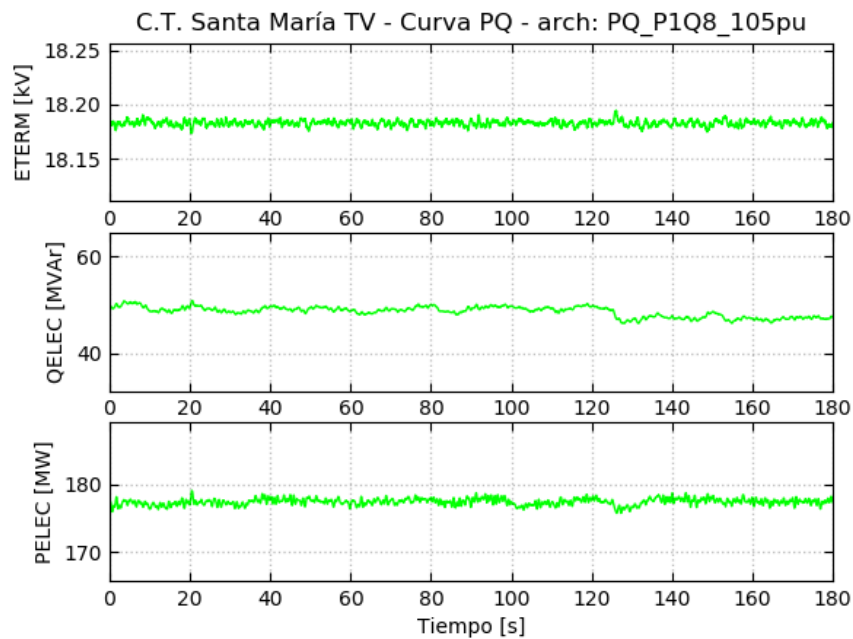


Figura 7.63 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

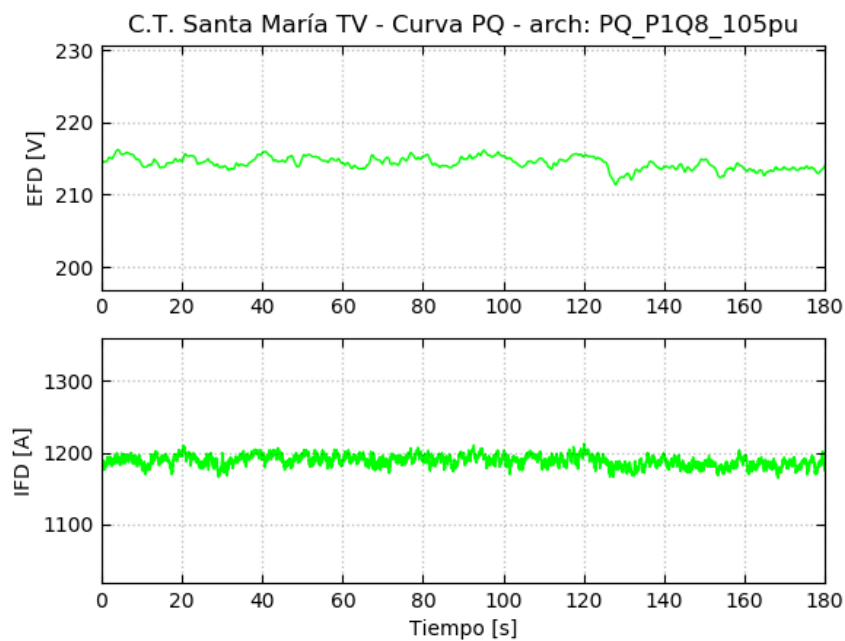


Figura 7.64 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



7.1.5 Verificación curva PQ @ 1.10 pu

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 1.10 pu desde el lado sobreexcitado hacia la parte subexcitada.



