



estudios energéticos consultores.
GRUPO MERCADOS ENERGÉTICOS CONSULTORES

INFORME DE DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE PARTIDA Y DETENCIÓN

Parque Eólico Tchamma



MAINSTREAM
RENEWABLE
POWER

Diciembre 2021

A 0668

Tabla de contenido

REGISTRO DE COMUNICACIONES.....	6
SECCIÓN PRINCIPAL	7
1. INTRODUCCIÓN.....	7
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
5.1. Ensayo de partida y detención sobre el parque completo.....	18
5.2. Ensayo de partida y detención sobre un aerogenerador individual	21
6. PÉRIDAS Y CONSUMOS PROPIOS	24
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. Consumo de SSAA a nivel aerogenerador.....	25
Tabla 8. Consumo de SSAA a nivel planta.	25
Tabla 9. Parámetros de partida del Parque Eólico Tchamma.	25
Tabla 10. Parámetros de detención del Parque Eólico Tchamma.....	26
Tabla 11. Parámetros de partida del aerogenerador T35.	26
Tabla 12. Parámetros de detención del aerogenerador T35.....	27
Gráfico 1. Esquema Unilineal de interconexión del sistema.	9
Gráfico 2. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Tchmma.....	9
Gráfico 3. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (1 de 3).....	11
Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (2 de 3).....	12
Gráfico 5. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (3 de 3).....	12
Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.....	13
Gráfico 7. Curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.....	14
Gráfico 8. Curva de velocidad/potencia para el conjunto de aerogeneradores.	15
Gráfico 9. Curva potencia frecuencia.....	16
Gráfico 10. Potencia activa durante el proceso de partida y detención del parque eólico.	18
Gráfico 11. Potencia reactiva durante el proceso de partida y detención del parque eólico.....	19
Gráfico 12. tensión durante el proceso de partida y detención del parque eólico.....	19
Gráfico 13. Detalle del proceso de detención para el parque completo.	20
Gráfico 14. Detalle del proceso de partida para el parque completo.....	20
Gráfico 15. Potencia activa durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35. ..	21
Gráfico 16. Potencia reactiva durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35.	22
Gráfico 17. Tensión durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35.....	22

Gráfico 18. Detalle del proceso de detención para el aerogenerador T35.23

Gráfico 19. Detalle del proceso de partida para el aerogenerador T35..... 24

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	31/12/2021	Emisión original	V1	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 11 y 19 de noviembre de 2021, en relación con el proceso de determinación de los parámetros de partida y detención.

2. MARCO NORMATIVO

Las pruebas realizadas se programaron en base al ANEXO TÉCNICO de la NTSyCS “Determinación de Parámetros para los Procesos de Partida y Detención de Unidades Generadoras”, y permitieron determinar los tiempos de partida y de detención y la provisión al CEN de la información requerida por el Artículo 10 del Anexo Técnico:

- Información técnica, recomendaciones del fabricante y antecedentes, etc.
- Antecedentes de la operación de la unidad, registros, etc.
- Antecedentes técnicos que respalden el comportamiento esperado o desempeño registrado.

Los datos más importantes relevados son:

- Los tiempos desde el ingreso del parque hasta llegar al mínimo técnico y desde ese punto a máxima potencia y la tasa de incremento de la generación (MW/min).
- El tiempo mínimo de operación para su detención y la tasa de reducción de la generación (MW/min)

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. Los mismos se encuentran limitados a 4.5 MW y totalizan una potencia instalada de **157.5 MW**. En el Gráfico 6 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 1 se muestra un esquema unilíneal de la interconexión del parque con el sistema, en el Gráfico 2 el esquema unilíneal de la zona de influencia y en los Gráficos 4 a 6 se muestra el esquema unilíneal 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 1. Esquema Unilineal de interconexión del sistema.

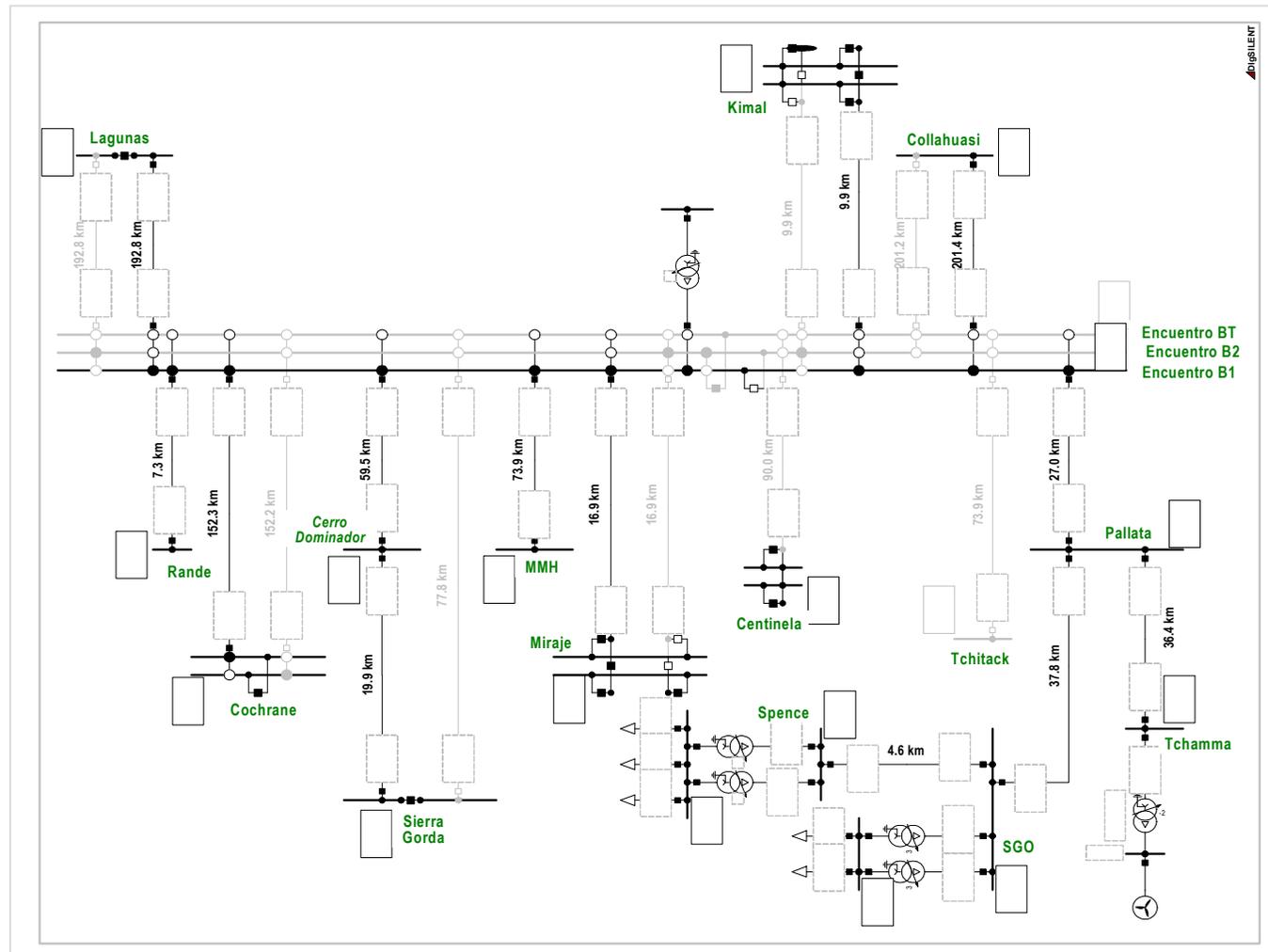


Gráfico 2. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Tchamma.

