



estudios energéticos consultores.
GRUPO MERCADOS ENERGÉTICOS CONSULTORES

INFORME DE DETERMINACIÓN DE POTENCIA MÁXIMA

Parque Eólico Tchamma



MAINSTREAM
RENEWABLE
POWER

Octubre 2022

A 0668

Tabla de contenido

REGISTRO DE COMUNICACIONES.....	5
SECCIÓN PRINCIPAL	6
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Definiciones y nomenclatura	6
2. MARCO NORMATIVO	7
3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	7
3.1. DESCRIPCIÓN DEL CONTROL DE PLANTA Y FUNCIONALIDADES.....	15
3.2. Datos del transformador de potencia	17
3.3. Datos del transformador de unidad	17
4. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS	18
5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	18
6. RESULTADOS OBTENIDOS	18
6.1. Ensayo de potencia máxima.....	18
7. CONCLUSIONES.....	25

Índice de tablas y gráficos

Tabla 1. Puntos característicos de la curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.	13
Tabla 2. Puntos característicos de la curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.....	14
Tabla 3. Puntos de la curva potencia – frecuencia.....	16
Tabla 4. Configuración del control de tensión VQ.	16
Tabla 5. Especificaciones del transformador de potencia.....	17
Tabla 6. Especificaciones de los transformadores de bloque.....	17
Tabla 7. Tabla resumen de valores a presentar.....	18
Tabla 8. Potencia Máxima – PE Tchamma.....	25
Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.	6
Gráfico 2. Esquema Unilineal de interconexión del sistema.	8
Gráfico 3. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Tchmma.....	9
Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (1 de 3).....	10
Gráfico 5. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (2 de 3).....	11
Gráfico 6. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (3 de 3).....	12
Gráfico 7. Curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 – 145.	13
Gráfico 8. Curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.	14
Gráfico 9. Curva de velocidad/potencia para el conjunto de aerogeneradores.	15
Gráfico 10. Curva potencia frecuencia.	16
Gráfico 11. Ensayo de potencia máxima – Potencia bruta generada.....	19
Gráfico 12. Ensayo de potencia máxima – Potencia neta en el punto de conexión.....	19
Gráfico 13. Ensayo de potencia máxima – Potencia individual de un aerogenerador.	20
Gráfico 14. Ensayo de potencia máxima – Velocidad de viento.	20
Gráfico 15. Curva de potencia velocidad de viento – punto operativo.....	21
Gráfico 16. Potencia Bruta – Intervalo de máxima.....	21
Gráfico 17. Potencia neta - intervalo de máxima.....	22
Gráfico 18. Potencia de un aerogenerador – intervalo de máxima.....	22
Gráfico 19. Velocidad de viento – intervalo de máxima.	23
Gráfico 20. Consumo de servicios auxiliares de la SE tchamma.....	24
Gráfico 21. Resumen de resultados de potencia máxima – PE Tchamma.	25

Abreviaturas y acrónimos

CEN	Coordinador Eléctrico Nacional
CNE	Comisión Nacional de Energía
ERNC	Energía Renovables No Convencional
NTSyCS	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio
NT SSMM	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para Sistemas Medianos
PE	Parque Eólico
SE	Subestación Eléctrica
AT	Alta tensión
MT	Media tensión
BT	Baja tensión
ONAN	Oil Natural Air Natural
ONAF	Oil Natural Air Forced
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
RCB	Regulador Bajo Carga
PMU	Power Management Unit

REGISTRO DE COMUNICACIONES

Registro de las actividades, comunicaciones y aprobación de informes.

Número	Fecha dd/mm/año	Objeto	Ref	Observaciones	Responsable
1	30/12/2021	Emisión original	V1	Preparó FG	FM
2	01/07/2022	Correcciones de registros y gráficas en función de los comentarios del CEN	V2	Preparó FG	FM
3	27/10/2022	Correcciones Menores	V3	Preparó FG	FM

SECCIÓN PRINCIPAL

1. INTRODUCCIÓN

En el presente informe se exhiben los resultados obtenidos en los ensayos de campo realizados en el Parque Eólico Tchamma, durante el día 5 de noviembre de 2021, en relación con el proceso de determinación de la potencia máxima de la planta.

1.1. Definiciones y nomenclatura

En el Gráfico 1 muestra un sistema equivalente de conexión de un parque eólico, el cual nos permite identificar y definir los siguientes elementos:

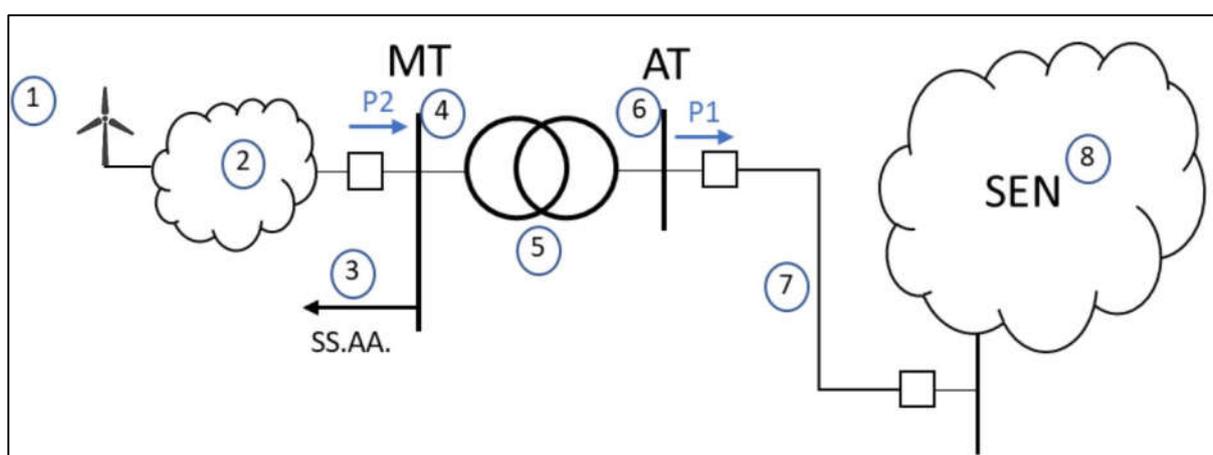


Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.

- 1) **Generador equivalente:** Representa la suma de los aportes de potencia activa de los aerogeneradores individuales.
- 2) **Pérdidas en sistema colector del parque (P_{colector}):** Corresponde a las pérdidas del sistema colector del parque eólico, principalmente en el circuito colector de media tensión, y en los transformadores de bloque de cada aerogenerador.
- 3) **Servicios Auxiliares de la central (SS.AA.):** Corresponde al consumo de servicios auxiliares de la subestación eléctrica de la planta sumados a los servicios auxiliares de los aerogeneradores.
- 4) **Barra de media tensión (MT):** Corresponde a la tensión en el lado de baja tensión del transformador de poder del parque eólico.
- 5) **Transformador de Poder:** Equipo elevador presente en la subestación de salida del parque eólico.
- 6) **Barra de alta tensión (AT):** Corresponde a la tensión en el lado de alta tensión del transformador de poder del parque eólico.
- 7) **Línea dedicada de la central:** Línea de alta tensión que vincula el parque eólico con el sistema eléctrico.

8) Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

De acuerdo con las definiciones anteriores se considera la siguiente nomenclatura:

- **P1:** Potencia activa inyectada en la barra de AT del PE. Este valor corresponde a la Potencia Neta del Parque (**P_{net}**).
- **P2:** Potencia activa inyectada en el lado de media tensión del parque.
- **Pbruta:** Suma de los aportes de potencia activa de los aerogeneradores del parque en el lado baja tensión (BT) del parque (en correspondencia con el punto 1 del Gráfico 1).
- **Pperd:** Potencia de pérdidas en la línea de transmisión (ver punto 7 del Gráfico 1).
- **Ptrafo:** Pérdidas activas en el transformador de potencia del parque.
- **Pssa:** Potencia de servicios auxiliares del parque.
- **Pcolector:** Pérdidas en el sistema colector del parque (ver punto 2 del Gráfico 1).

2. MARCO NORMATIVO

Las pruebas realizadas se programaron en base al ANEXO TÉCNICO de la NTSyCS “Pruebas de Potencia Máxima en Unidades Generadoras”. En particular es de aplicación el Artículo 39 “Potencia Máxima en unidades generadoras cuya fuente es renovable no convencional sin capacidad de regulación” del TÍTULO VIII – CENTRALES CUYA FUENTE ES RENOVABLE NO CONVENCIONAL” al tratarse de una planta de ERNC sin capacidad de almacenamiento de energía. En tal sentido, el valor de Potencia Máxima se obtiene a partir de registros de operación y mediciones de los recursos naturales que inciden en la operación de estas tecnologías, especificándose las metodologías, cálculos y todos los antecedentes y aspectos técnicos usados para la obtención de dicho valor.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El PE Tchamma se ubica a 10 km al oeste de Calama, comuna de María Elena, en la Región de Antofagasta, Chile. Su conexión al SEN se realiza mediante una línea en 220 kV de 36,4 km, que une la SE Tchamma con la SE Pallata. Está conformado por 35 aerogeneradores de 5 MW marca Siemens Gamesa modelo SG 5.0 – 145. Cabe aclarar que si bien los aerogeneradores son de 5 MW se encuentran limitados a 4.5 MW porque así se estableció en el diseño de la central, por lo cual la potencia instalada es de 157.5 MW (35 x 4.5 MW). En el Gráfico 7 se presenta la curva de capacidad PQ de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores son de velocidad variable del tipo DFIG (generador de inducción doblemente alimentado). Cada una de estas unidades incluye un transformador elevador de 0,69/33 kV y 5500 kVA.