Punto P1_CT-Q1

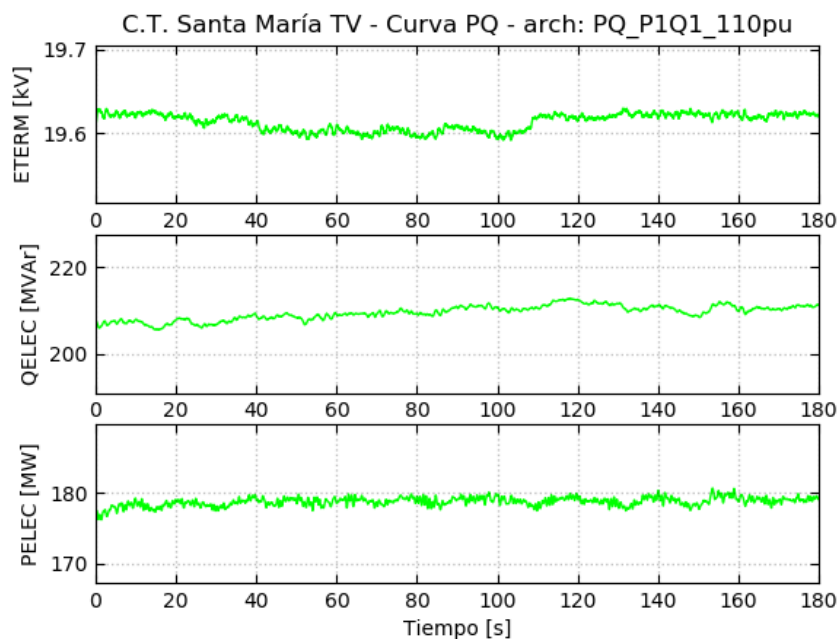


Figura 7.65 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

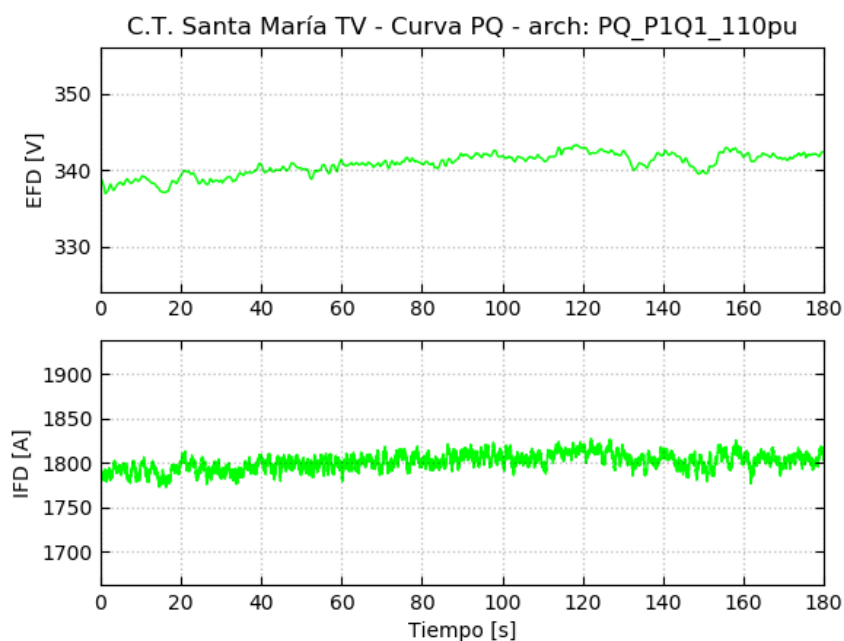


Figura 7.66 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q2

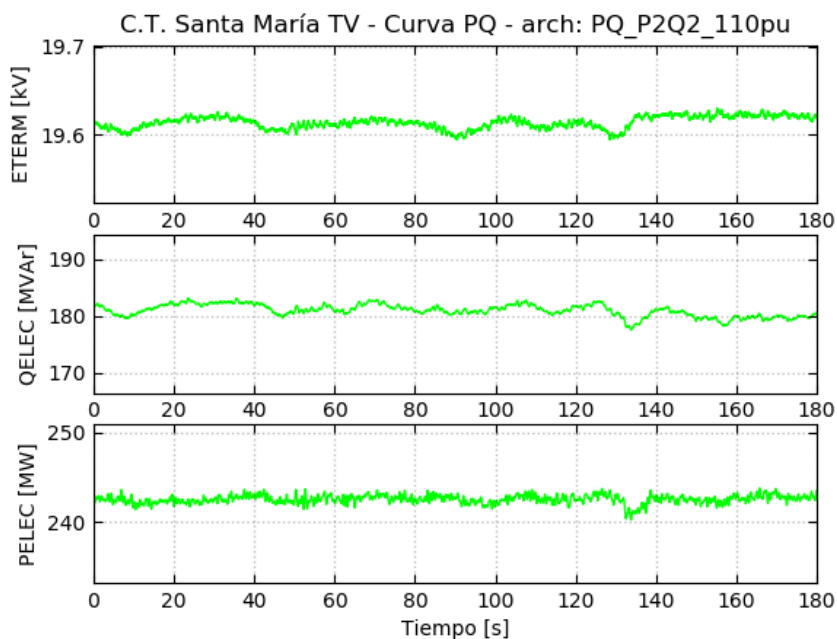


Figura 7.67 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

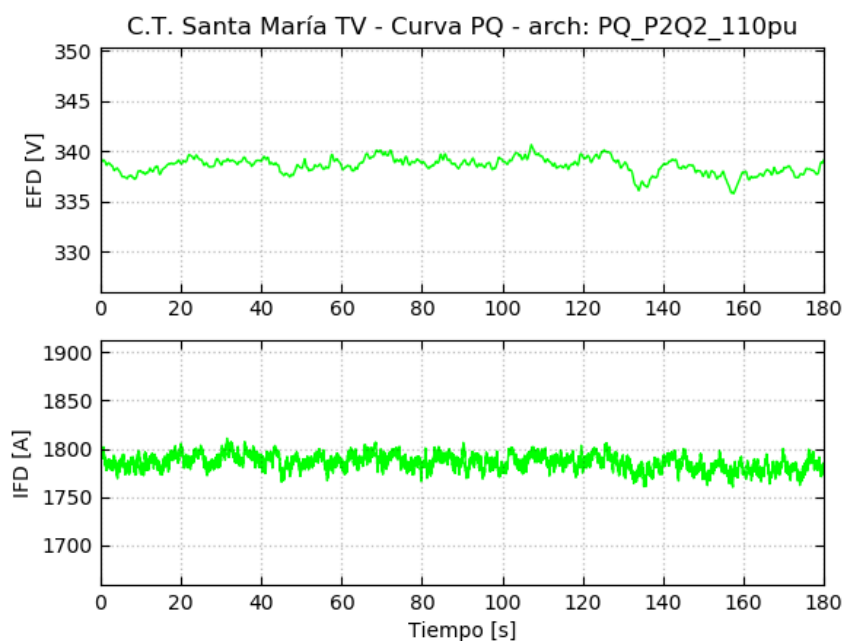


Figura 7.68 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q3

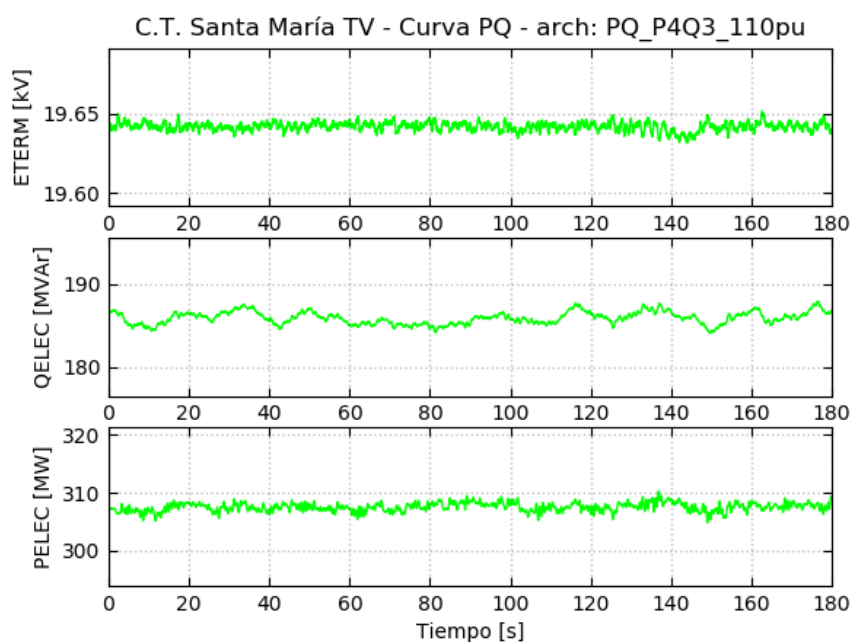


Figura 7.69 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

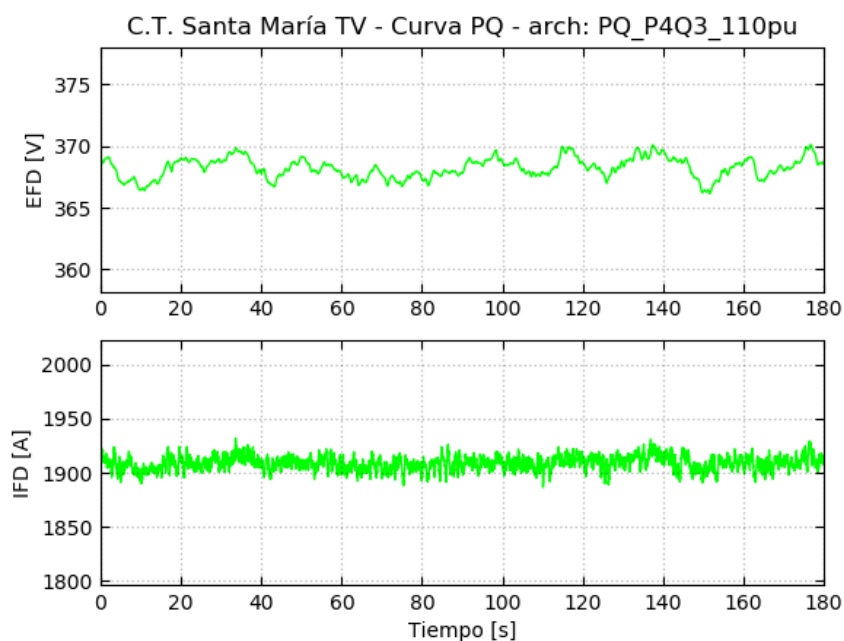


Figura 7.70 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q4

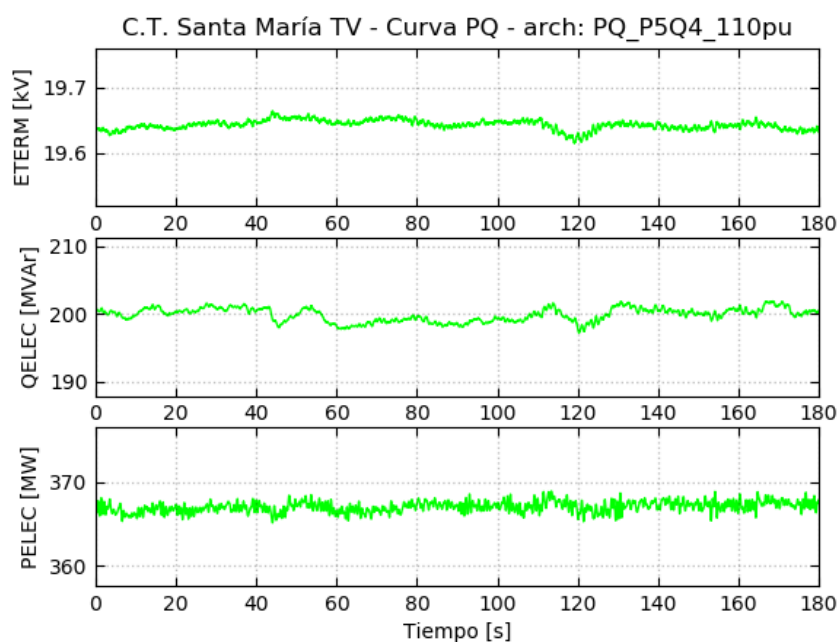


Figura 7.71 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

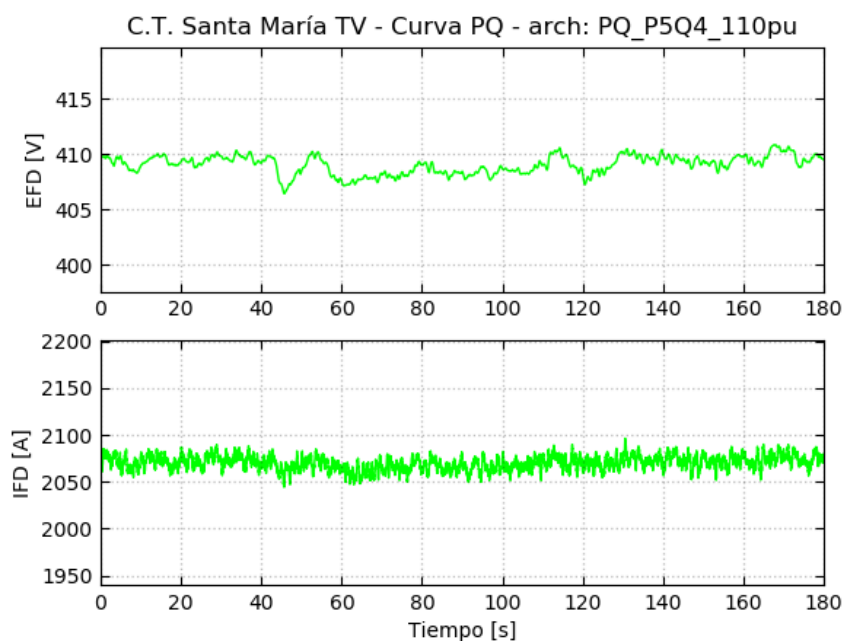


Figura 7.72 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P5_CT-Q5

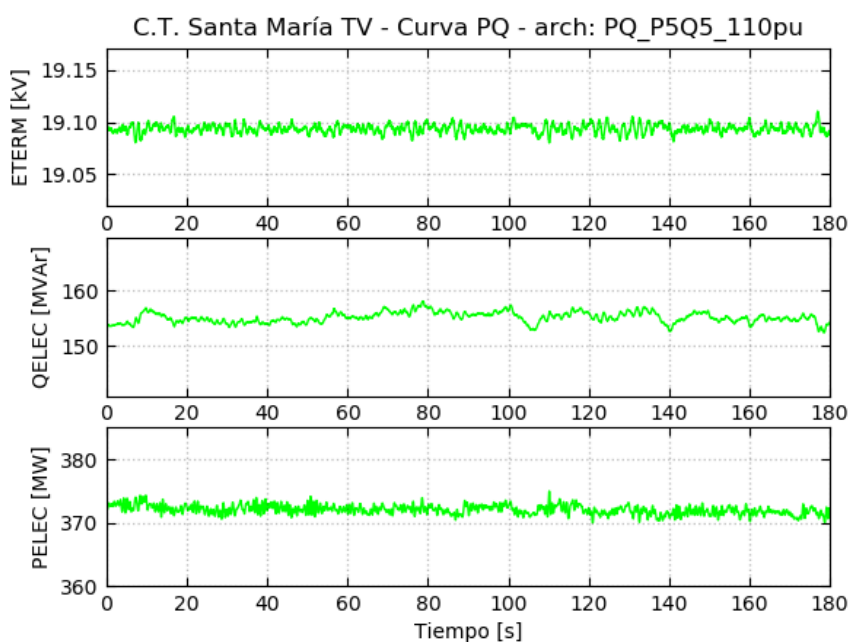


Figura 7.73 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