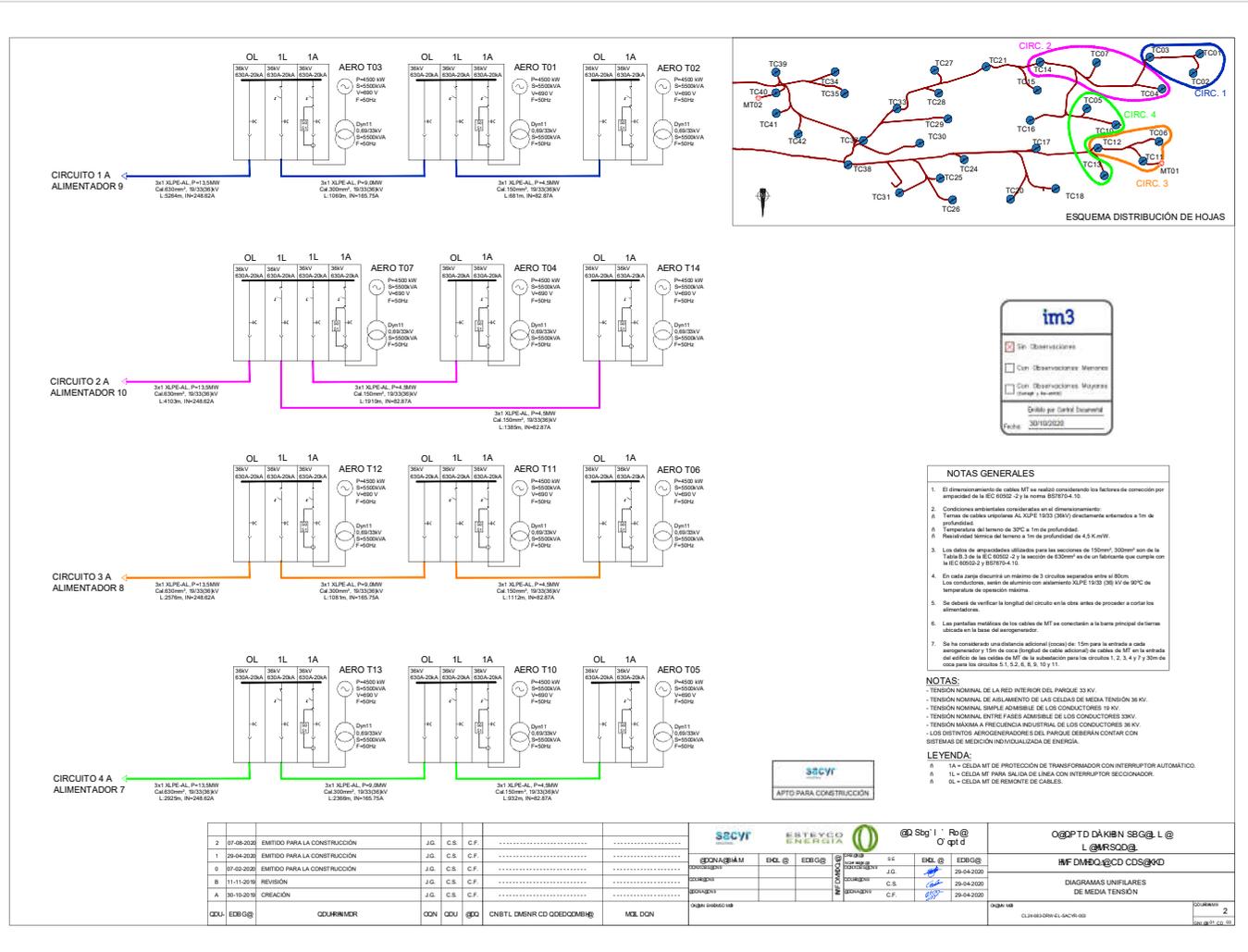


Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (2 de 3).

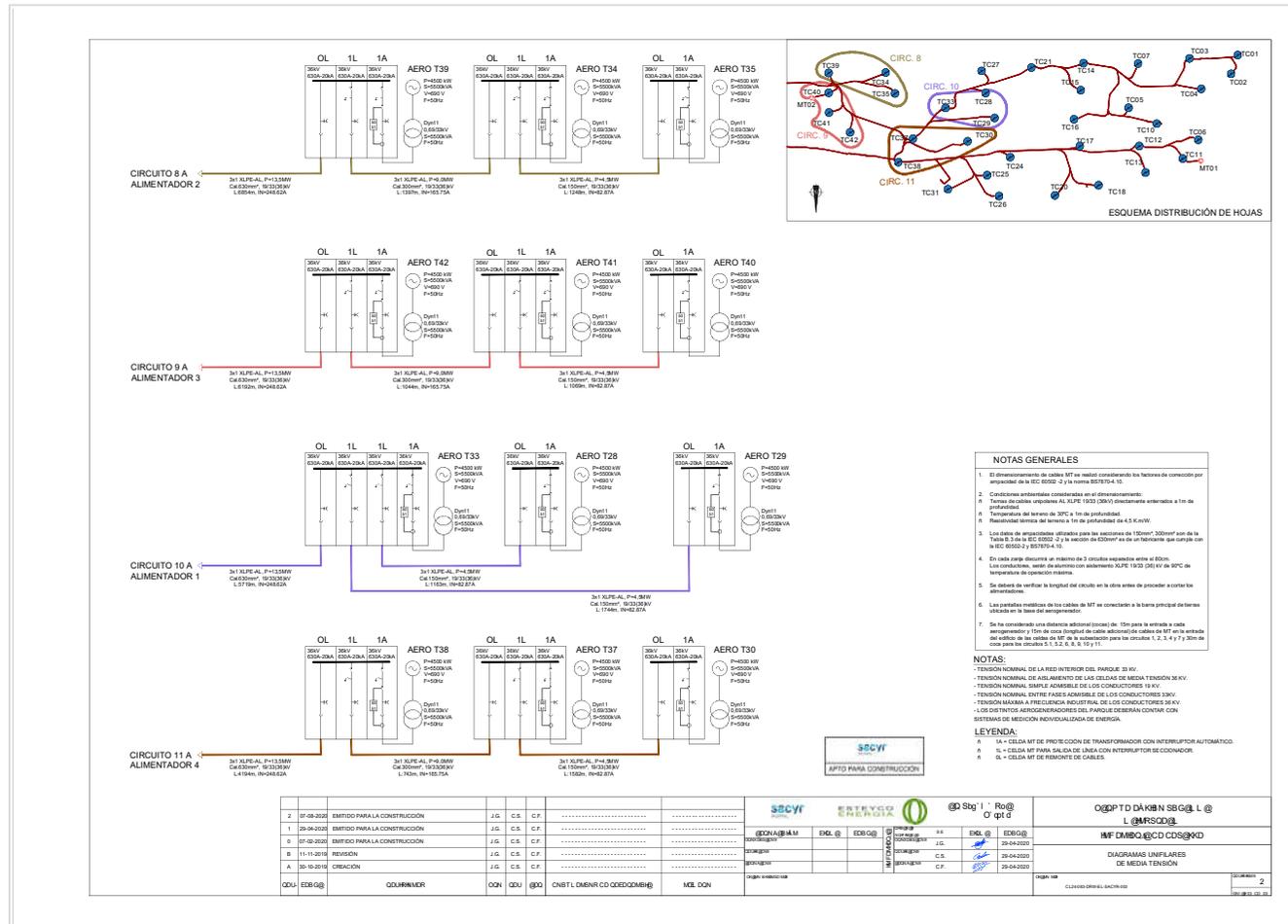


Gráfico 5. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV (3 de 3).