El sistema colector se encuentra desarrollado por cables subterráneos en 33 kV y está formado por 12 circuitos que recolectan la potencia de los aerogeneradores.

Los circuitos colectores acometen a la barra de 33 kV del transformador de potencia de 220/33 kV 170 MVA (ONAF) de la SE Tchamma.

En el Gráfico 2 se muestra un esquema unilineal de la interconexión del parque con el sistema, en el Gráfico 3 el esquema unilineal de la zona de influencia y en los Gráficos 4 a 6 se muestra el esquema unilineal del sistema colector en 33 kV. Por último, en los Gráficos 6 y 7 se presentan las curvas de capacidad y la curva QV de los aerogeneradores.

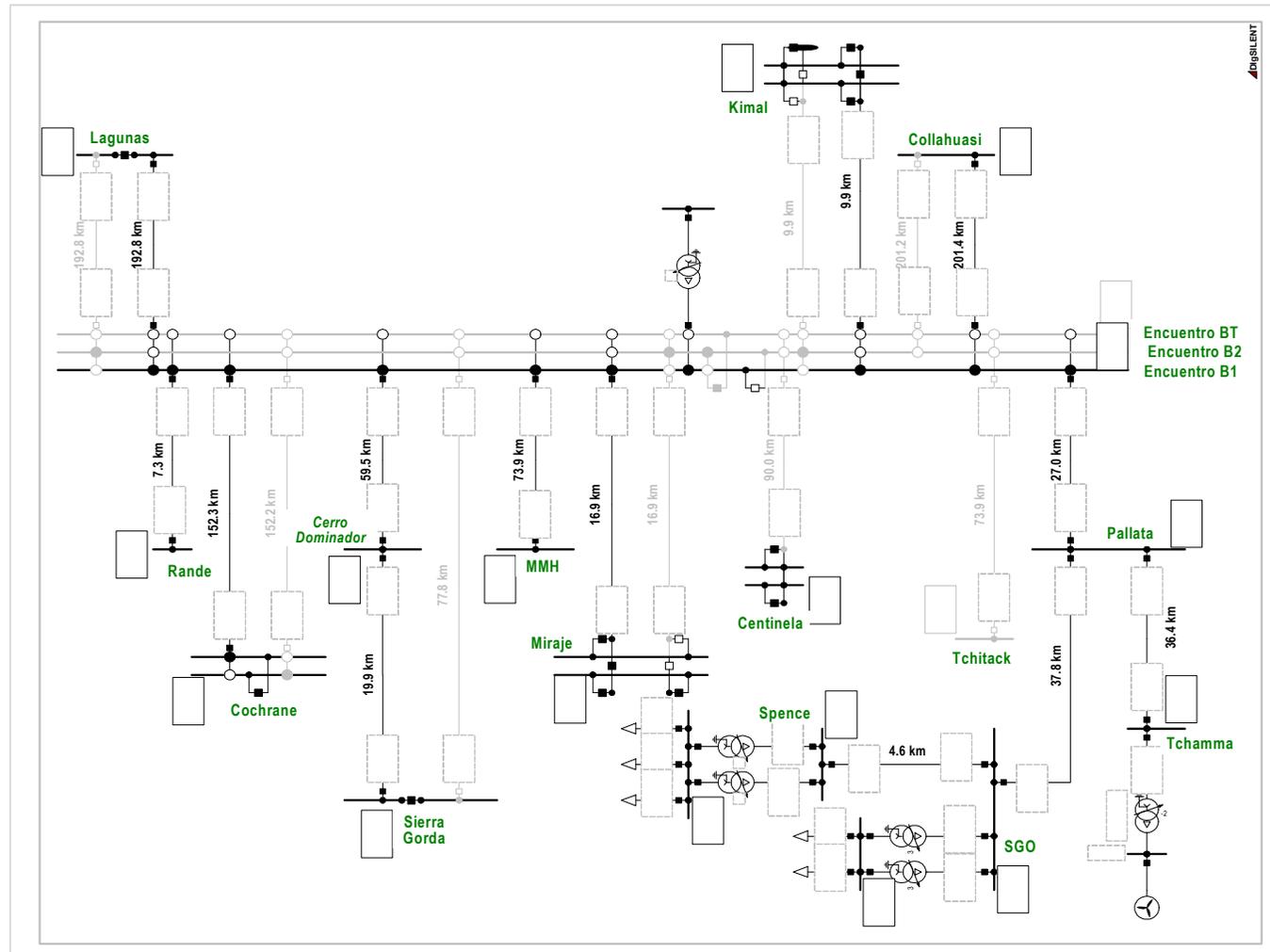


Gráfico 3. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Tchamma.

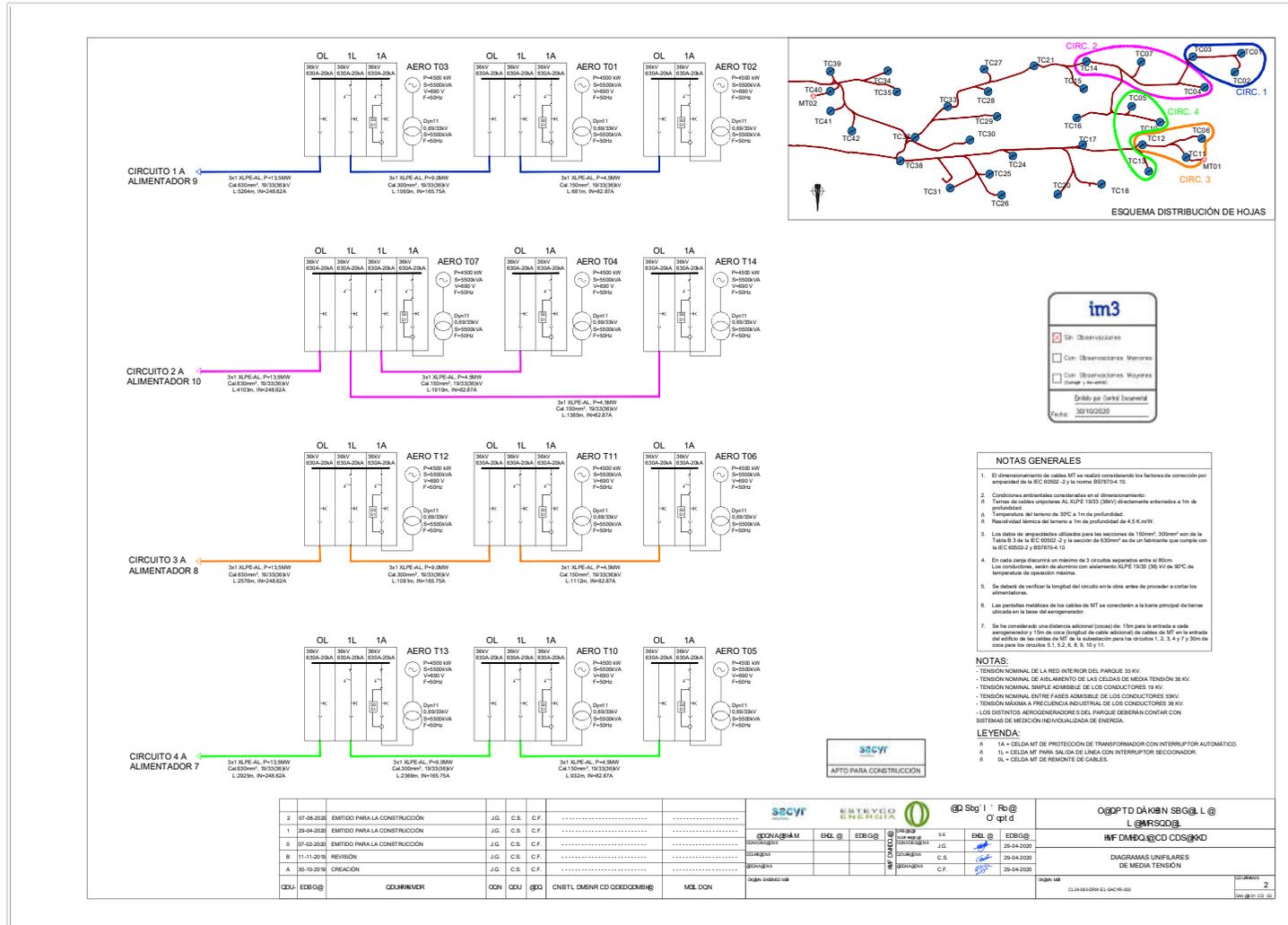


Gráfico 4. Esquema unifilar del sistema colector en 33 kV (1 de 3).

