



estudios energéticos consultores.
GRUPO MERCADOS ENERGÉTICOS CONSULTORES

INFORME DE DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE PARTIDA Y DETENCIÓN

Parque Eólico Cerro Tigre



Enero 2022

A 0668 | R 1067-21

Tabla de contenido

REGISTRO DE COMUNICACIONES	5
SECCIÓN PRINCIPAL	6
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Marco normativo	6
1.2. Descripción de la planta	6
1.3. Descripción del control de planta y funcionalidades	12
1.4. Antecedentes de unidades de similares características	17
1.5. Descripción de las pruebas	17
2. RESULTADOS OBTENIDOS	17
2.1. Registros	17
2.2. Consumos de servicios auxiliares	21
3. CONCLUSIONES	23

Índice de tablas y gráficos

Tabla 1. Valores máximos de pendiente y consigna de potencia activa.....	14
Tabla 2. Valores sugeridos de pendiente para la función limitación de rampa.	14
Tabla 3. Parametrización del modo LFSM-O.....	15
Tabla 4. Parametrización del modo FSM-O-U.	15
Tabla 5. Configuración de los límites PQ del control de potencia reactiva.....	16
Tabla 6. Tiempos asociados a la dinámica del control de potencia reactiva.	16
Tabla 7. Consumo de servicios auxiliares de los aerogeneradores	22
Tabla 8. Parámetros de partida y detención del Parque Eólico Cerro Tigre.	23
Tabla 9. Parámetros de partida y detención para un aerogenerador.	24
Gráfico 1. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Cerro Tigre.....	7
Gráfico 2. Esquema unilineal de la SE Cerro Tigre.....	8
Gráfico 3. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV. 1 de 3.	9
Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV. 2 de 3.	10
Gráfico 5. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV. 3 de 3.	11
Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Vestas V117-4.2 MW.	12
Gráfico 7. Esquema de control y medición del PE Cerro Tigre.....	13
Gráfico 8. Característica LFSM-O.	14
Gráfico 9. Característica FSM-O-U.	15
Gráfico 10. Límite PQ del control de potencia reactiva.....	16
Gráfico 11. Potencia activa durante el proceso de detención y partida del parque eólico.....	18
Gráfico 12. Potencia reactiva durante el proceso de detención y partida del parque eólico.	18
Gráfico 13. Tensión en el punto de conexión durante el proceso de detención y partida del parque eólico.....	18
Gráfico 14. Detalle del proceso de detención.	19
Gráfico 15. Detalle del proceso de partida.....	19
Gráfico 16. Potencia activa durante el proceso de detención del aerogenerador.....	20
Gráfico 17. Proceso de detención del aerogenerador.....	20
Gráfico 18. Proceso de partida del aerogenerador.....	21
Gráfico 19. Verificación del limitador de rampa.....	21

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	14/01/2021	Emisión original	V1	Preparó EA - BL	FM

SECCIÓN PRINCIPAL

1. INTRODUCCIÓN

En el presente informe se exhiben los resultados obtenidos en los ensayos de campo realizados en el Parque Eólico Cerro Tigre, durante los días 12, 13 y 14 de diciembre de 2021, en relación al proceso de determinación de los parámetros de partida y detención de la planta.

Los ensayos fueron realizados encontrándose en servicio 41 de los 44 aerogeneradores que conforman la totalidad del parque. La potencia disponible al momento de las pruebas fue de 172,2 MW de un total de 184,8 MW.

1.1. 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).

1.2. Descripción de la planta

El PE Cerro Tigre se encuentra ubicado a 65 km al suroeste de la ciudad de Antofagasta, en la región homónima de Chile. Está compuesto por 44 aerogeneradores de 4,2 MW marca Vestas, clase **V117-4.0/4.2 MW Strong Wind**, modelo **V117-4.2 MW IEC S / IEC IIA 50/60 Hz Power Optimized Mode (PO1)**, totalizando una potencia de 184,8 MW.

El punto de conexión del parque eólico corresponde a las barras de 220 kV de la SE Cerro Tigre y la vinculación al SEN se realiza a través de una línea de transmisión 1 x 220 kV de 12,7 km de longitud que une las SE Cerro Tigre y Farellón.