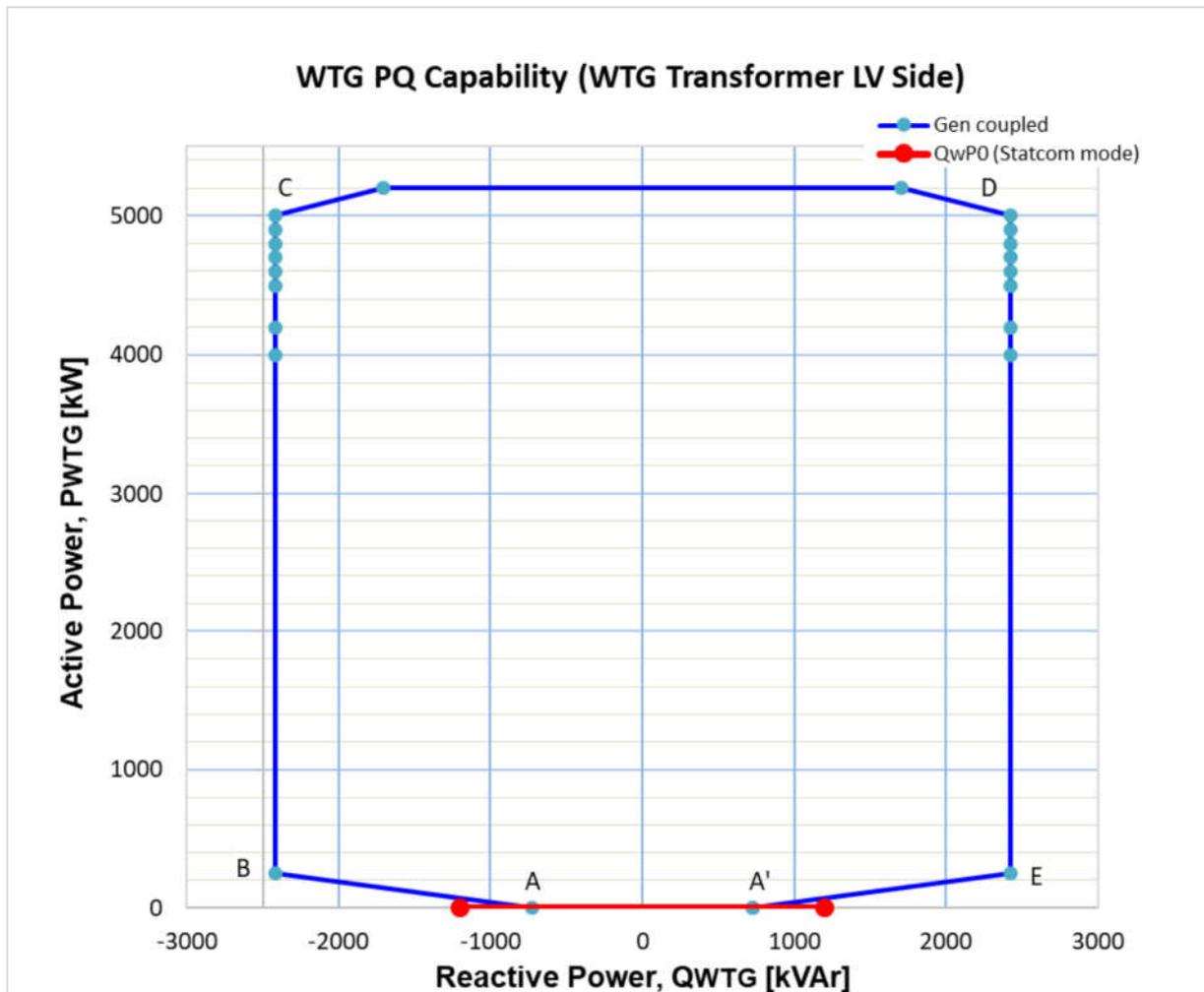


Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

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.

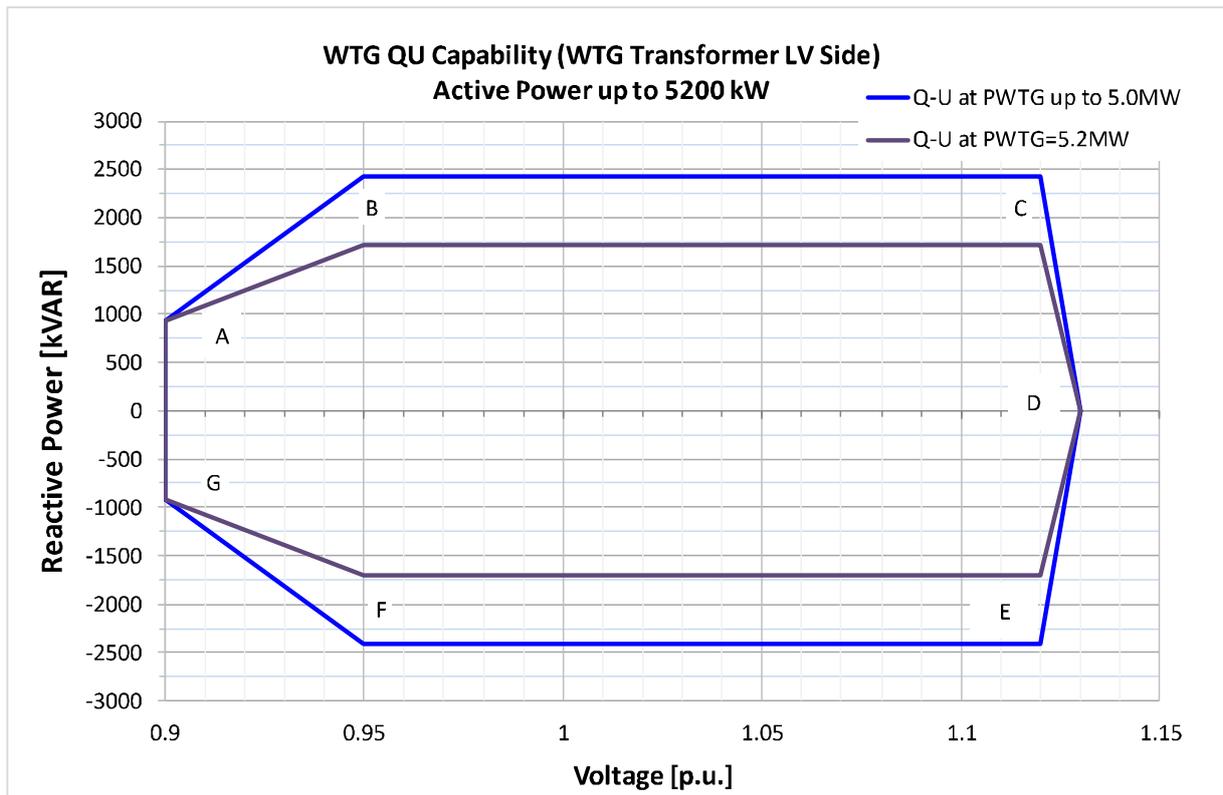


Gráfico 7. Curva QV WTG Siemens Gamesa SG 5.0 - 145.

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.