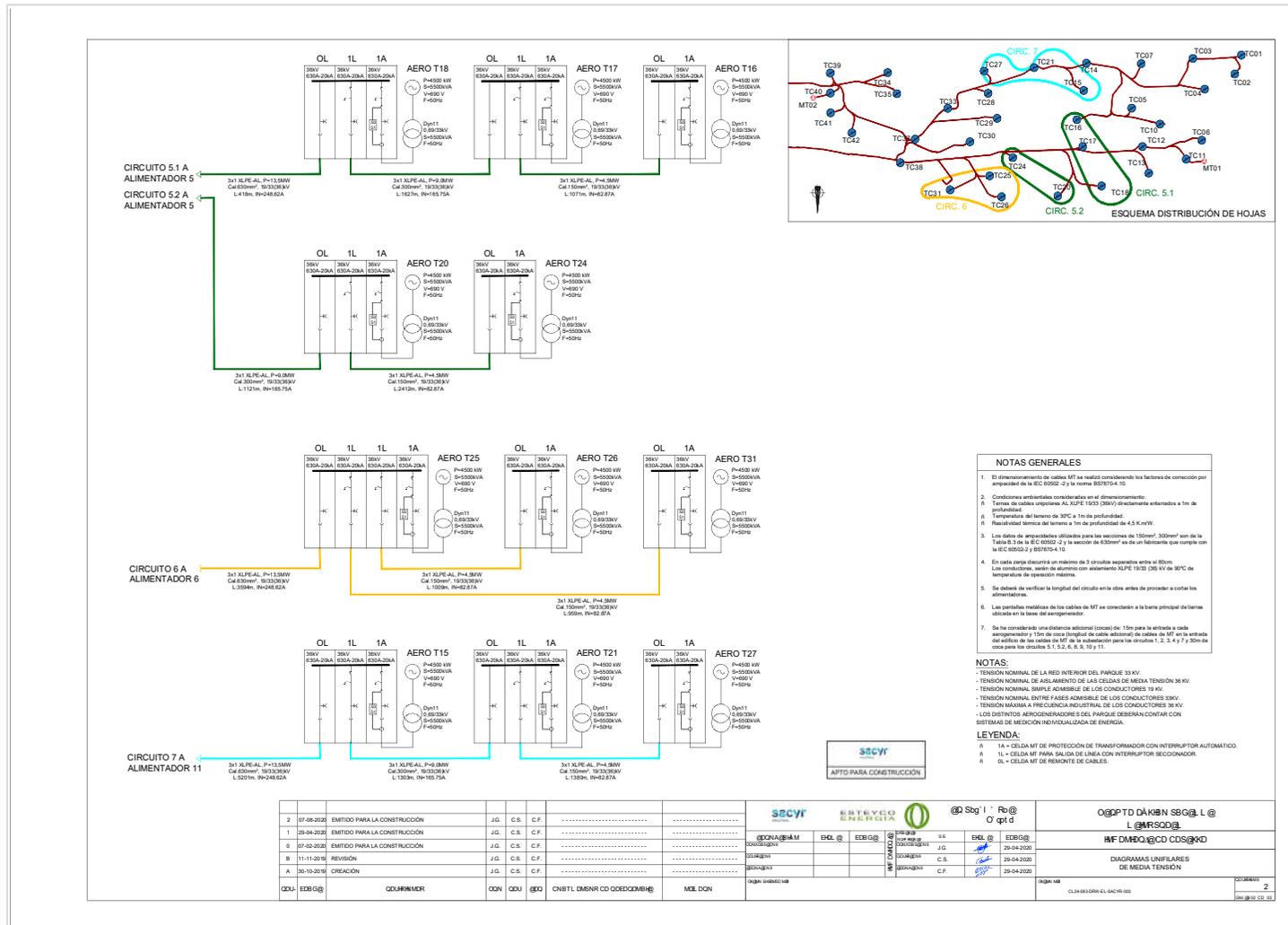


Gráfico 5. Esquema unilínea del sistema colector en 33 kV (2 de 3).

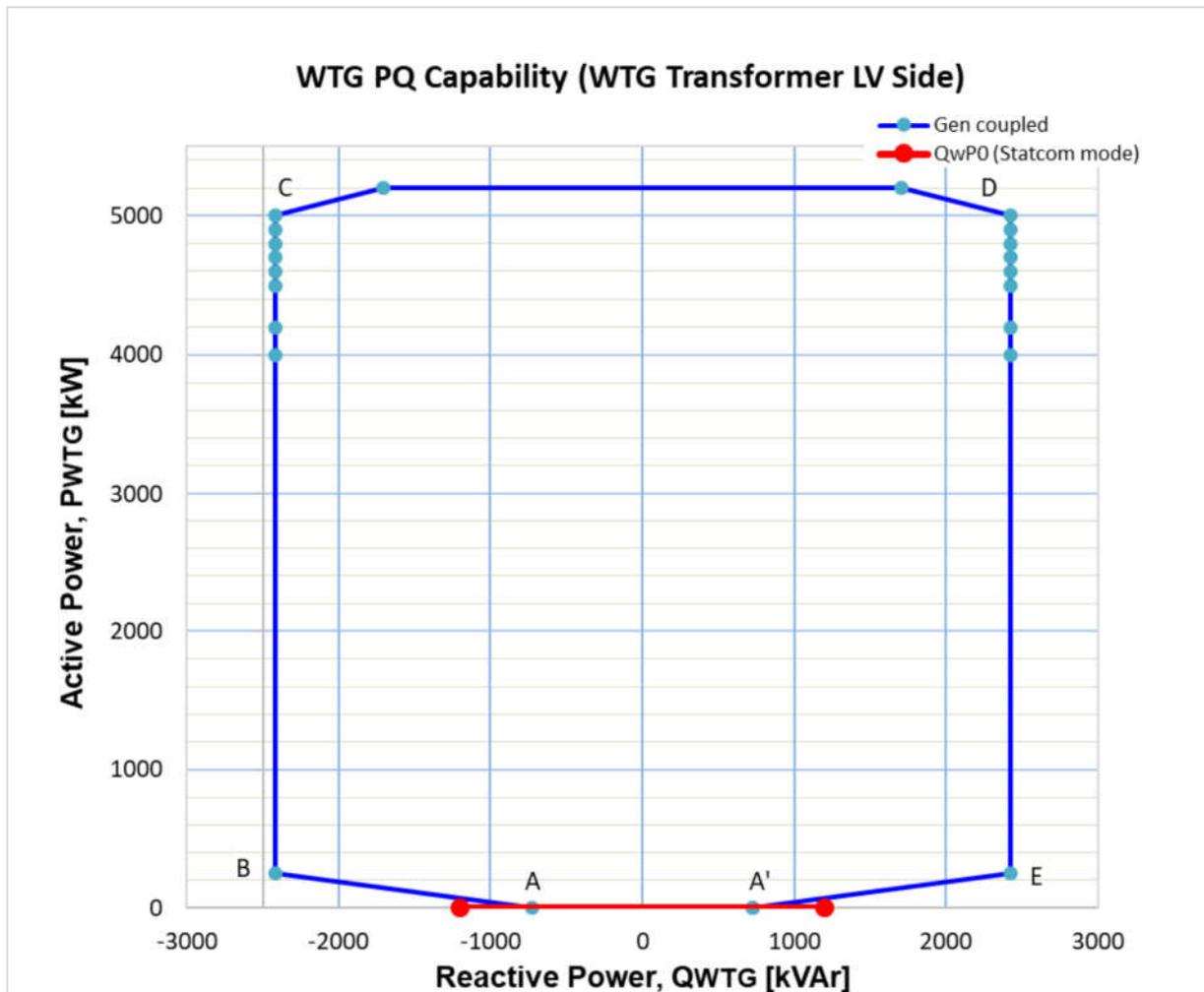


Gráfico 7. Curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

Tabla 1. Puntos característicos de la curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

PWTG: 5.0 MW (Cos $\phi_i = \pm 0.9$, T ext < 25 °C, F = $\pm 3\%fn$, U = -5%/+12%)		
	Q [kVAr]	P [kW]
A/A'	± 726	0
B	2422	250
C	2422	5000
D	-2422	5000
E	-2422	250

*Punto A/A': WTG en estado acoplado: Q = ± 726 kVAr se aplica a $\pm Un$. A mayor tensión, Q capacitivo se reducirá.

Cabe aclarar que por razones de diseño de la central si bien los aerogeneradores son de una potencia de 5 MW, estos se limitaron a una potencia de 4.5 MW, resultando así en una potencia instalada de 157.5 MW (35 x 4.5 MW).