La distribución en media tensión se realiza mediante un sistema colector en 33 kV formado por 11 circuitos que recolectan la potencia de los aerogeneradores, y que acometen a la barra de 33 kV del transformador de potencia de 230/33 kV y 200 MVA (ONAF) de la SE Cerro Tigre.

En el Gráfico 1 se presenta un esquema unilineal de la zona de influencia, en el Gráfico 2 un esquema unilineal de la SE Cerro Tigre, y por último, en los Gráficos 3 a 5 se detalla el esquema unilineal del sistema colector en 33 kV.

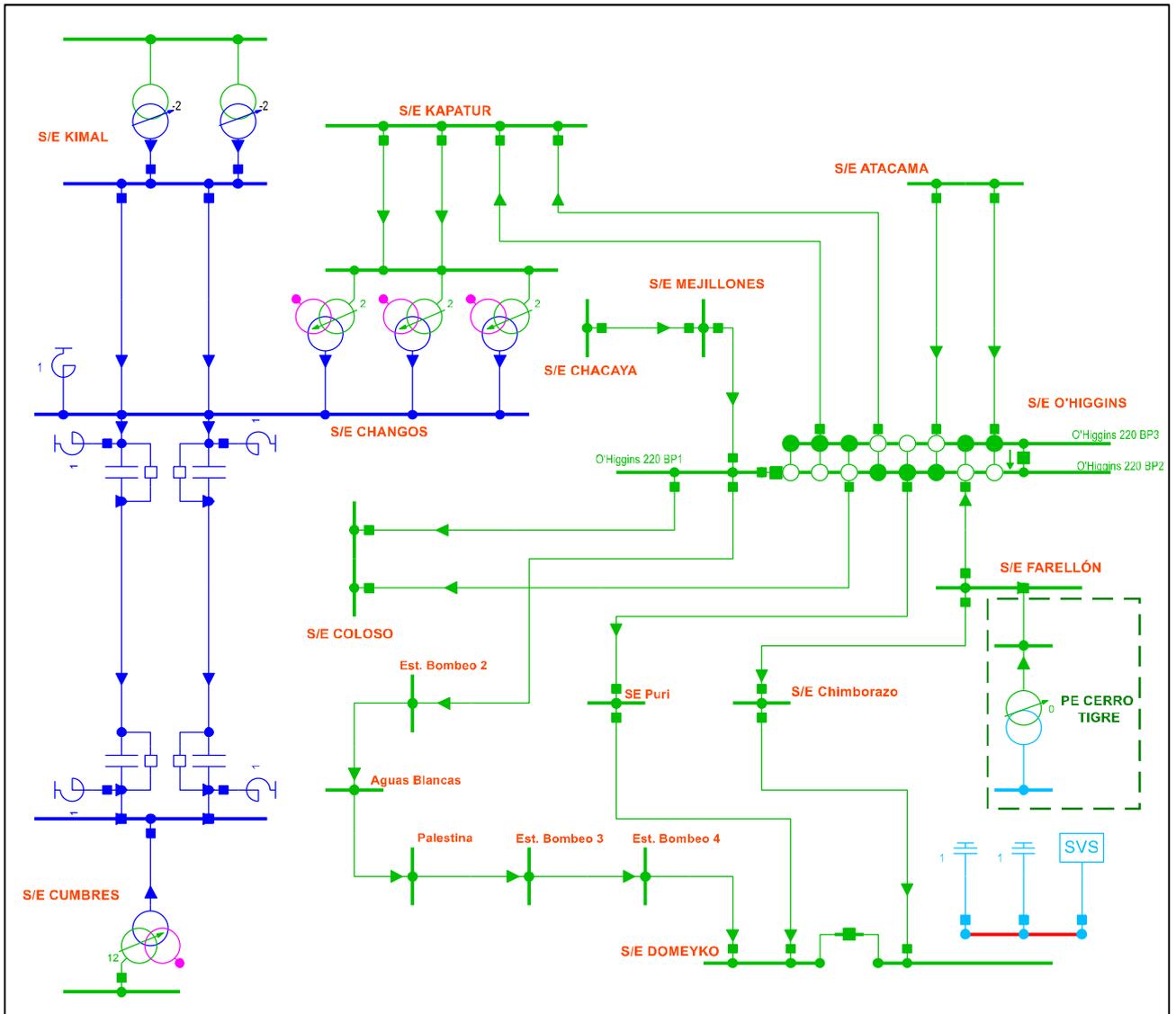


Gráfico 1. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Cerro Tigre.