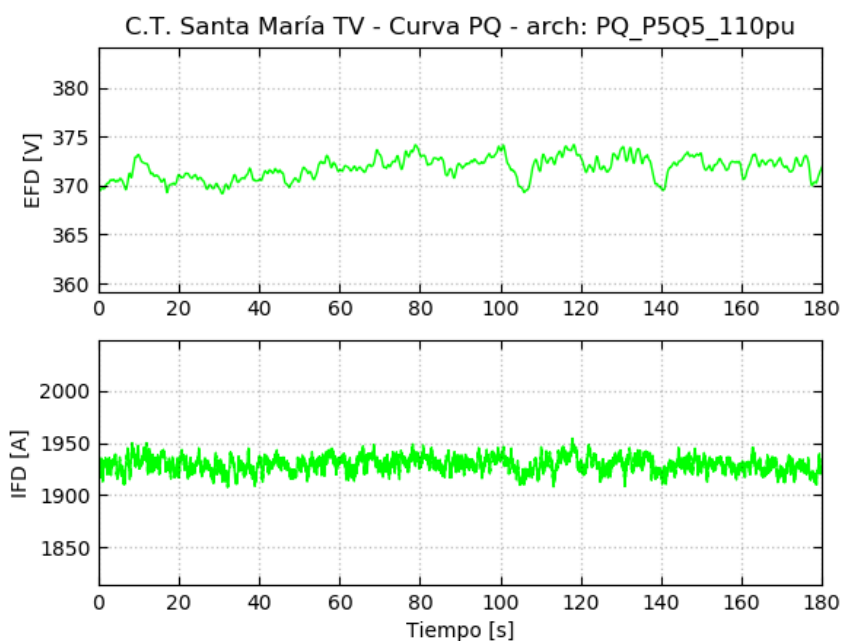


Figura 7.74 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P4_CT-Q6

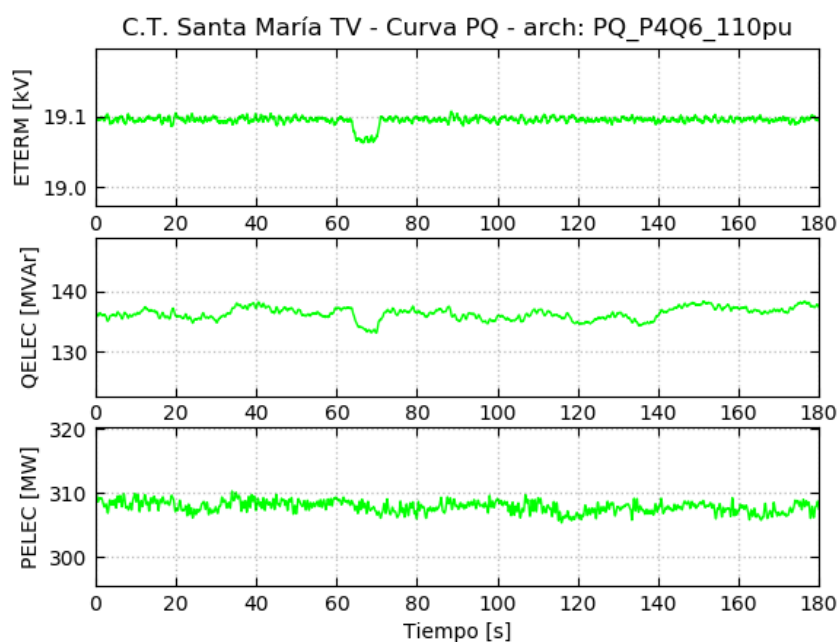


Figura 7.75 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

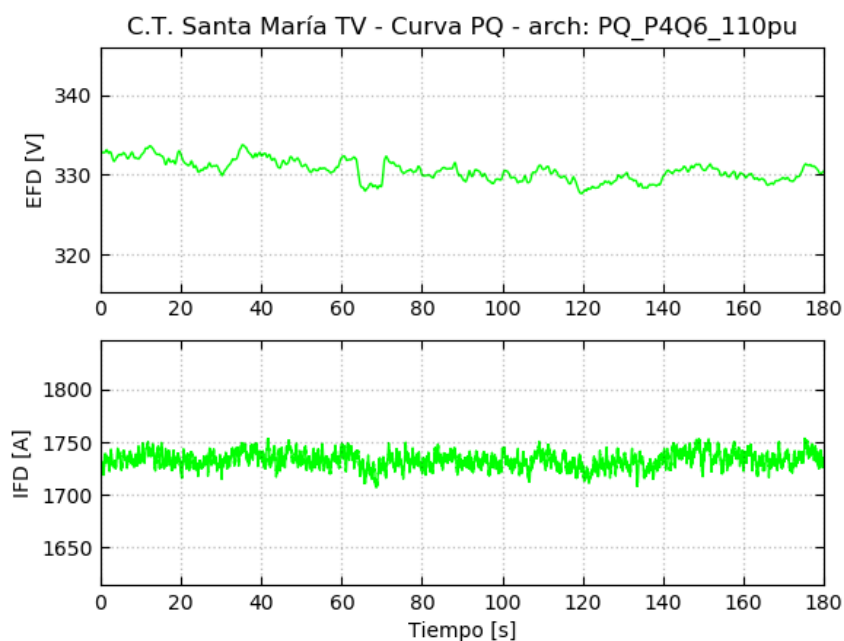


Figura 7.76 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P2_CT-Q7

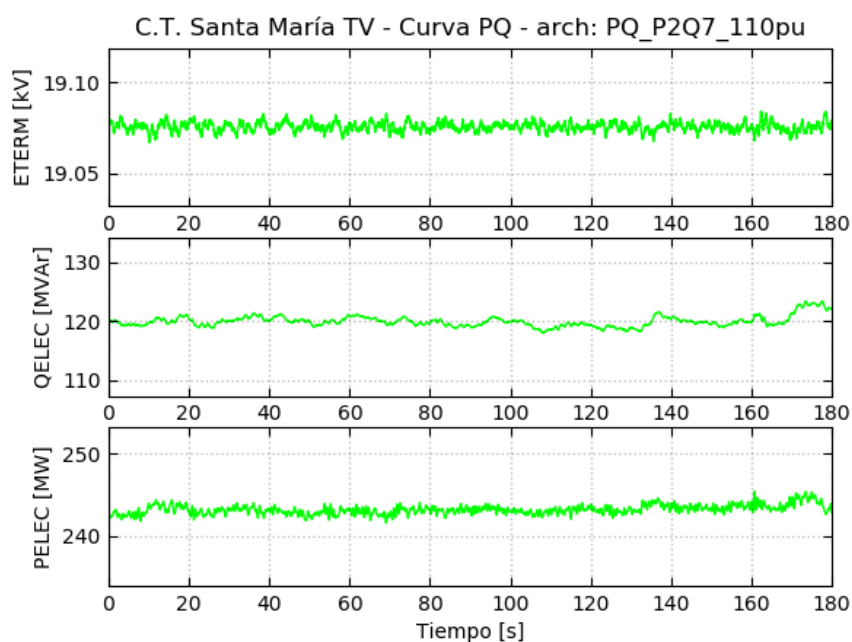


Figura 7.77 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

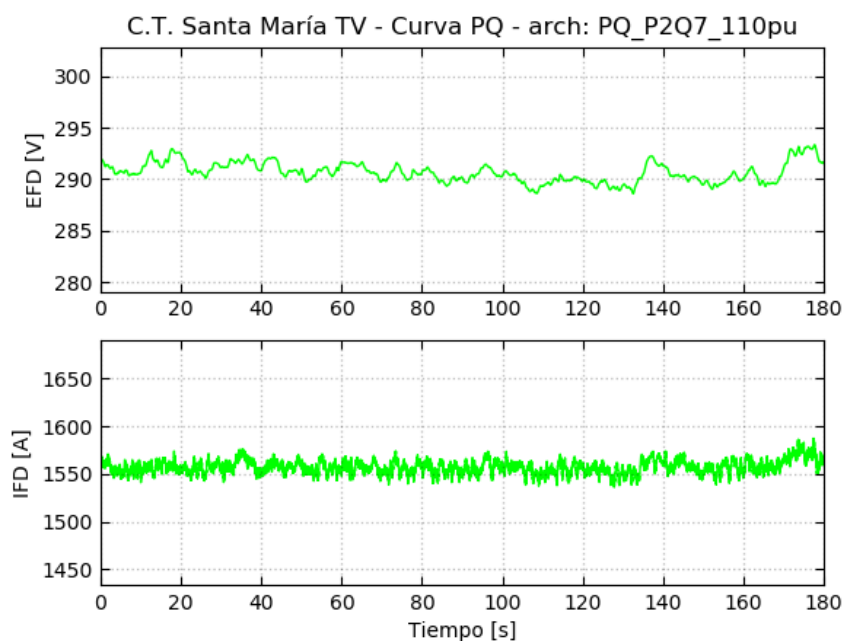


Figura 7.78 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



Punto P1_CT-Q8

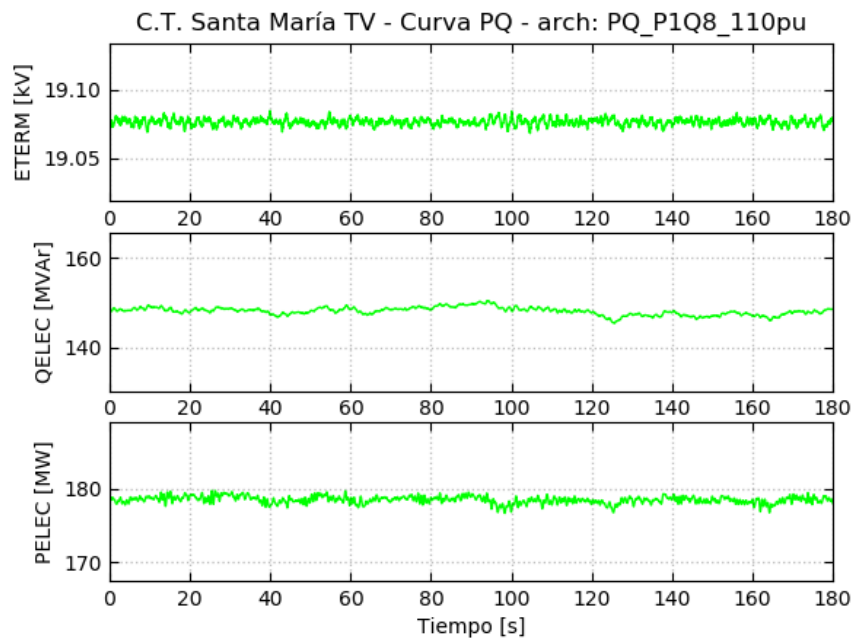


Figura 7.79 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador

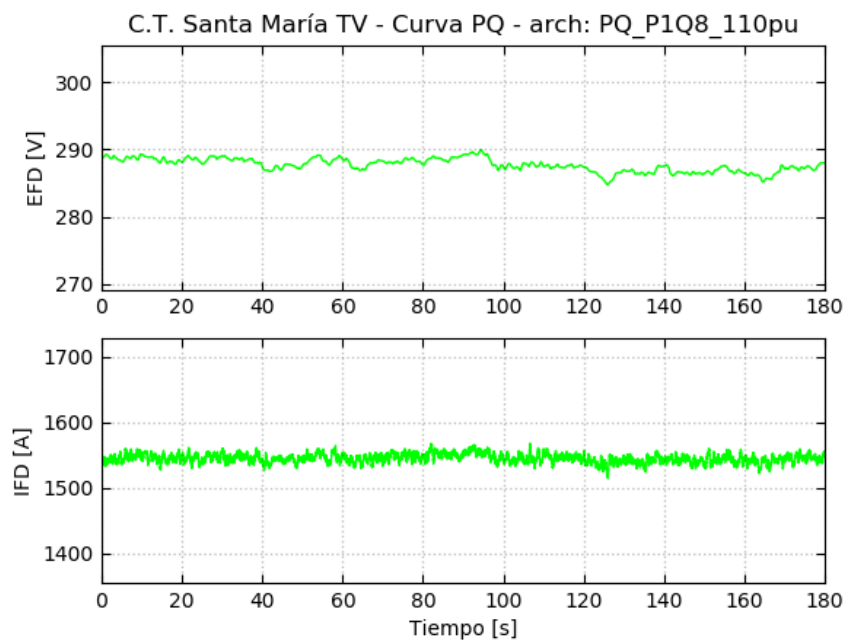


Figura 7.80 – Verificación de curva PQ – Señales en terminales del generador



7.2 Datos del generador

Hydrogen-Cooled Generator					
GENERATOR NO: 290T771			RATING:		
2 POLES	3 PHASE	WYE CONN	50 HERTZ	GAS PRESSURE AT 60 PSIG	
				RATING	PEAK
TOTAL TEMPERATURE AT RATING				KVA: 468000	