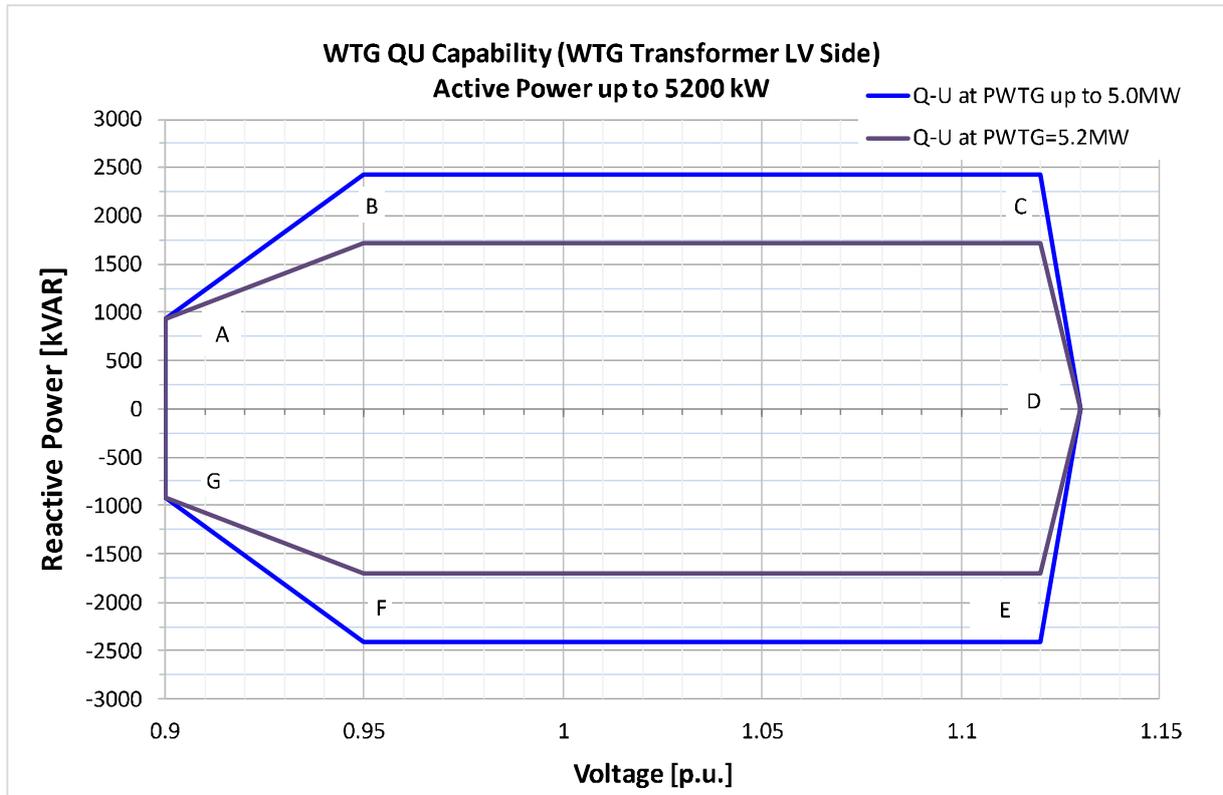


Gráfico 8. Curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

Tabla 2. Puntos característicos de la curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

PWTG: 5.0 MW ($Q_{max} = \pm 2422$, $T_{ext} < 25^\circ C$, $PWTG = +5\%/+100\%$, $F = \pm 3\%fn$)		
	Q [kVAR]	U [pu]
A	921	0.90
B	2422	0.95
C	2422	1.12
D	0	1.13
E	-2422	1.12
F	-2422	0.95
G	-921	0.90

Por último, en el gráfico siguiente se muestra la característica de potencia en función de la velocidad del viento.

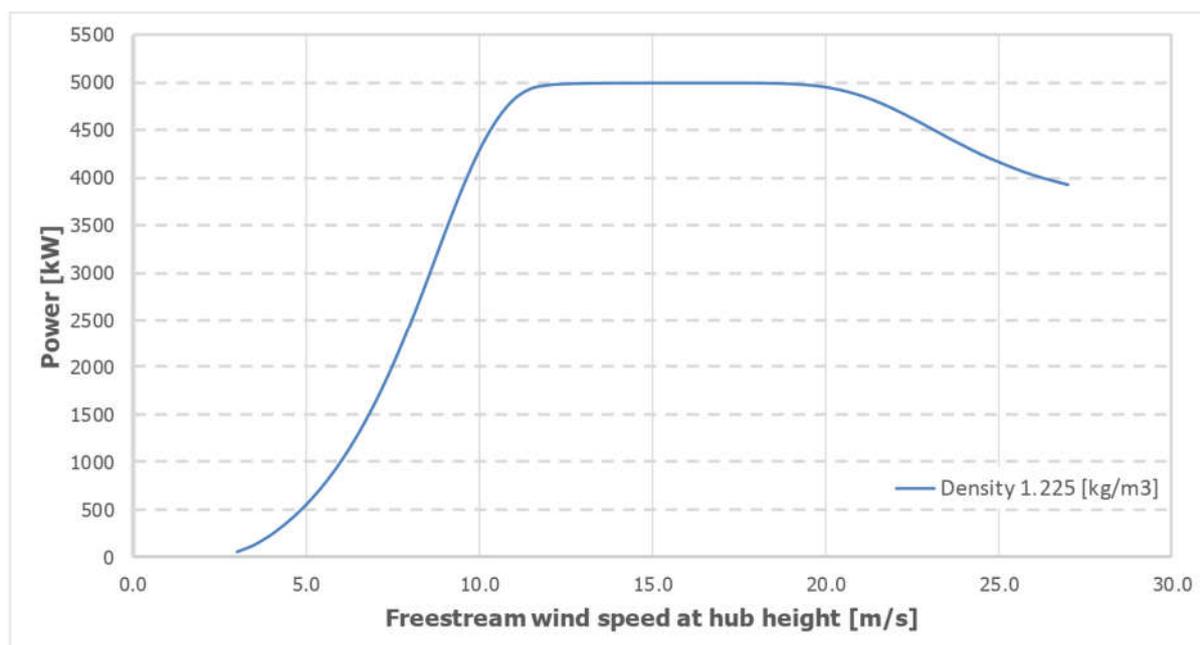


Gráfico 9. Curva de velocidad/potencia para el conjunto de aerogeneradores.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CONTROL DE PLANTA Y FUNCIONALIDADES

El control del PE Tchamma se realiza mediante a través de un único PPC (Power Plant Controller) de Siemens Gamesa, denominado WindNet, siendo la barra de control del parque la situada eléctricamente en la barra de 220 kV de la SE Tchamma.

3.1.1. Funciones de control de potencia activa

El PPC puede operar los siguientes modos de control:

- **Control de potencia activa de 0-100%:** Permite ajustar la consigna de potencia activa a un valor determinado, el cual es distribuido entre todos los aerogeneradores. Si se activa la función de limitación de rampa, tanto la rampa de bajada como de subida o toma de carga quedarán limitadas a una tasa de crecimiento determinada (en %/min). Para el caso del PE Tchamma esta tasa estaba configurada en 20%/min, la cual cumple con la máxima tasa de toma de carga exigida en la norma técnica NTSyCS.
- **Control de frecuencia:** Esta función contempla la respuesta de la potencia activa en función a las fluctuaciones de frecuencia respecto a la frecuencia nominal (50 Hz). La respuesta del parque estará dada por una curva de potencia frecuencia que posee una pendiente y una banda muerta. Para el caso particular del PE Tchamma este posee una banda muerta configurada en ± 200 mHz, con una curva característica mostrada en el siguiente gráfico:

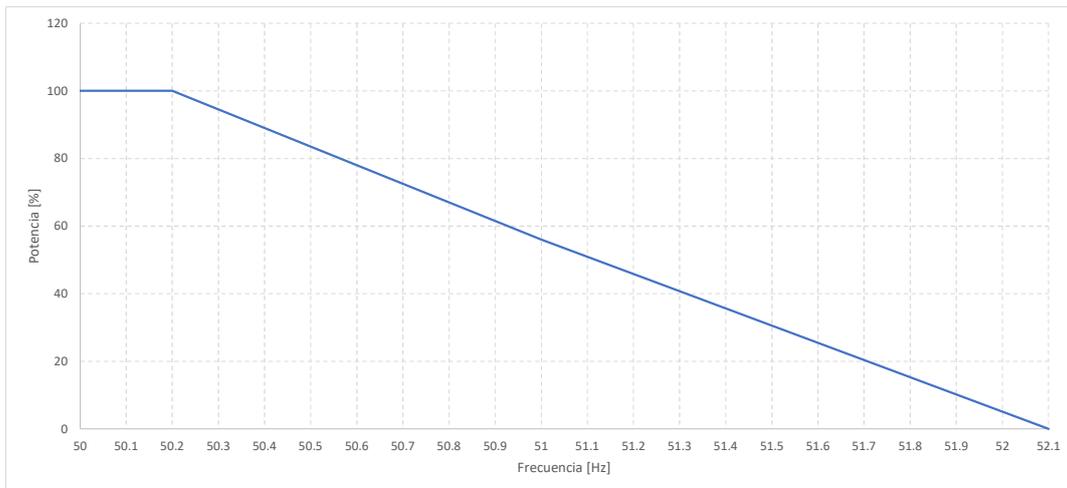


Gráfico 10. Curva potencia frecuencia.