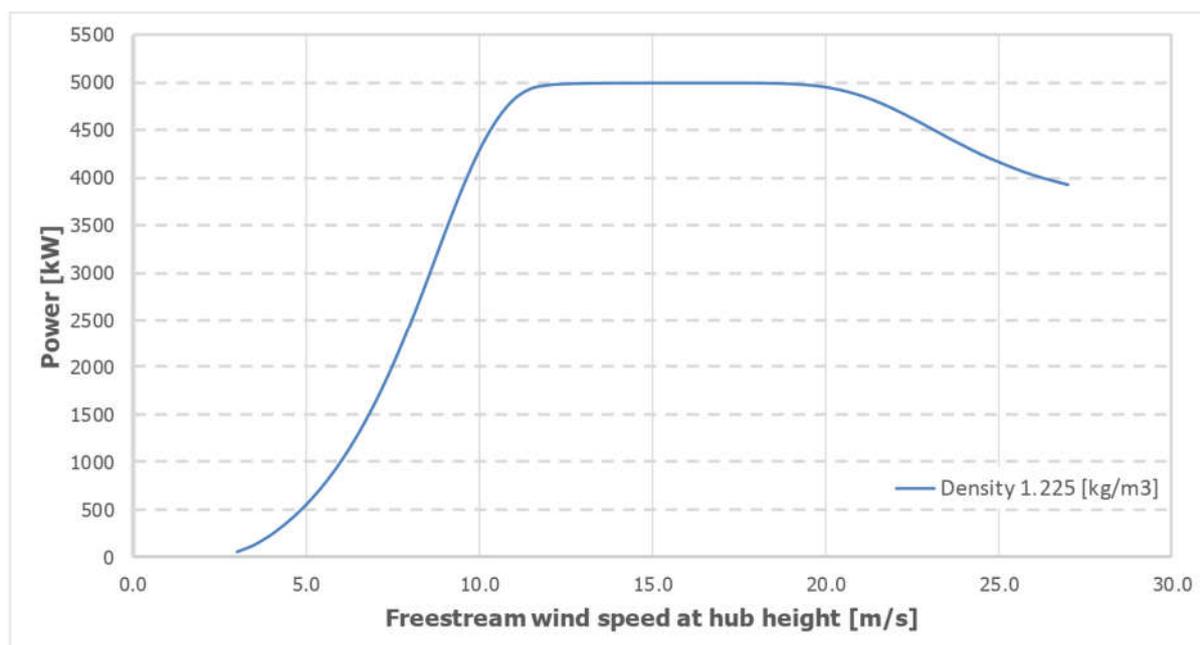


Gráfico 8. Curva de velocidad/potencia para el conjunto de aerogeneradores.

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:

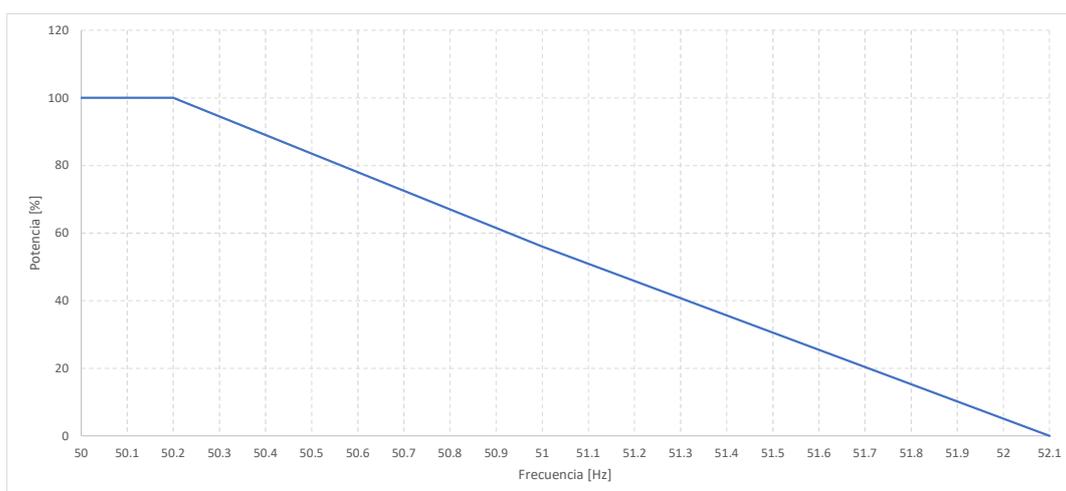


Gráfico 9. Curva potencia frecuencia.

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.

5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

5.1. Ensayo de partida y detención sobre el parque completo

Se obtuvieron registros de potencia activa, potencia reactiva y tensión en el punto de conexión de del parque eólico (sobre la barra de 220 kV de la SE Tchamma). El proceso de partida y detención sobre el parque completo se efectuó durante el día sábado 11/12/2021, cambiando las consignas de producción por medio del control de planta del parque, con las siguientes estampas de tiempo:

- Señal de detención: 17:17:35 [hh:mm:ss]
- Llegada a mínimo técnico: 17:20:09 [hh:mm:ss]
- Detención de unidades (pausa): 17:20:33 [hh:mm:ss]
- Señal de partida: 17:23:37 [hh:mm:ss]
- Inicio de toma de carga: 17:25:20 [hh:mm:ss]
- Llegada a potencia máxima: 17:27:55 [hh:mm:ss]

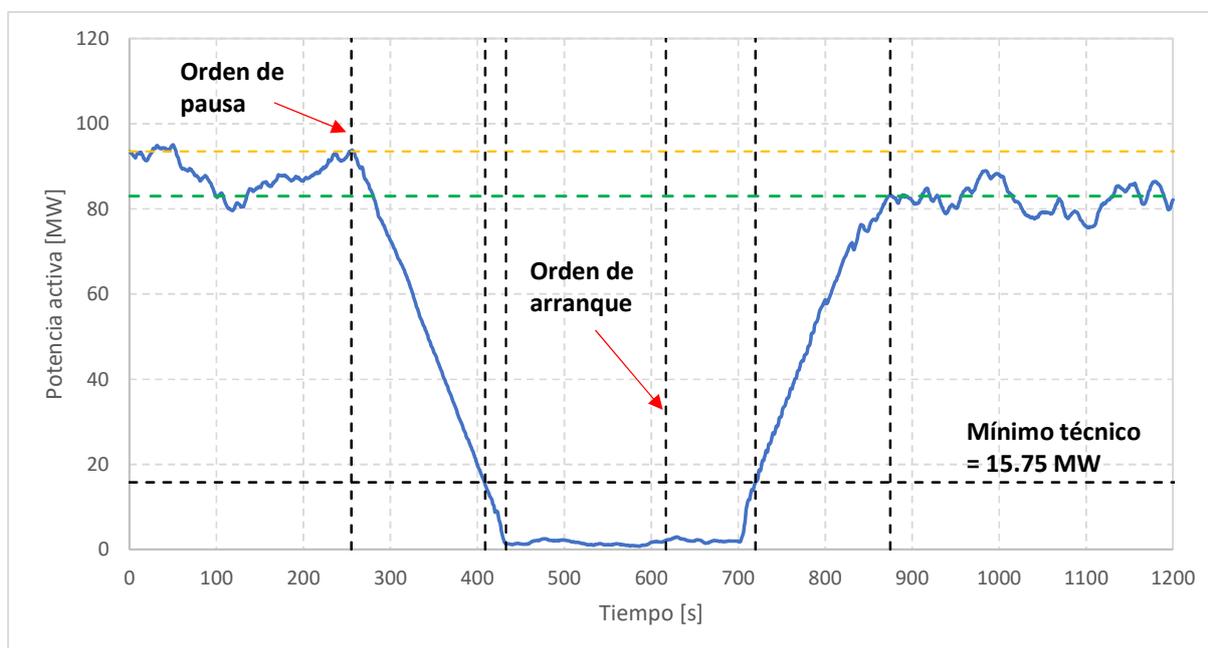


Gráfico 10. Potencia activa durante el proceso de partida y detención del parque eólico.