GUARANTEED NOT TO EXCEED:				ARMATURE AMPS: 15011	
103 °C ON ARMATURE BY DETECTOR				ARMATURE VOLTS: 18000	
120 °C ON FIELD BY RESISTANCE				FIELD AMPS: 2444	
MAXIMUM COLD AIR TEMPERATURE 50 °C				EXCITER VOLTS: 750	
INLET WATER 40 °C				POWER FACTOR: 0.85	
YEAR OF MANUFACTURE: 2009					
MACHINE CODE: 450H LDS DOWN					
FIELD WINDING INSULATION CLASS: F					
STATOR WINDING INSULATION CLASS: F					
FIELD WINDING TEMPERATURE RISE CLASS: B					
STATOR WINDING TEMPERATURE RISE CLASS: B					
RATING: S1 (CONTINUOUS)					
ALTITUDE: 27 METERS					
STATOR MASS: 297824 Kg					
ROTOR MASS: 70370 Kg					
GENERATOR (COMPLETE) MASS: 431300 Kg					
PROTECTION: IP-54					
STANDARD: IEC 60034-1 & -3					
RATED SPEED: 3000 RPM					
MAXIMUM AMBIENT TEMPERATURE: 40 °C					
MINIMUM AMBIENT TEMPERATURE: 10 °C					
MAXIMUM COOLING TEMPERATURE: 40 °C					
DIRECTION OF ROTATION (FROM NON DRIVEN END): CW					
CAUTION! BEFORE INSTALLING, OPERATING OR DISMANTLING GENERATOR, READ INSTRUCTIONS IN GEK: 111956					
General Electric Company Made in U.S.A.					