En la siguiente tabla se muestran los puntos del gráfico anterior:

Tabla 3. Puntos de la curva potencia – frecuencia.

F [Hz]	P [%]
50	100
50.2	100
51	56
52.1	0

3.1.2. Funciones de control de potencia reactiva

- **Control de tensión VQ:** permite definir un valor de consigna de tensión, controlando la inyección de reactivo según una recta VQ predefinida (estatismo V/Q). Se puede configurar la pendiente y la banda muerta de dicha recta. La banda muerta de este control es de 0%. En la siguiente tabla se muestra la configuración actual del regulador:

Tabla 4. Configuración del control de tensión VQ.

QVStatic Deadband [%]	0
QVStatic Cap Saturation [MVar]	29.25
QVStatic ind Saturation [MVar]	-29.25
QVStatic leand [%]	0
Nominal Voltage [kV]	230

- **Control de tensión PI:** permite definir un valor de consigna de tensión en el punto de control. Mediante un controlador de tipo proporcional-integral (PI), el control envía consignas de potencia reactiva a los aerogeneradores para mantener la tensión en la barra controlada en el valor especificado, reduciendo el error entre la tensión medida y la consigna o referencia a un valor de 0.

- **Control de potencia reactiva:** Permite definir un valor de consigna de potencia reactiva en el punto de conexión, la cual es distribuida entre todas las unidades.
- **Control de factor de potencia:** Permite definir un valor de consigna de factor de potencia en el punto de conexión, controlando la inyección de potencia reactiva para mantenerlo constante.

3.2. Datos del transformador de potencia

El Parque Eólico Tchamma cuenta con un transformador de potencia, de potencia nominal 170 MVA. Este transformador está formado por un devanado de media tensión de 33 kV y un arrollamiento de alta tensión de 220 kV. Este equipo posee cambiador de tomas bajo carga. En la siguiente tabla se muestran los datos más relevantes del transformador de potencia de la SE Tchamma:

Tabla 5. Especificaciones del transformador de potencia.

Descripción	Valor	Unidad
Tensión Nominal	220/33	kV
Potencia Nominal	170	MVA
Grupo de Conexión	YNd1	
Impedancia de cortocircuito	12.69	%
Pérdidas en cobre	453.43	kW
Pérdidas en vacío	56.09	kW

3.3. Datos del transformador de unidad

Cada aerogenerador se vincula a la red colectora de 33 kV mediante un transformador de 5.5 MVA de capacidad nominal, y de relación de transformación de 0.69/33 kV. La tabla siguiente muestra las especificaciones de los transformadores de bloque de las unidades generadoras:

Tabla 6. Especificaciones de los transformadores de bloque.

Descripción	Valor	Unidad
Tensión Nominal	33/0.69	kV
Potencia Nominal	5.5	MVA
Regulador tensión sin carga	$\pm 2 \times 2.5\%$	-
Grupo de Conexión	Dyn11	
Impedancia de cortocircuito	9	%
Pérdidas en cobre	41.6	kW
Pérdidas en vacío	7.57	kW

4. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS

El parque eólico presentó parámetros de desempeño equivalentes a parques eólicos de similares características tecnológicas, como, por ejemplo¹:

- Parque Eólico Calama (Potencia Bruta máxima: 152.64 MW).

5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

El ensayo se realizó en un lapso en el cual el recurso primario se mantuvo aproximadamente invariable, en las condiciones más cercanas a las nominales posibles, en cumplimiento con el Artículo 39 “Potencia Máxima en unidades generadoras cuya fuente es renovable no convencional sin capacidad de regulación” al tratarse de una planta de ERNC sin capacidad de almacenamiento de energía. La potencia máxima se obtuvo a partir de registros de operación y mediciones del recurso natural que incide en esta tecnología durante el viernes 05/11/2021, incluyendo los antecedentes técnicos y los cálculos usados para obtener el valor. Se entregan junto con este informe archivos en formato plano (.csv) con los valores registrados.

Para la prueba de Potencia Máxima realizada, se reportan los valores de potencia según se desglosan en la siguiente tabla de resultados, las definiciones se encuentran a continuación.

Tabla 7. Tabla resumen de valores a presentar.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [MW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
PE Tchamma	(1)	(2)	(3)	(4)

- (1) **Potencia Bruta:** Corresponde a la suma del aporte de potencia activa de todos los aerogeneradores del PE Tchamma en el lado de BT.
- (2) **SS.AA.:** Corresponde al consumo de servicios auxiliares de la central (aerogeneradores + SE Tchamma).
- (3) **Pérdidas en central:** Corresponde a la suma de las pérdidas en el transformador de potencia de la SE Tchamma y las pérdidas en el sistema colector de la central (transformadores de bloque de los aerogeneradores + circuito colector de MT).
- (4) **Potencia Neta:** Es la potencia neta inyectada en el punto de conexión del parque eólico que para el caso de la central Tchamma es la barra de AT de la SE Tchamma.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Ensayo de potencia máxima

El día viernes 05/11/2021 se obtuvieron los registros de potencia tanto en el punto de conexión del PE (Pneta) como la suma de las potencias generadas por la totalidad de los aerogeneradores de la planta (Pbruta) y la potencia individual de un aerogenerador para un lapso total de 1 hs (desde

¹ <https://infotecnica.coordinador.cl/instalaciones/unidades-generadoras>

las 5:00 am a las 6:00 am). Los resultados de las variables principales se muestran en los siguientes gráficos:

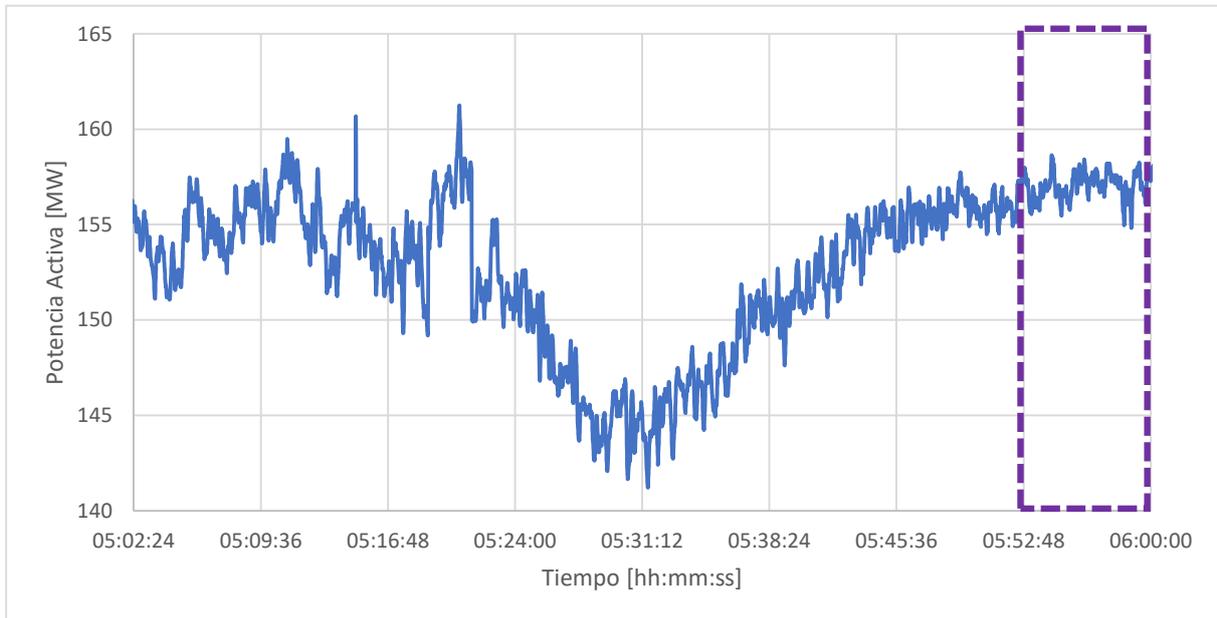


Gráfico 11. Ensayo de potencia máxima – Potencia bruta generada.