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



Gráfico 11. Potencia reactiva durante el proceso de partida y detención del parque eólico.

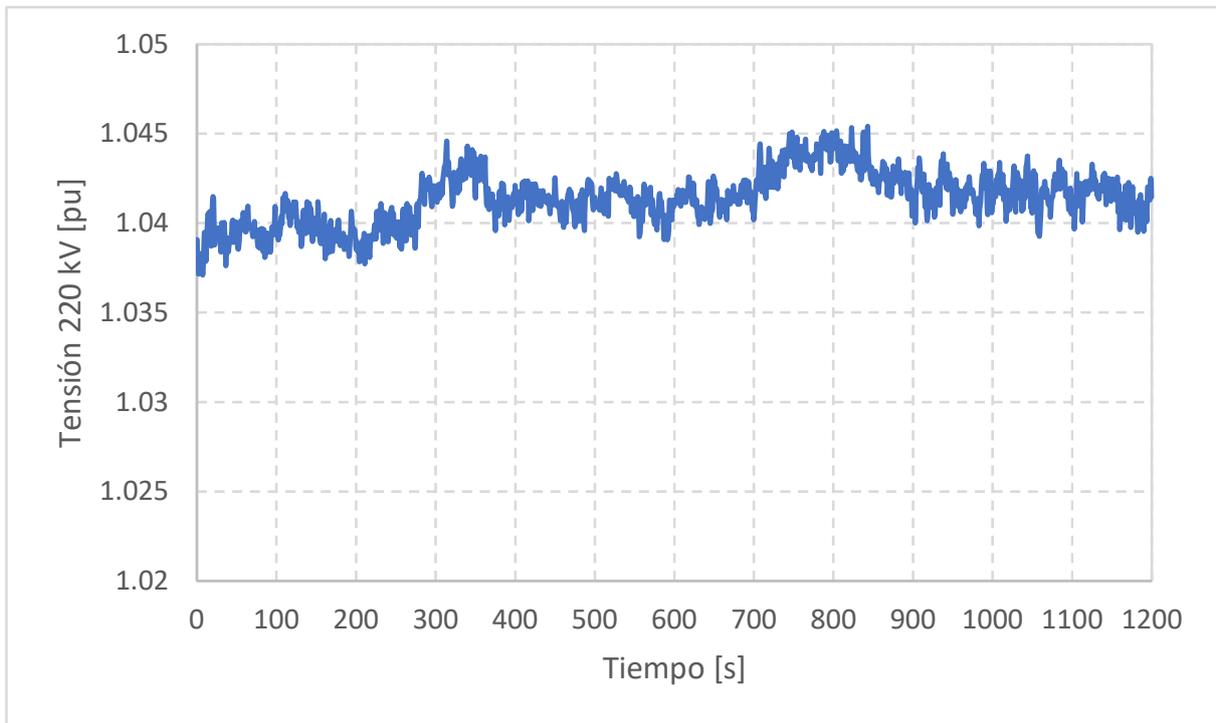


Gráfico 12. tensión durante el proceso de partida y detención del parque eólico.

En el Gráfico 13 se observa el detalle del proceso de detención, desde el momento del envío de la consigna hasta la parada completa de la central, pasando por el mínimo técnico.

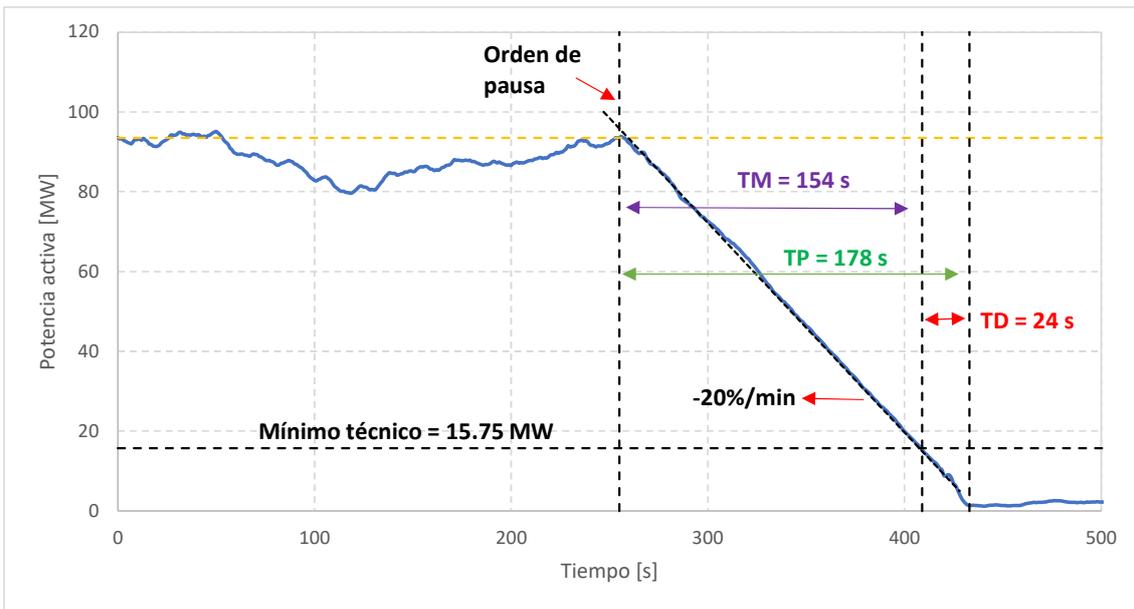


Gráfico 13. Detalle del proceso de detención para el parque completo.

- Desde una potencia de **93.5 MW** se envía el comando de parada de unidades a los **255 s**, registrando un tiempo hasta llegar al mínimo técnico de **154 s (TM)** y un tiempo hasta llegar a la detención completa de las unidades de **178 s (TP)**.
- Desde mínimo técnico hasta llegar a la detención completa se registra un tiempo de **24 s (TD)**.
- Para este proceso se registra una pendiente de **-20%/min** y con esta se recalcula el tiempo hasta el mínimo técnico, considerando la detención desde la potencia máxima registrada en el POI (**155.4 MW** del informe de potencia máxima). De lo anterior se registra **TM = 266 s** y un **TP = 290 s**, para la potencia máxima en el POI.