Figura 7.81 – Placa del generador



7.3 Datos de la turbina

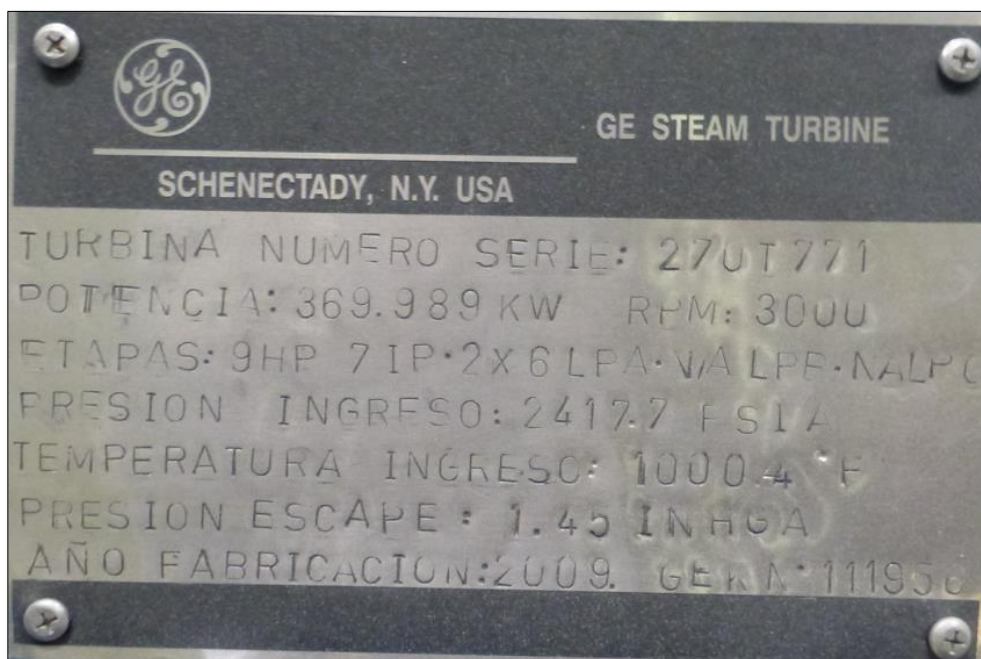


Figura 7.82 – Placa de la turbina

7.4 Curva de capacidad del generador

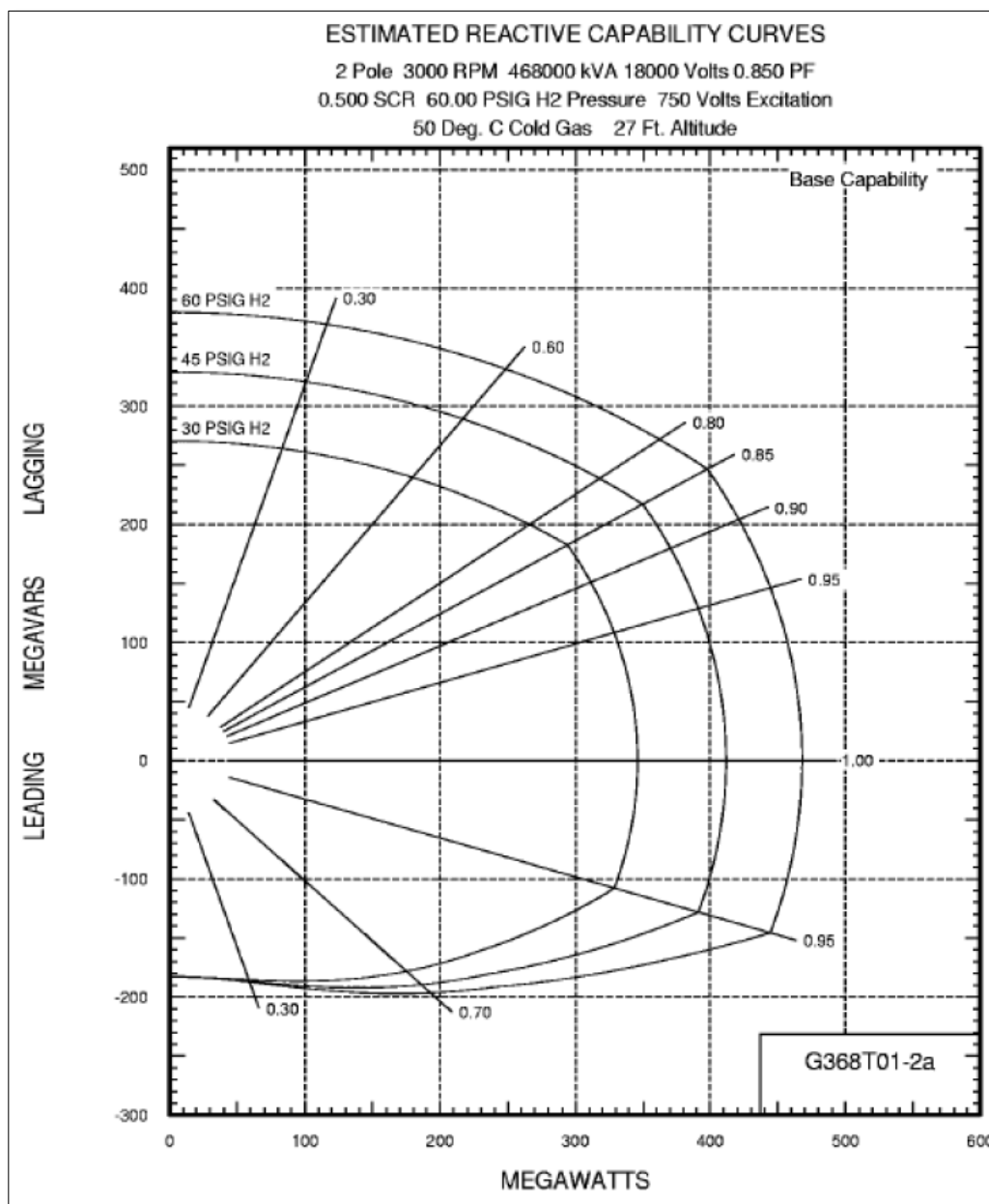


Figura 7.83 – Curva PQ del generador según fabricante



7.5 Protecciones del generador

Setting Calculation Sheet			
Loss of Field Functions (ANSI Devices 40-1 & 40-2)			
A) Generator Data			
Generator Data:	468 MVA _G ,	18.00 kV,	0.85 pf
X_{DV} =	2.03 per unit		
X'_{DV} =	0.265 per unit		
B) Relay Data			
40-1,2 Relay Ranges:	0.10 - 300.00 Ω Center & Radius		
	0.00 - 65.535 seconds Time Delay		
CT Ratio (CT _R):	20,000 / 1	=	20,000 :1
PT Ratio (PT _R):	18,000 / 120	=	150 :1
CT _R /PT _R :	133.33		
C) Settings Calculations			
Relay Setting Philosophy: During loss of excitation, these relay functions will detect vars. from the system into the generator. The offset of $X'_{DV} / 2$ is to avoid misoperations during system faults. The 40-1 circle is set at 1.0 per unit ohms (on generator base) in order to detect short circuited fields at full and moderate load, while not tripping for stable swings or regulator undershoot. The 40-2 circle is set at X_{DV} with a time delay of 0.6 seconds to provide tripping for short circuited fields at no load or open circuit field, while not tripping for stable swings. This function should be blocked for VTFF.			
Convert X'_{DV} and X_{DV} from per unit on gen. MVA and kV bases to relay ohms:			
Z_{BASE} (Generator Relay Base Impedance) = $(kV^2/MVA_G) * (CT_R/PT_R) = 92.31 \Omega$			
$X'_{DV-RELAY} = (X'_{DV}) * Z_{BASE} = 24.462 \Omega$			
$1.0_{PU-RELAY} = (1.0 pu \Omega) * Z_{BASE} = 92.31 \Omega$			
$X_{DV-RELAY} = (X_{DV}) * Z_{BASE} = 187.38 \Omega$			
Set 40-STG1 Center = $(X'_{DV-RELAY} + 1.0_{PU-RELAY}) / 2 = 58.38 \Omega$			
Set 40-1 Radius = $(1.0_{PU-RELAY} / 2) = 46.15 \Omega$			
Set 40-STG1 Delay = 0.06 seconds			
Set 40-STG2 Center = $(X'_{DV-RELAY} + X_{DV-RELAY}) / 2 = 105.92 \Omega$			
Set 40-2 Radius = $(X_{DV-RELAY} / 2) = 93.69 \Omega$			
Set 40-STG2 Delay = 0.6 seconds			
Set 40-STG1 & 40-STG2 UV Supervision = 0.9 per unit			

Figura 7.84 – Protección pérdida de excitación



Setting Calculation Sheet

Overvoltage Function (ANSI Device 59)

A) Generator Data

Generator Data: 468 MVA_G, 18.00 kV, 0.85 pf

B) Relay Data

59 Relay Ranges: 0.000 to 3.000 pu pickup range
0.00 to 600.00 second pickup/reset time delay range

PT Ratio (PT_R): 18,000 / 120 = 150.00 :1

C) Settings Calculations

Relay Setting Philosophy: The 59 function should be set with a safe margin below the overvoltage capability of the generator. Set time delay to coordinate with the 24T function. This function will be blocked for VTFF and startup.

Nominal voltage = 120.0 volts

Recommended 59P-A pickup = 120% nominal volts = 144.0 volts

Recommended 59P-A Time Delay = 3.00 seconds

Recommended 59P-A Reset Delay = 0 seconds

Recommended 59P-T pickup = 120% nominal volts = 144.0 volts

Recommended 59P-T Time Delay = 10.00 seconds

Recommended 59P-T Reset Delay = 0 seconds

Figura 7.85 – Protección de sobretensión

Setting Calculation Sheet

Under/Overfrequency Functions (ANSI Devices 81-U/O)

A) Generator Data

Generator Data: 468 MVA_G, 18.00 kV, 0.85 pf

Nominal Frequency: 50 Hz

B) Relay Data

81 Relay Ranges: 35 - 99% Undervoltage Cutoff
20.0 - 65.0 Hz Set Points (81U, 81O)
0.000 - 65.535 second delay time range

PT Ratio (PT_R): 18,000 / 120 = 150.00 :1

C) Settings Calculations

Relay Setting Philosophy: Settings will be based upon steam turbine limits per GEK 103802, Turbine Off-Frequency Operation (for 50Hz Modern Units)
All functions are blocked for VTFF and startup.

GEK 103802, Table 1. GE Steam Turbine Off-Frequency Limits for 50Hz units

Lifetime Limit	Frequency Range	
Unlimited	47.0	to 52.5
90 minutes	46.5 to 47.0	52.5 to 53.0
12 minutes	46.0 to 46.5	53.0 to 53.5
1 minute	45.0 to 46.0	53.5 to 55.0

Recommended Undervoltage Cutoff = 85%

81U-1 pickup =	47.0	Hz	81O-1 pickup =	52.5	Hz
81U-1 delay =	60.0	sec	81O-1 delay =	60.0	sec
81U-1 reset =	0.0	sec	81O-1 reset =	0.0	sec
81U-2 pickup =	46.5	Hz	81O-2 pickup =	53.0	Hz
81U-2 delay =	8.0	sec	81O-2 delay =	8.0	sec
81U-2 reset =	0.0	sec	81O-2 reset =	0.0	sec
81U-3 pickup =	46.0	Hz	81O-3 pickup =	53.5	Hz
81U-3 delay =	1.0	sec	81O-3 delay =	1.0	sec
81U-3 reset =	0.0	sec	81O-3 reset =	0.0	sec
81U-4 & 81U-6: Disabled					

Figura 7.86 – Protección de sobre y subfrecuencia



Setting Calculation Sheet
Overexcitation Function (ANSI Device 24)

A) Generator Data

Generator Data: 468 MVA_G, 18.00 kV, 0.85 pf

B) Relay Data

24T Relay Ranges: DT, Inverse A-C, Flexcurve A,B curve settings
0.80 to 4.00 per unit Volts/Hertz pickup range
0.05 to 600.00 TD multiplier range
0 to 1000.0 second T-Reset settings range

PT Ratio (PT_R): 18,000 / 120 = 150.00 :1

C) Settings Calculations

Relay Setting Philosophy: The generator is capable of continuous operation at 1.05 per unit V/Hz. Corrective action should be taken for operation of the machine above 105% V/Hz, which is not sanctioned by GE. The 24T setting follows the recommendations of GE's generator technical reference GEK75512F, trip for >118% V/Hz at 2 sec., and trip for <118% V/Hz according to the over-excitation capability of the GSU transformer while coordinating with the exciter's limiter. Transformer V/Hz curve based on C37.91-2000, Figure 14. Reset time should be 600 seconds per GE recommendation.