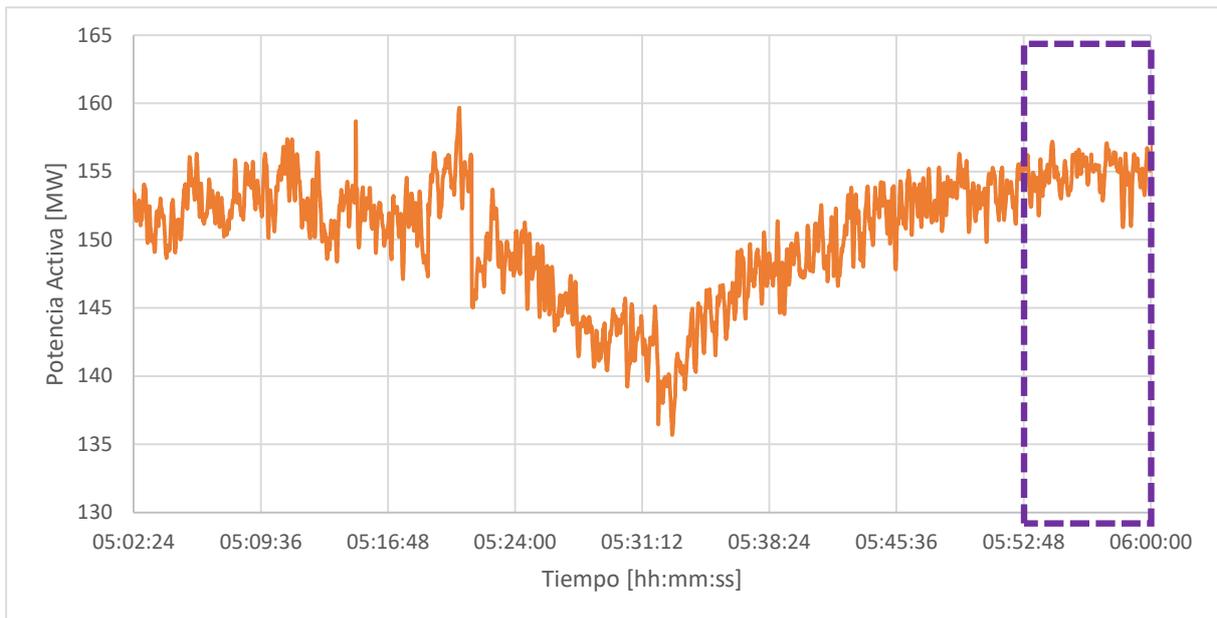


Gráfico 12. Ensayo de potencia máxima – Potencia neta en el punto de conexión.

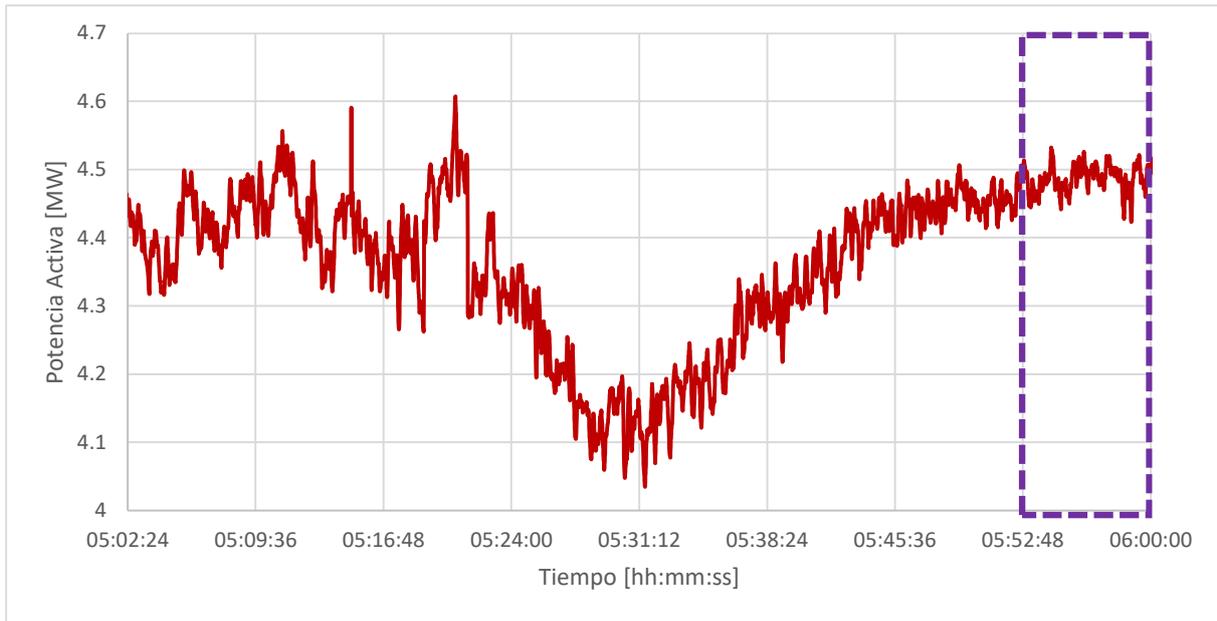


Gráfico 13. Ensayo de potencia máxima - Potencia individual de un aerogenerador.

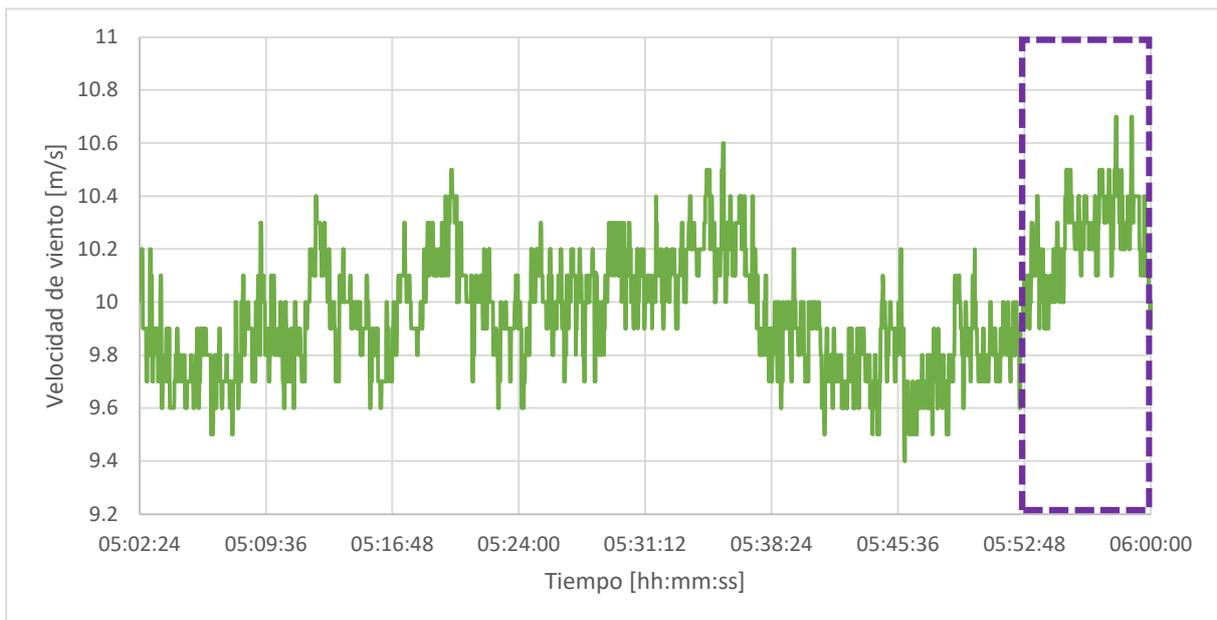


Gráfico 14. Ensayo de potencia máxima - Velocidad de viento.

A partir de los datos de velocidad de viento y potencia individual de un aerogenerador se contrasta con curva de velocidad potencia garantizada por el fabricante (Gráfico 9):

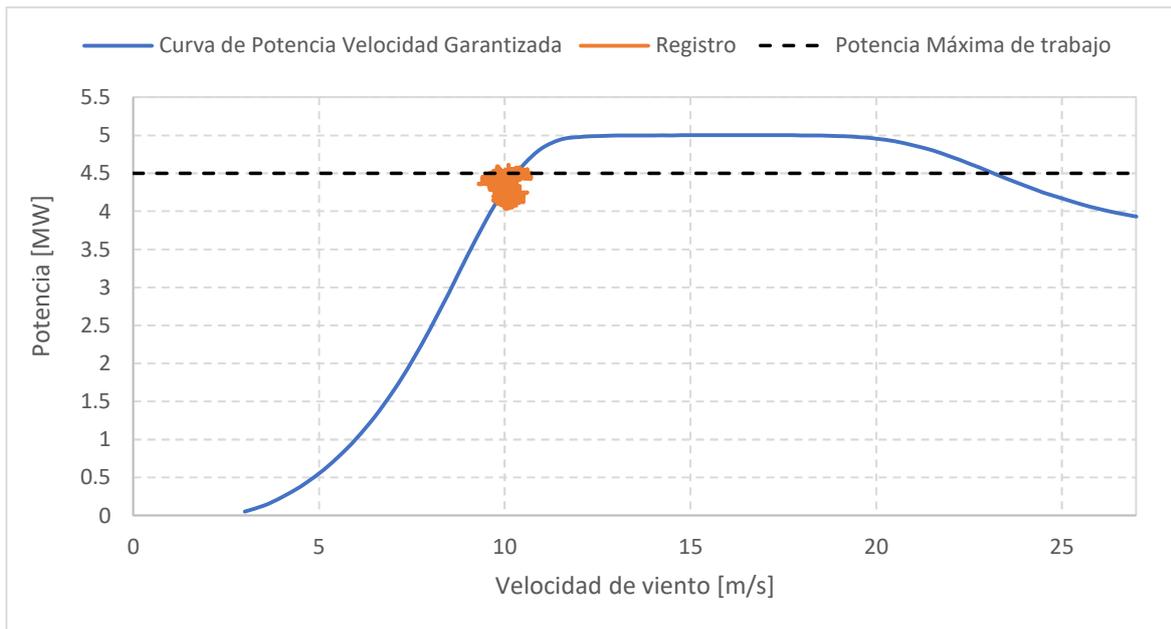


Gráfico 15. Curva de potencia velocidad de viento – punto operativo.