En el siguiente gráfico se muestra el detalle del proceso de partida para el parque completo:

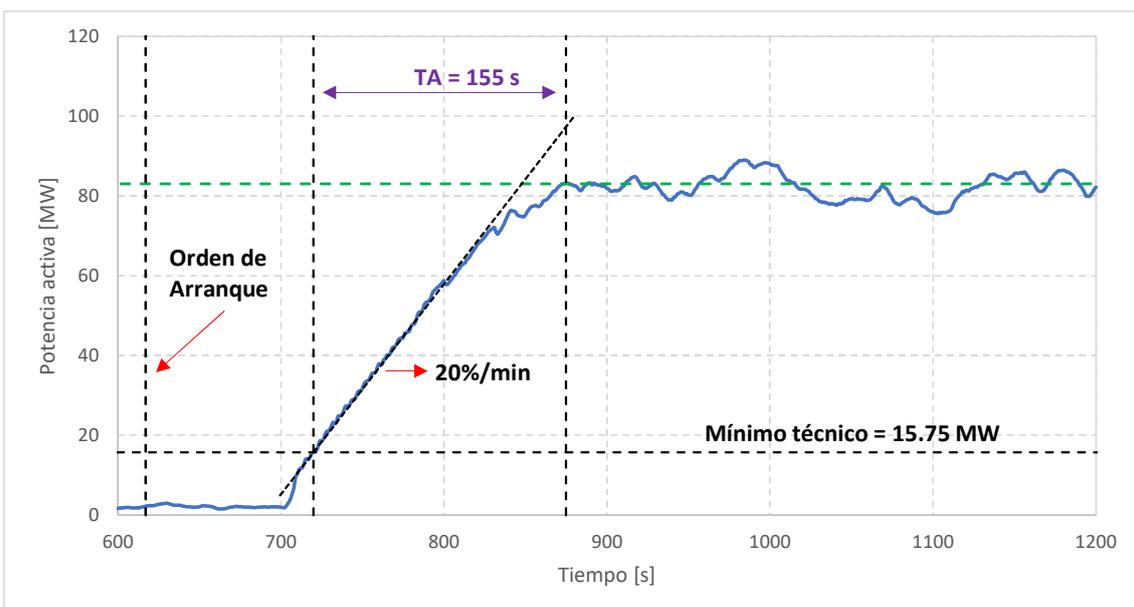


Gráfico 14. Detalle del proceso de partida para el parque completo.

- Para la partida, el operador consignó una referencia de potencia activa igual a la máxima nominal (parque liberado), observándose un **retardo de 103 segundos** aproximadamente hasta que la planta comienza a tomar carga por sobre el mínimo técnico.
- Se observa una rampa de 20 %/min, con un tiempo hasta alcanzar la máxima potencia disponible (83 MW durante la prueba) de **155s** (TA). Se realiza la corrección de este tiempo considerando la potencia máxima que puede inyectarse en el punto de conexión. El valor de TA corregido se calculo en un valor de **TA = 266 s** considerando una pendiente de subida de 20 %/min.

5.2. Ensayo de partida y detención sobre un aerogenerador individual

El día Viernes 19/11/2021 se realizó el ensayo de partida y detención sobre una unidad del PE Tchamma, mas precisamente sobre el aerogenerador T35. Las estampas de tiempo para cada proceso se muestran a continuación:

- Señal de detención: 17:43:26 [hh:mm:ss]
- Llegada a mínimo técnico: 17:44:21 [hh:mm:ss]
- Detención de unidades (pausa): 17:45:11 [hh:mm:ss]
- Señal de partida: 17:47:12 [hh:mm:ss]
- Inicio de toma de carga: 17:47:35 [hh:mm:ss]
- Llegada a potencia máxima: 17:48:18 [hh:mm:ss]

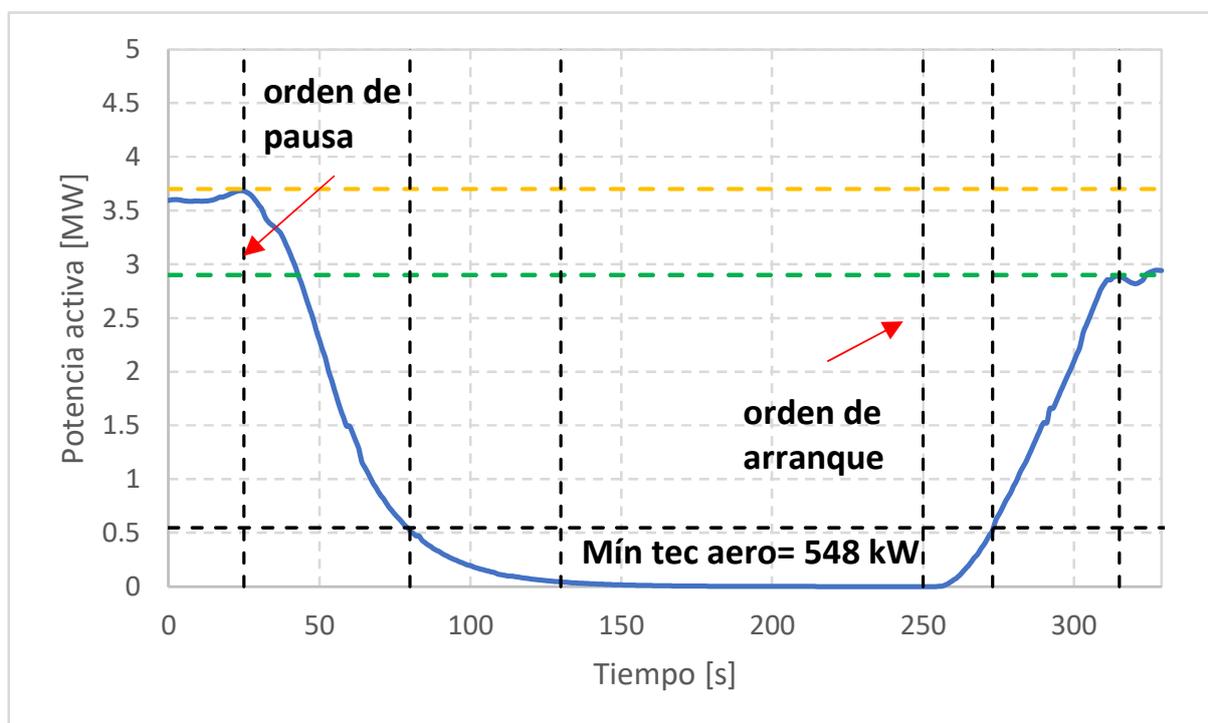


Gráfico 15. Potencia activa durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35.

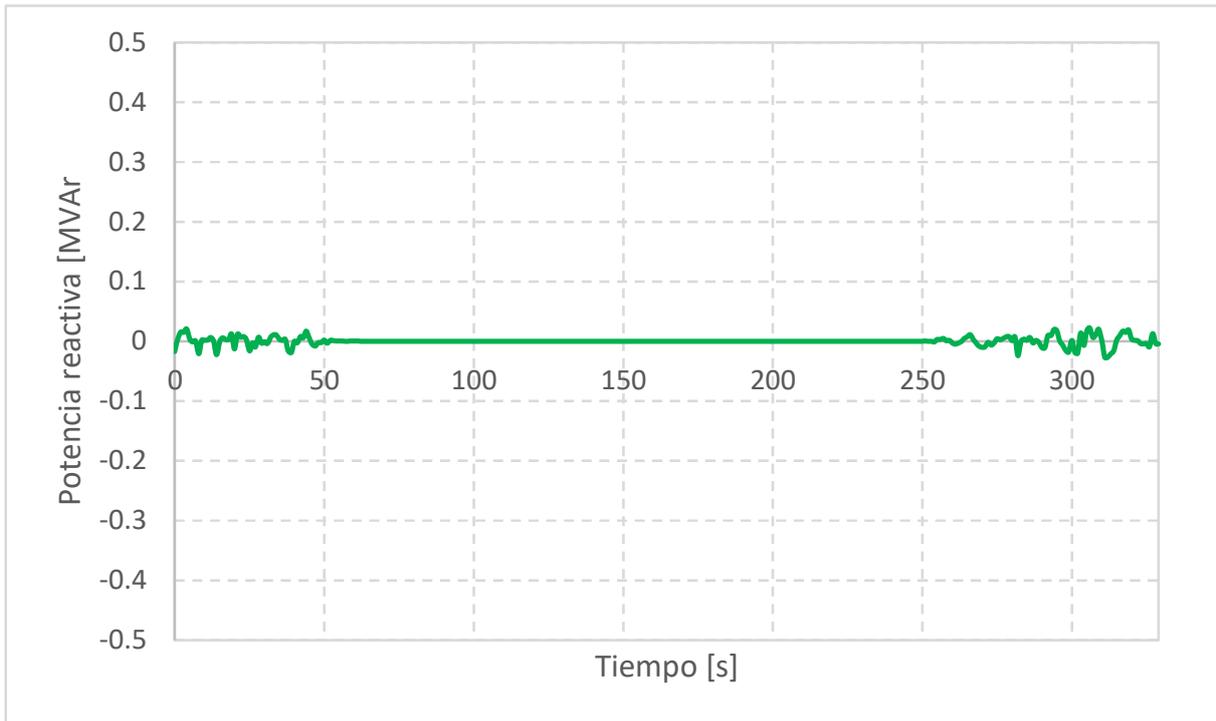


Gráfico 16. Potencia reactiva durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35.