Inverse Time Curve Element

Set 24T1 curve type : **Inverse A**
Set 24T1 inverse pickup : 1.10 per unit V/Hz
Set 24T1 time dial multiplier : 8.0
Set 24T1 T-Reset: **600** seconds

Instantaneous Element

Set 24T2 curve type : **Definite Time**
Set 24T2 instantaneous pickup : **1.18** per unit V/Hz
Set 24T2 time dial multiplier : **2** seconds
Set 24T2 T-reset : **600** seconds

Alarm Element (via Flexlogic)

Set 24A pickup : 1.06 per unit V/Hz
Set 24A1 definite time delay : 10.0 seconds

Figura 7.87 – Protección de sobreflujo

7.6 Diagrama de bloques del regulador de tensión

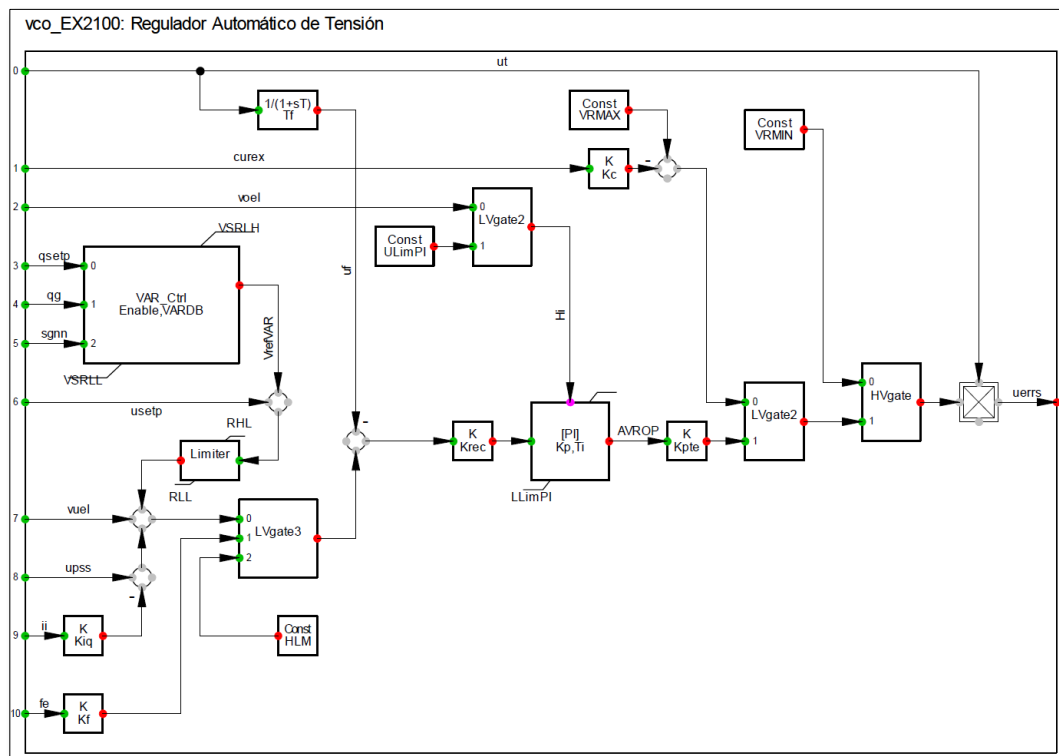


Figura 7.88 – Diagrama de bloques AVR

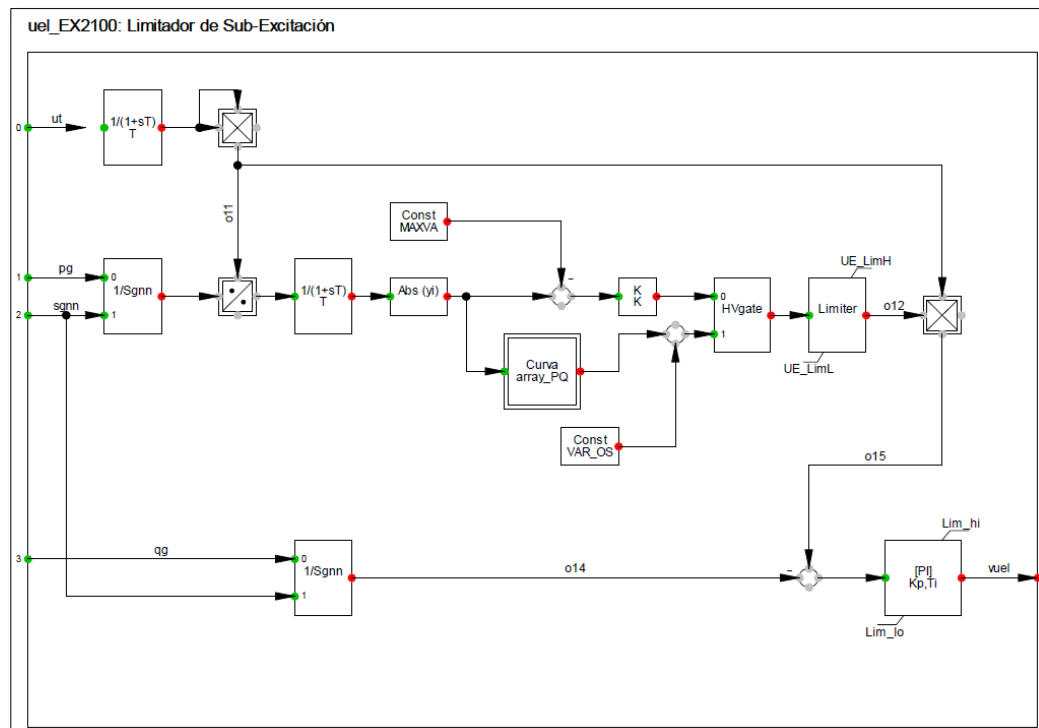


Figura 7.89 – Diagrama de bloques limitador UEL

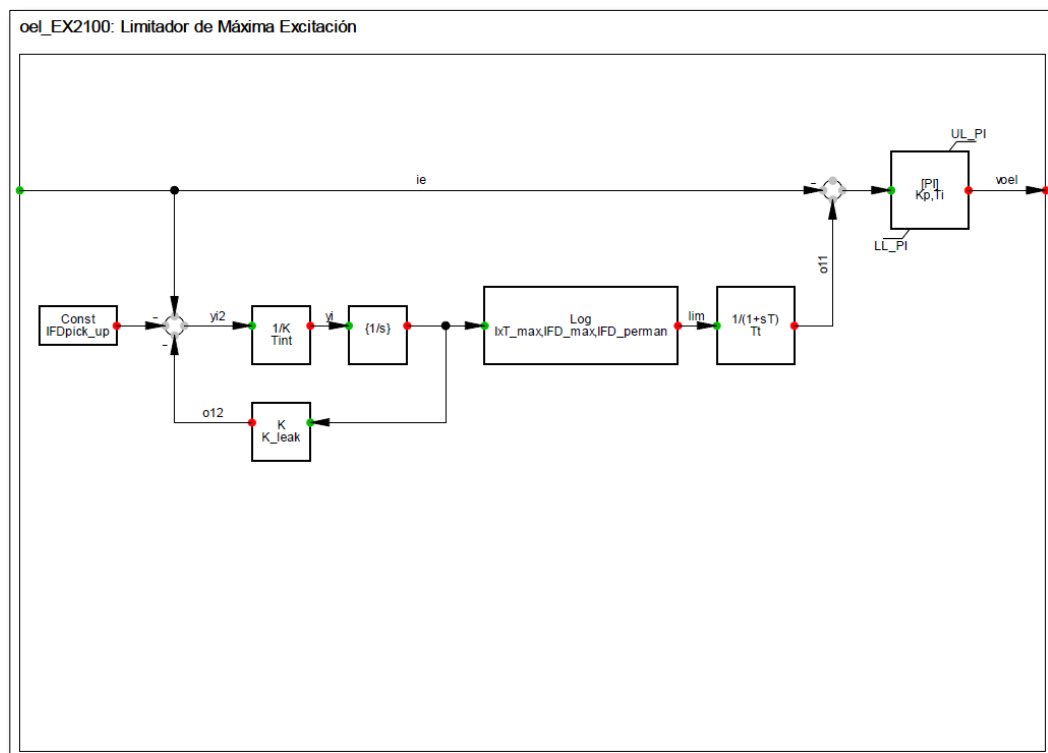


Figura 7.90 – Diagrama de bloques limitador OEL

7.7 Criterio de ajuste de limitadores según el fabricante

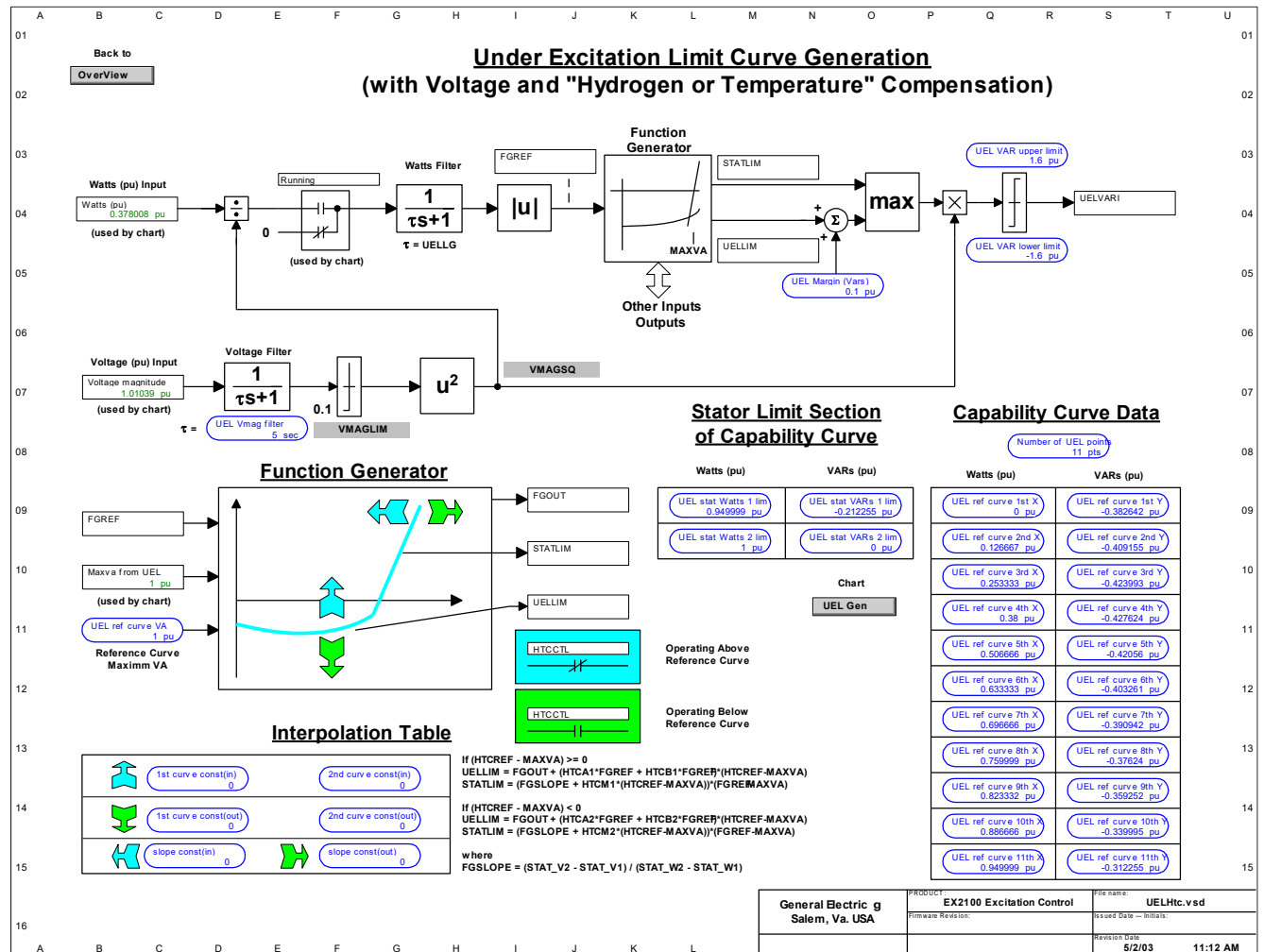


Figura 7.91 – Limitador UEL

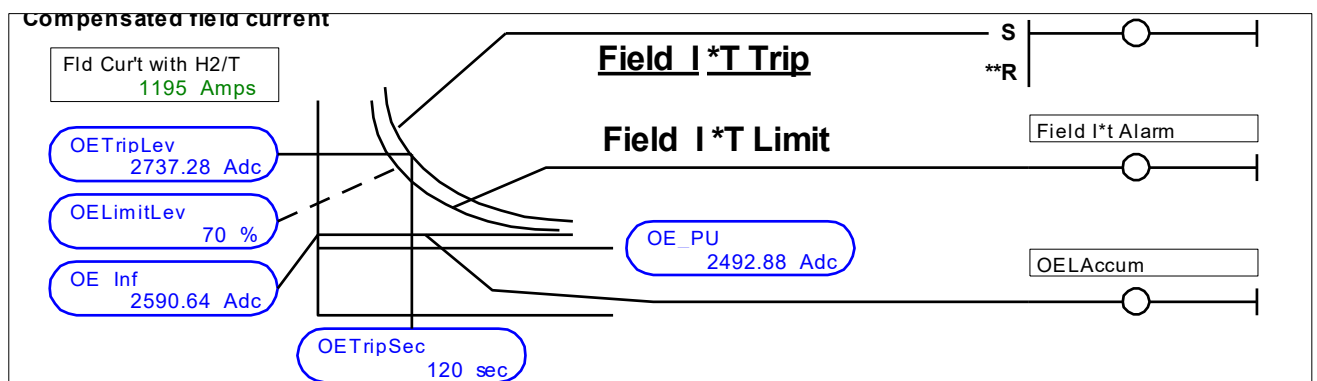


Figura 7.92 – Limitador OEL