De las gráficas anteriores se observa que la potencia máxima se da entre las 5:52 y las 6:00 am. A continuación, se muestra los gráficos anteriores para dicha ventana de tiempo:

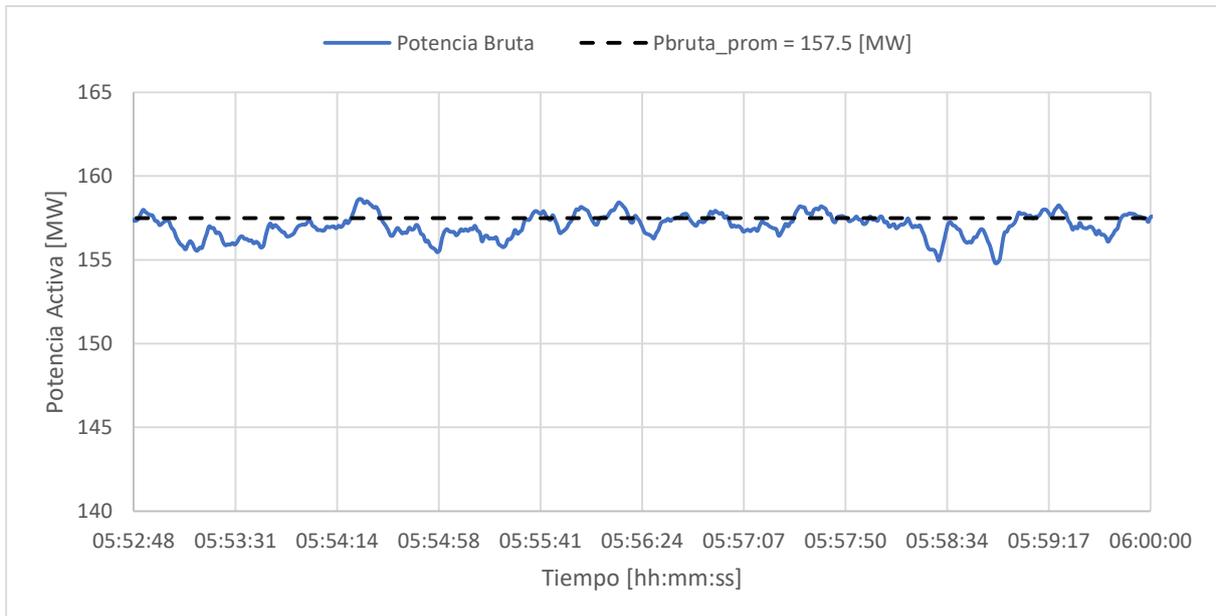


Gráfico 16. Potencia Bruta – Intervalo de máxima.

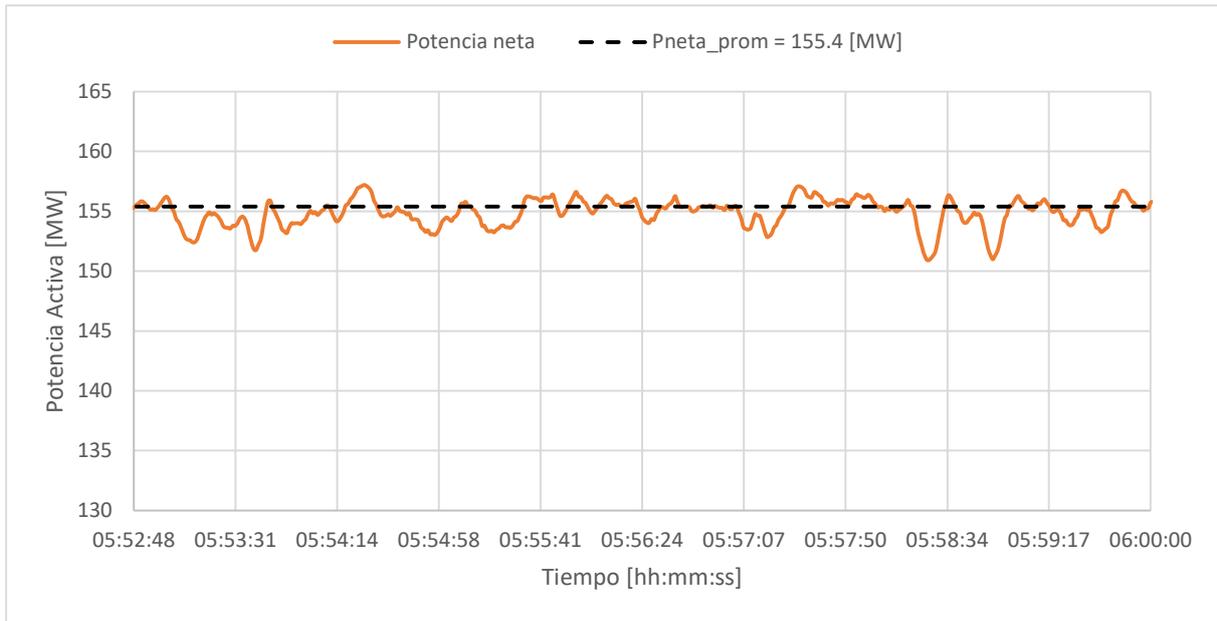


Gráfico 17. Potencia neta - intervalo de máxima.

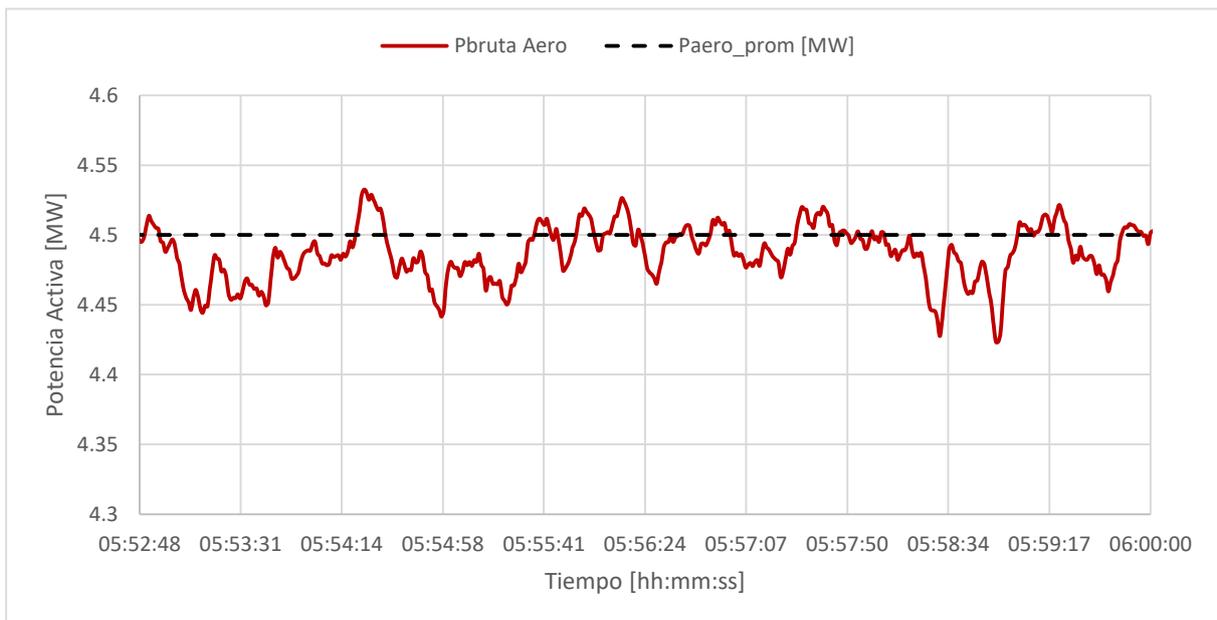


Gráfico 18. Potencia de un aerogenerador - intervalo de máxima.