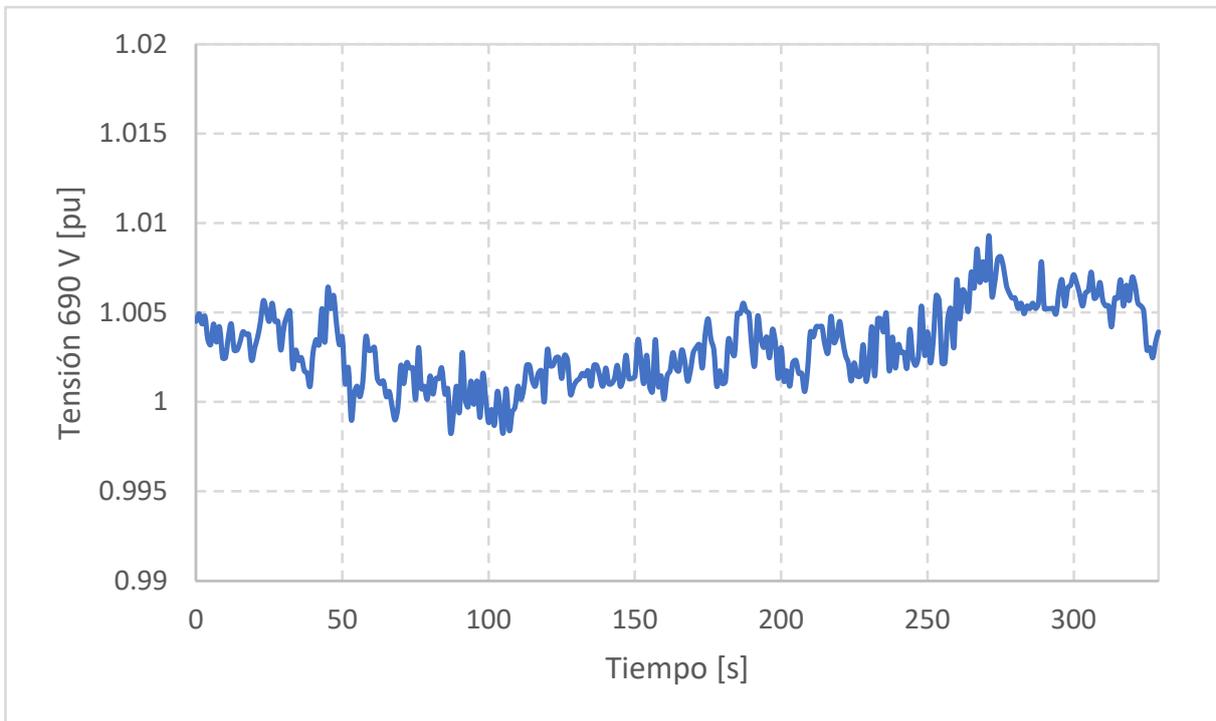


Gráfico 17. Tensión durante el proceso de partida y detención del aerogenerador T35.

En el Gráfico 18 se observa el detalle del proceso de detención, desde el momento del envío de la consigna hasta la parada de T35, pasando por el mínimo técnico.

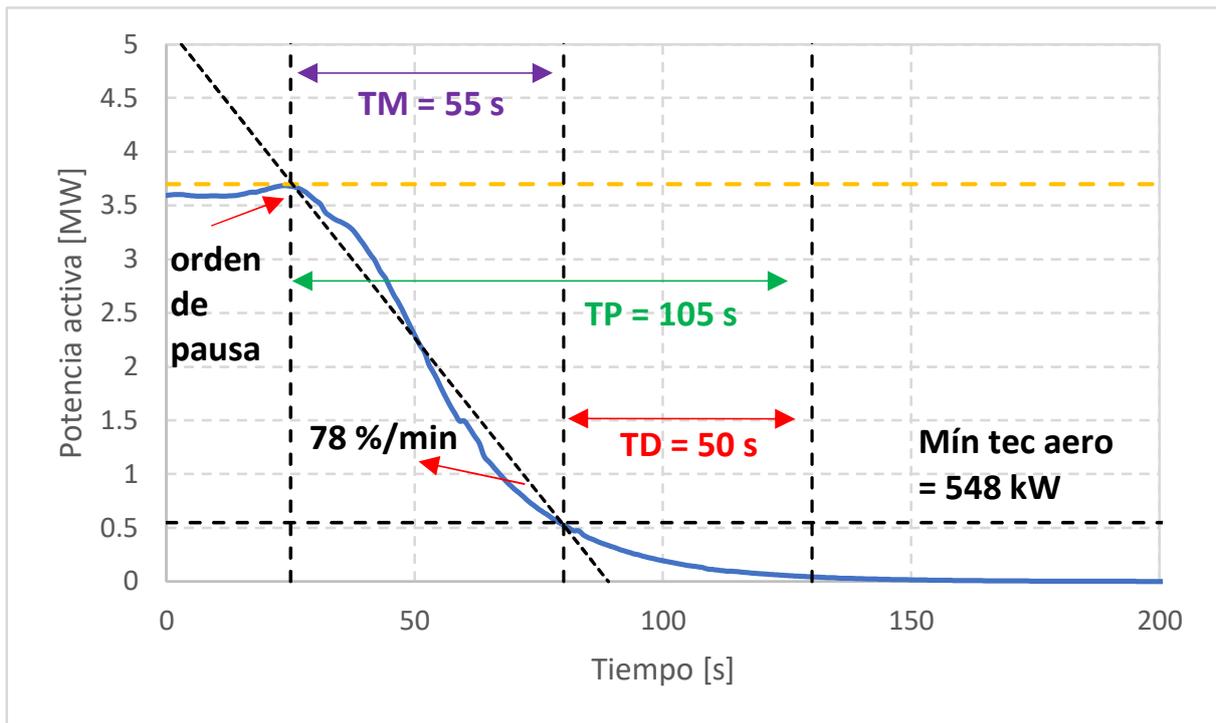


Gráfico 18. Detalle del proceso de detención para el aerogenerador T35.

- Desde una potencia de **3.7 MW** se envía el comando de detención a los **25 s**, registrando un tiempo hasta llegar al mínimo técnico del aerogenerador de **55 s** (TM) y un tiempo hasta llegar a la detención completa de **105 s** (TP).
- Desde mínimo técnico hasta llegar a la detención completa se registra un tiempo de **50 s** (TD).
- Para este proceso se registra una pendiente de **-78%/min** y con esta se recalcula el tiempo hasta el mínimo técnico, considerando la detención desde la potencia máxima del aerogenerador (**4.5 MW**). De lo anterior se calcula **TM = 68 s** y un **TP = 105 s**, para la potencia máxima del aerogenerador.