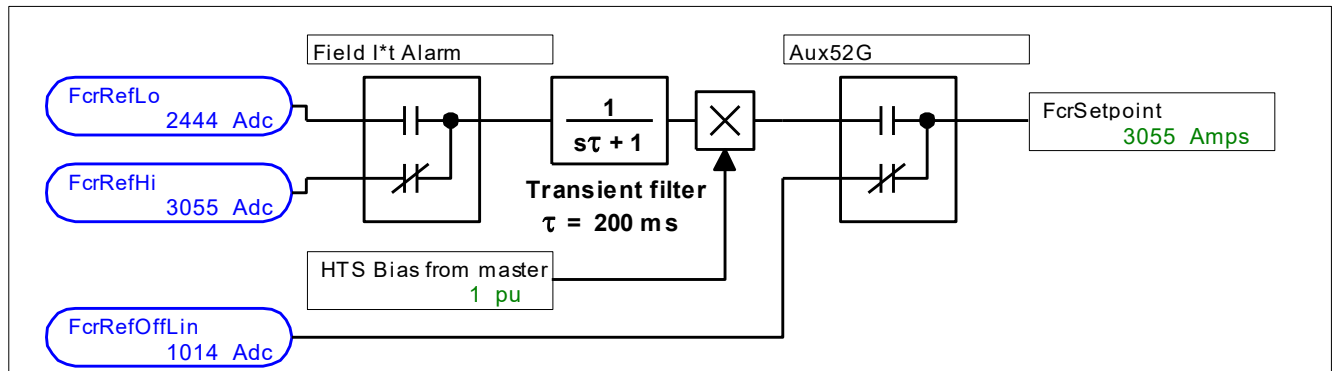


Figura 7.93 – Limitador OEL

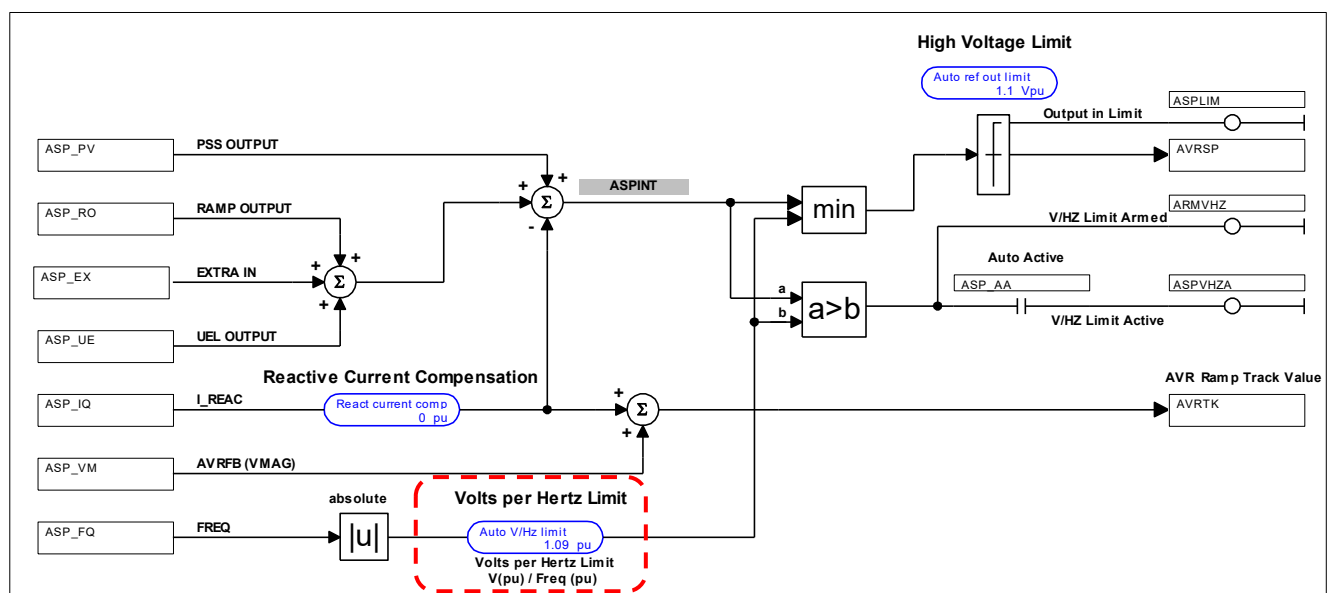


Figura 7.94 – Limite V/Hz



7.8 Valores de mínimo técnico y potencia máxima

Tabla N°1: Parámetro de mínimo técnico para la unidad 1 de Central Santa María

Central	Unidad	Combustible	Mínimo Técnico [MW]
Santa María	Santa María 1	Carbón	178,00

Tabla 7.1 – Mínimo técnico contemplado por el CEN

Tabla 1: Parámetros de Potencia Máxima de Central Santa María

Unidad	Combustible	Potencia Máxima Bruta [MW]	SS/AA [MW]	Potencia Máxima Neta [MW]
TER SANTA MARÍA U1	Carbón	373,99	29,47	344,52

Tabla 7.2 – Potencia máxima contemplada por el CEN



7.9 Archivos adjuntos entregados

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

- Registros de ensayos: EE-EN-2023-1399-RD_CT_SantaMaria_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 - Control de Tensión	
Nombre	Descripción
FSNL_007	Prueba de performance
FSNL_016	Prueba de techos
FSNL_017	Limitador V/Hz
Uel_P5	UEL P5
Uel_P3	UEL P3
Uel_P1	UEL P1
Oel_P5	OEL P5
Oel_P3	OEL P3
Oel_P1	OEL P1