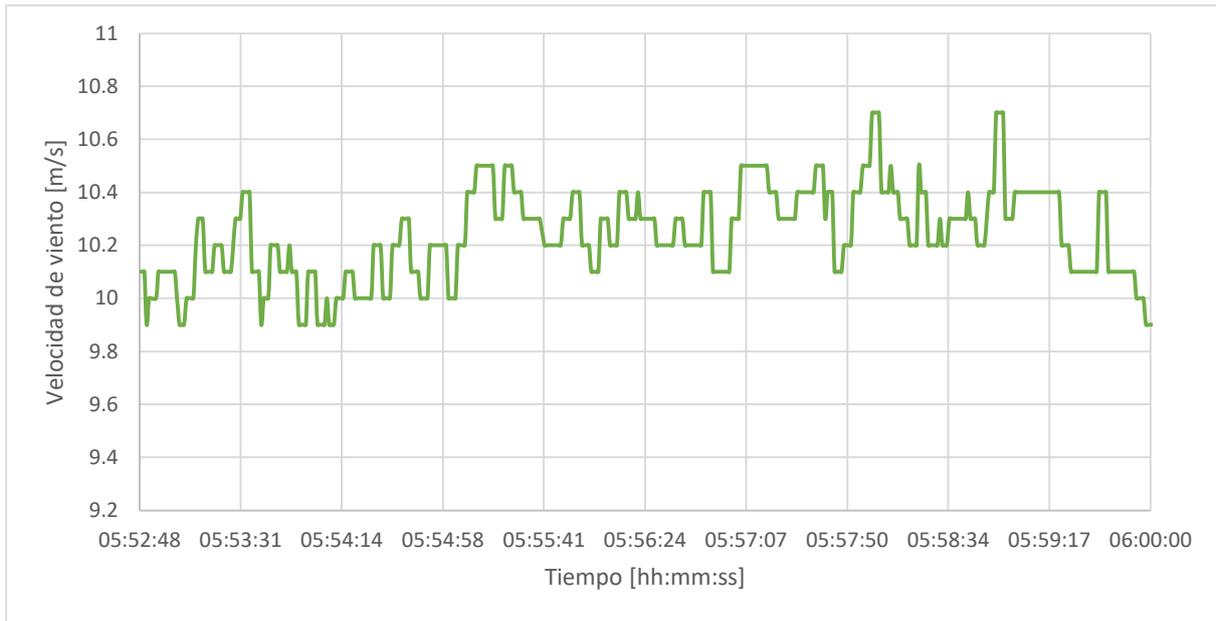


Gráfico 19. Velocidad de viento - intervalo de máxima.

6.1.1. Potencia Bruta

La potencia bruta surge del promedio del Gráfico 16 y resulta en un valor de 157.5 MW.

$$P_{bruta} = 157.5 \text{ MW}$$

6.1.2. Potencia neta

La potencia neta inyectada en la barra de AT de la SE Tchamma surge como promedio del registro del Gráfico 17, resultando un valor de 155.4MW.

$$P_{neta} = 155.4 \text{ MW}$$

6.1.3. Potencia de los servicios auxiliares

La lectura del facturador asociado al consumo de servicios auxiliares de la SE Tchamma indicó un valor promedio de 10.38 kW, el cual es mostrado en el siguiente gráfico:

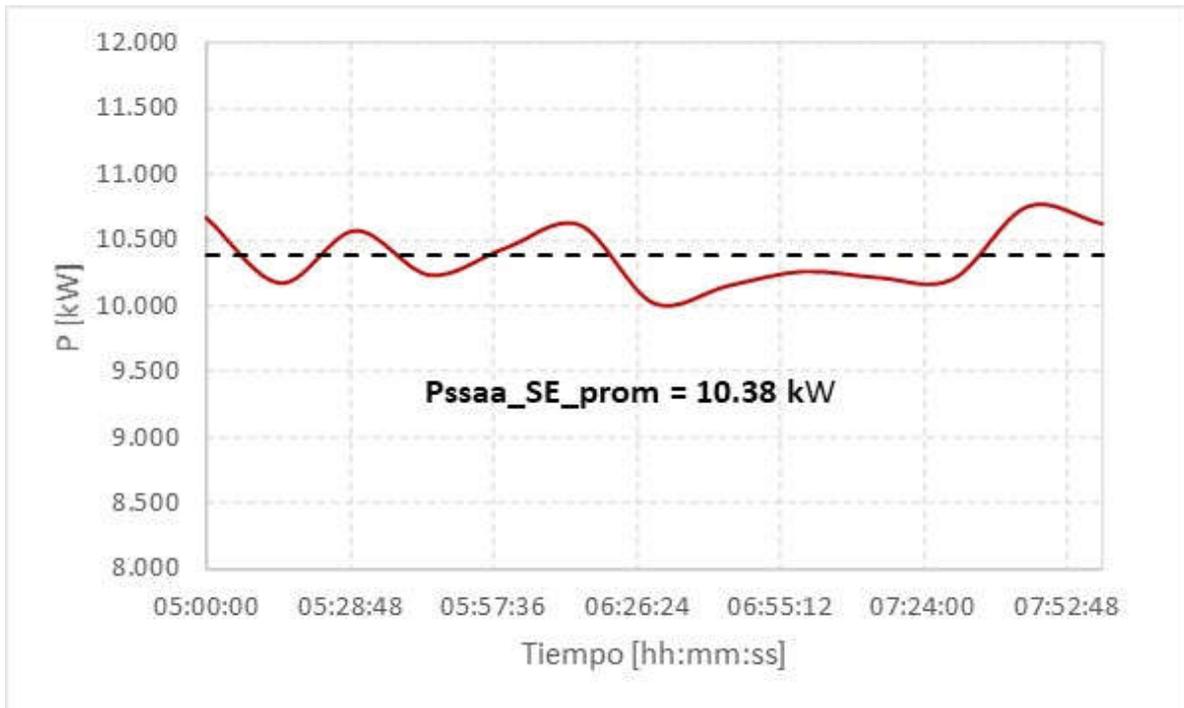


Gráfico 20. Consumo de servicios auxiliares de la SE tchamma.

Por otro lado, el consumo promedio de los SSAA de cada aerogenerador para esta condición fue informado en un valor de 25 kW promedio. De lo anterior, el consumo de servicios auxiliares total queda determinado como:

$$P_{SSAA} = \sum_{i=1}^n P_{SSAA_{WTGi}} + P_{trSSAA}$$

$$P_{SSAA} = 35 \times 25 \text{ kW} + 10.38 \text{ kW} = 885.38 \text{ kW}$$

6.1.4. Potencia de pérdidas de la central

La potencia de pérdidas de la central se obtiene como la suma de las pérdidas del transformador de potencia de la central y las pérdidas en el sistema colector de media tensión (cables MT + transformadores de bloque de los aerogeneradores).

La expresión para el cálculo de la potencia de pérdidas de la central se muestra a continuación:

$$P_{perd_{Central}} = P_{bruta} - P_{neta} - P_{SSAA}$$

$$P_{perd_{Central}} = 157.5 \text{ MW} - 155.4 \text{ MW} - 0.88538 \text{ MW}$$

$$P_{perd_{Central}} = 1.21462 \text{ MW}$$

Este valor debe ser desagregado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en el transformador principal ($P_{perd Tr Ppal}$).
- Pérdidas en la red colectora de MT ($P_{perd red MT}$).

En la Tabla 5 se muestra las pérdidas de vacío y carga del transformador de potencia, cabe mencionar que las pérdidas en carga están referidas a la potencia nominal del transformador (170 MVA), por lo que deberán corregirse al estado de carga particular de la prueba. La expresión de pérdidas del transformador de potencia es la siguiente:

$$P_{perd Tr ppal} = \text{Pérdidas}_{carga} + \text{Pérdidas}_{vacío}$$

Las pérdidas en carga en este escenario se consideran en el valor nominal presentado en la Tabla 5. Por lo tanto, las pérdidas en el transformador de potencia quedan determinadas por la siguiente expresión:

$$P_{perd Tr ppal} = 453.43 \text{ kW} + 56.09 \text{ kW} = 509.52 \text{ kW}$$

De lo anterior, las pérdidas en la red colectora quedan determinadas por la siguiente expresión:

$$P_{perd red MT} = P_{perd central} - P_{perd Tr ppal}$$

$$P_{perd red MT} = 1.21462 \text{ MW} - 0.50952 \text{ MW} = 705.1 \text{ kW}$$

6.1.5. Resultados

En base a los cálculos presentados en las secciones precedentes y los registros operacionales, a continuación, se muestra el resumen de resultados:

Gráfico 21. Resumen de resultados de potencia máxima – PE Tchamma.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
PE Tchamma	157.5	885.38	1.21462	155.4

7. CONCLUSIONES

Se determinó en base a los registros operacionales y cálculos que el PE Tchamma puede generar una potencia bruta máxima de **157.5 MW**, entregando en el punto de conexión una potencia de **155.4 MW**.

Tabla 8. Potencia Máxima – PE Tchamma.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
PE Tchamma	157.5	885.38	1.21462	155.4