En el siguiente gráfico se muestra el detalle del proceso de partida del aerogenerador T35:

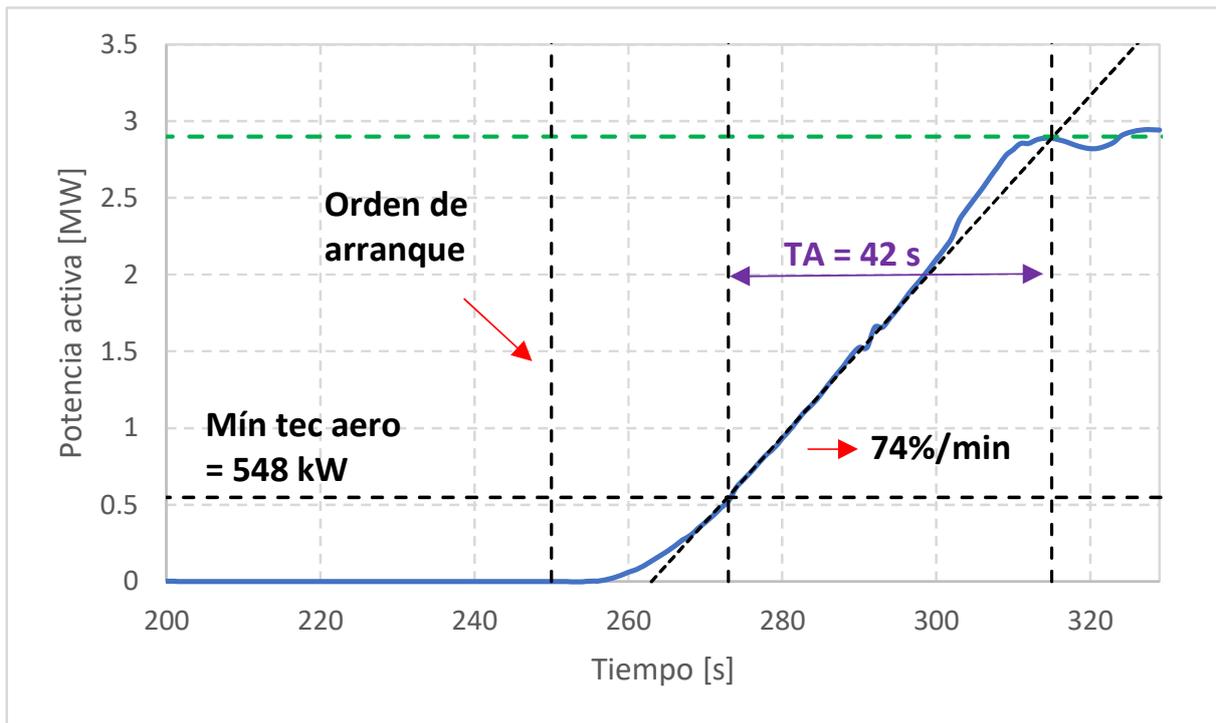


Gráfico 19. Detalle del proceso de partida para el aerogenerador T35.

- Para la partida, el operador consignó una referencia de potencia activa igual a la máxima nominal, observándose un **retardo de 23 segundos** aproximadamente hasta que el aerogenerador comienza a tomar carga por sobre el mínimo técnico.
- Se observa una rampa de 74 %/min, con un tiempo hasta alcanzar la máxima potencia disponible (2.9 MW) de **42 s** (TA). Se realiza la corrección de este tiempo considerando la potencia máxima del aerogenerador. El valor de TA corregido se calculó en un valor de **TA = 71 s** considerando una pendiente de subida de 74 %/min (determinada del ensayo de partida del aerogenerador).

6. PÉRIDAS Y CONSUMOS PROPIOS

El consumo de energía eléctrica durante los procesos de partida y detención se consideró a partir de la siguiente expresión:

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

$P_{SSAA_{WTGi}}$ = consumo de servicios auxiliares de los aerogeneradores.

P_{trSSAA} = Consumo de los servicios auxiliares de la SE Tchamma.

El consumo de servicios auxiliares de la subestación Tchamma se consideró el **10 kW**. En cuanto al consumo de servicios auxiliares de las unidades generadoras, estos se informaron en **9 kW** para

el proceso de detención y **6 kW** para el proceso de partida (por aerogenerador).

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para cada caso:

Tabla 7. Consumo de SSAA a nivel aerogenerador.

Proceso	Consumo SSAA [kW]
Detención	9
Partida	6
Auxiliares de SE Tchamma	10
Total - detención	19
Total - partida	16

Tabla 8. Consumo de SSAA a nivel planta.

Proceso	Consumo SSAA [kW]
Detención	315
Partida	210
Auxiliares de SE Tchamma	10
Total - detención	325
Total - partida	220

7. CONCLUSIONES

En base a los registros obtenidos en el ensayo de partida y detención del PE Tchamma se determinaron los parámetros asociados a la partida y detención del parque completo. Cabe aclarar que como no se realiza detención entre la Condición Fuera de Servicio y el Estado Apagado, no aplica la medición de tiempos ni el cálculo de energía eléctrica durante los hitos I) y VI) de las siguientes tablas.

Tabla 9. Parámetros de partida del Parque Eólico Tchamma.

Parámetro	I. Desde el inicio del proceso de partida hasta la sincronización	II. Desde la sincronización hasta alcanzar la operación a Mínimo Técnico	III. Desde la operación a Mínimo Técnico hasta la operación a potencia nominal.
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida	No aplica	6 kWh	16 kWh

Duración del proceso [mm:ss]	No aplica	1: 43	4:26
------------------------------	-----------	-------	------

Tabla 10. Parámetros de detención del Parque Eólico Tchamma.

Parámetro	IV. Desde la operación a potencia nominal a mínimo técnico.	V. Desde la operación a mínimo Técnico hasta la desconexión.	VI. Desde la desconexión de la unidad hasta el término del proceso de detención (estado de apagado)	VII. Operación mínima antes de poder detenerse, una vez concluido un proceso de partida
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida	23 kWh	2.1 kWh	No aplica	No aplica
Duración del proceso [min:seg]	4:26	0:24	No aplica	No aplica

En base a los resultados obtenidos a sobre el aerogenerador T35 se determinaron los parámetros de partida y detención que caracterizan el comportamiento de un aerogenerador. Cabe aclarar que como no se realiza detención entre la Condición Fuera de Servicio y el Estado Apagado, por lo tanto, no aplica la medición de tiempos ni el cálculo de energía eléctrica durante los hitos I) y VI) de las siguientes tablas.

Tabla 11. Parámetros de partida del aerogenerador T35.

Parámetro	I. Desde el inicio del proceso de partida hasta la sincronización	II. Desde la sincronización hasta alcanzar la operación a Mínimo Técnico	III. Desde la operación a Mínimo Técnico hasta la operación a potencia nominal.
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida	No aplica	0.038 kWh	0.119 kWh

Duración del proceso [mm:ss]	No aplica	0: 23	1:11
------------------------------	-----------	-------	------

Tabla 12. Parámetros de detención del aerogenerador T35.

Parámetro	IV. Desde la operación a potencia nominal a mínimo técnico.	V. Desde la operación a mínimo Técnico hasta la desconexión.	VI. Desde la desconexión de la unidad hasta el término del proceso de detención (estado de apagado)	VII. Operación mínima antes de poder detenerse, una vez concluido un proceso de partida
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida	0.170 kWh	0.125 kWh	No aplica	No aplica
Duración del proceso [min:seg]	1:08	0:50	No aplica	No aplica