Tabla 7.3 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión

Ensayos - Curva PQ - 0.90 p.u	
Nombre	Descripción
PQ_P5Q5_09pu	P5 Q5
PQ_P4Q6_09pu	P4 Q6
PQ_P2Q7_09pu	P2 Q7
PQ_P1Q8_09pu	P1 Q8
PQ_P1Q1_09pu	P1 Q1
PQ_P2Q2_09pu	P2 Q2
PQ_P4Q3_09pu	P4 Q3
PQ_P5Q4_09pu	P5 Q4

Tabla 7.4 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 0.90 pu



Ensayos - Curva PQ - 0.95 p.u	
Nombre	Descripción
PQ_P5Q5_095pu	P5 Q5
PQ_P4Q6_095pu	P4 Q6
PQ_P2Q7_095pu	P2 Q7
PQ_P1Q8_095pu	P1 Q8
PQ_P1Q1_095pu	P1 Q1
PQ_P2Q2_095pu	P2 Q2
PQ_P4Q3_095pu	P4 Q3
PQ_P5Q4_095pu	P5 Q4

Tabla 7.5 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 0.95 pu

Ensayos - Curva PQ – 1.0 p.u	
Nombre	Descripción
PQ_P5Q5_1pu	P5 Q5
PQ_P4Q6_1pu	P4 Q6
PQ_P2Q7_1pu	P2 Q7
PQ_P1Q8_1pu	P1 Q8
PQ_P1Q1_1pu	P1 Q1
PQ_P2Q2_1pu	P2 Q2
PQ_P4Q3_1pu	P4 Q3
PQ_P5Q4_1pu	P5 Q4

Tabla 7.6 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.0 pu



Ensayos - Curva PQ – 1.05 p.u	
Nombre	Descripción
PQ_P5Q5_105pu	P5 Q5
PQ_P4Q6_105pu	P4 Q6
PQ_P2Q7_105pu	P2 Q7
PQ_P1Q8_105pu	P1 Q8
PQ_P1Q1_105pu	P1 Q1
PQ_P2Q2_105pu	P2 Q2
PQ_P4Q3_105pu	P4 Q3
PQ_P5Q4_105pu	P5 Q4

Tabla 7.7 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.05 pu

Ensayos - Curva PQ – 1.10 p.u	
Nombre	Descripción
PQ_P5Q5_110pu	P5 Q5
PQ_P4Q6_110pu	P4 Q6
PQ_P2Q7_110pu	P2 Q7
PQ_P1Q8_110pu	P1 Q8
PQ_P1Q1_110pu	P1 Q1
PQ_P2Q2_110pu	P2 Q2
PQ_P4Q3_110pu	P4 Q3
PQ_P5Q4_110pu	P5 Q4

Tabla 7.8 – Descripción de archivos utilizados para las pruebas de control de tensión – Curva PQ a 1.10 pu



7.10 Acta de pruebas SSCC CT Santa María

ESTUDIOS ELECTRICOS ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS			
<u>ACTA DE PRUEBAS</u>			
Fecha	03/09/2025	Empresa	Colbún SA
ID Proyecto	EE-2021-023	Ubicación	Coronel, Chile
Denominación Planta	Central Térmica Santa María - Unidad TV		
Servicios por verificar	Servicios Complementarios: - Control de Tensión (CT)		
<u>Datos de la instalación</u>			
Potencia aparente nominal [MVA]	468 MVA	Tipo de central	Térmica (Carbón)
Tensión en bornes nominal [kV]	18 kV	Cantidad de unidades	1
Potencia activa máxima [MW]	374 MW	Tipo de excitación	Estática
Potencia activa mínima [MW]	178 MW	Transformador elevador bajo carga	18/230 kV
<u>Responsables durante las pruebas</u>			
Coordinado	Julián Larrea	Representante Colbún SA en las pruebas	
Equipo Experto Técnico	Andrés Capalbo	Estudios Eléctricos	
	Federico García		
<u>Datos de las pruebas</u>			
Estado previo de la planta	En Servicio		
Inicio del período de pruebas	25/09/2023		
Fin del período de pruebas	29/09/2023		
Protocolo aplicable	EE-EN-2023-0886-RA- Procedimiento_Ensayos_SSCC_Control_Tension_Frecuencia_CT_Santa_María		
Posición de TAP trafo elevador	Tap fijo (cambiador de tomas en vacío y manual)		
Firmas Aclaración/Empresa	 Julián Larrea Moraga Coordinado	 Federico García Experto técnico	

Figura 7.95 – Acta de Pruebas SSCC Santa María (1 de 4)



ESTUDIOS ELECTRICOS
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Resumen de pruebas

SC Control de Tensión:

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

- Prueba de limitador Sobreexcitación (OEL) en 3 estados de carga.
- Prueba de limitador Subexcitación (UEL) en 3 estados de carga.

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

- Puntos Curva PQ operables en 4 estados de carga.

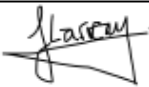
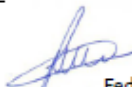
Firmas Aclaración/Empresa	 Julián Larrea Moraga Coordinado	 Federico García Experto técnico
-------------------------------------	---	---

Figura 7.96 – Acta de Pruebas SSCC Santa María (2 de 4)



ESTUDIOS ELECTRICOS
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Observaciones/Desvíos del protocolo

SC Control de Tensión:

Pruebas en vacío:

En la última actualización de Guía de Verificación de Servicios Complementarios Control de Tensión (Julio 2025) se indica que, para centrales consideradas existentes, se podrán utilizar registros de ensayos realizados en el contexto de la validación del modelo dinámico de la instalación. A partir de lo anterior Colbún propone para este proceso de verificación reutilizar los ensayos correspondientes a la evaluación de la respuesta del sistema de control de tensión para la unidad operando en vacío (FSNL) realizados en el contexto del proceso de "Validación de Modelos Dinámicos" (VMD) de la central y presentados en el documento "EE-EN-2013-0699-RA-Informe_de_Homologacio_Santa_Maria". Se toman como válidos y homologables los ensayos realizados en VMD.

Pruebas dinámicas de limitadores:

Sin desvíos

Curva PQ:

De acuerdo con el procedimiento, se intentan probar los distintos niveles de tensión en bornes para cada uno de los estados de carga planteados. Se logra ensayar una serie de puntos planteados, los cuales, son alcanzados gracias a la constante colaboración del centro de despacho para bajar/subir tensión en barra S/E Santa María 220 kV, quienes han ayudado a ajustar la tensión en barra según requerimiento de ensayo.

Sin embargo, también se debe mencionar que en reiteradas ocasiones no fue posible continuar ajustando la tensión de la barra por restricciones del Sistema, lo que impidió llegar a algunos de los puntos objetivos.

Se presentan a continuación, dos tablas resumen con los puntos subexcitado y sobreexcitado de lo realmente alcanzado en planta.

Firmas Aclaración/Empresa	 Julián Larrea Moraga Coordinado	 Federico García Experto técnico
-------------------------------------	---	---

Figura 7.97 – Acta de Pruebas SSCC Santa María (3 de 4)



ESTUDIOS ELECTRICOS
ENSAYOS DE VERIFICACIÓN DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

®	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 Protocolo	Ensayable	Ensayable disminuyendo la tensión del generador (~0.91)	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P1 Ensayo	Alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P2 Protocolo	Ensayable	Ensayable disminuyendo la tensión del generador (~0.92)	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P2 Ensayo	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.91 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P4 Protocolo	Ensayable	Ensayable disminuyendo la tensión del generador (~0.93)	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P4 Ensayo	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.91 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P5 Protocolo	Ensayable	Ensayable disminuyendo la tensión del generador (~0.93)	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P5 Ensayo	Alcanzado aumentando la tensión del generador a 0.92 pu	Alcanzado disminuyendo la tensión del generador a 0.91 pu	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)

®	Sobrexitación				
	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 Protocolo	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P1 Ensayo	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P2 Protocolo	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable
P2 Ensayo	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P4 Protocolo	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	No Alcanzable
P4 Ensayo	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)
P5 Protocolo	No alcanzable	No alcanzable	No alcanzable	Ensayable aumentando la tensión del generador (~1.09)	Ensayable
P5 Ensayo	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No alcanzado	No ensayado debido al límite V/Hz (1.09 pu)

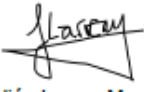
Firmas Aclaración/Empresa	 Julián Larrea Moraga Coordinado	 Federico García Experto técnico
-------------------------------------	---	---

Figura 7.98 – Acta de Pruebas SSCC Santa María (4 de 4)



7.11 Certificado de calibración del equipamiento utilizado

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN			
 ESTUDIOS ELECTRICOS			
Estudios Eléctricos declara que el instrumento: 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.			
Instrumento	Número de serie:	Última Calibración	
Adquisidor MEDIUN 8CH	EE-EQ-2015-0794	10/05/2023	
Para la calibración se emplearon los siguientes instrumentos patrón:			
Instrumento Patrón	Número de Serie:	Última calibración	Próxima calibración
OMICRON CMC 256-6	JG677S	29/10/2021	29/10/2024

Fecha de evaluación: 10/5/2023
Certificado número: EE-CI-2023-0608

Nombre Inspector: Leiss, Jorge
Firma:



Power System Studies & Power Plant Field
Testing and Electrical Commissioning

Figura 7.99 – Certificado de calibración de equipo de medición



Esta página ha sido dejada en blanco intencionalmente.