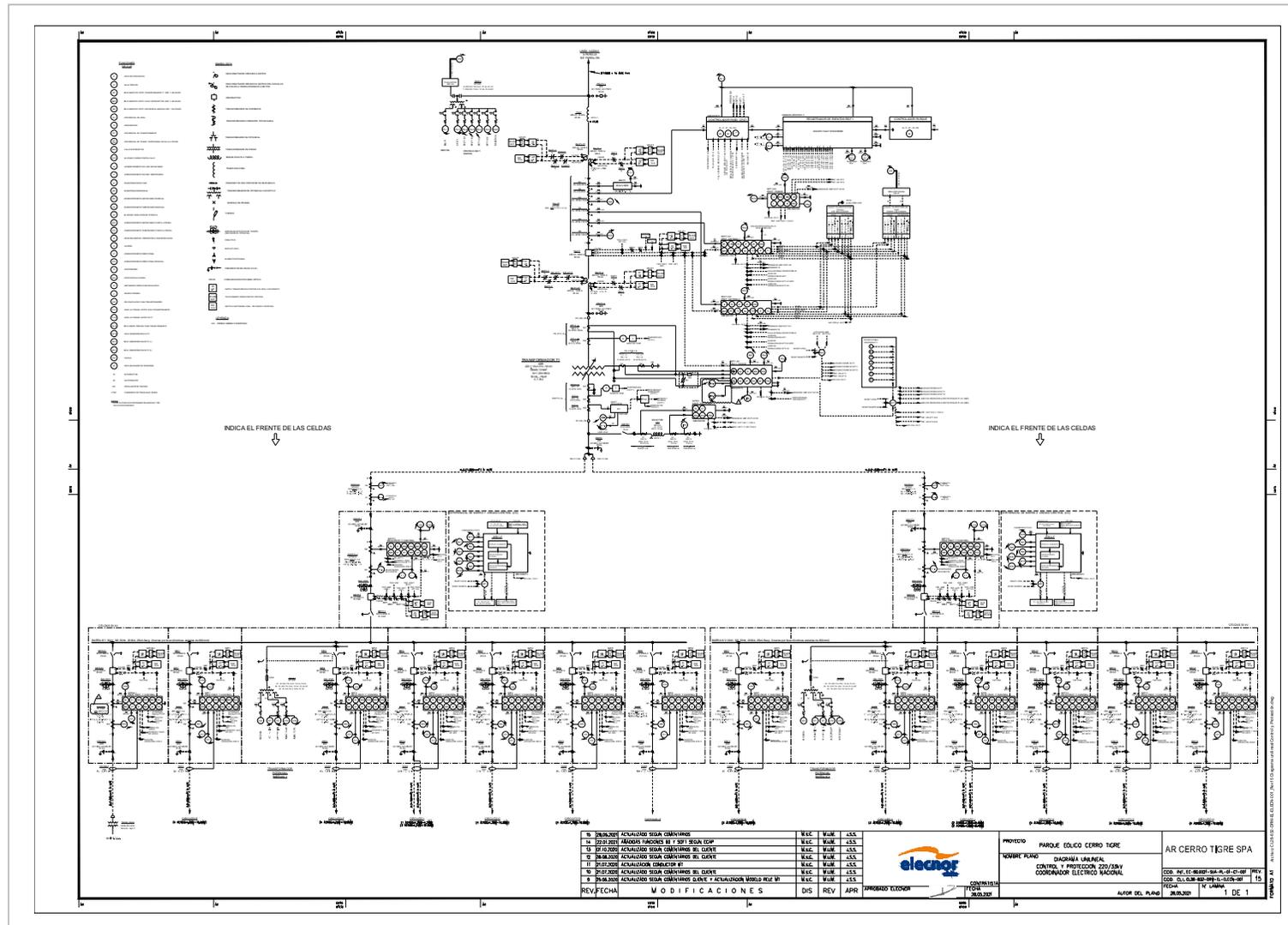


Gráfico 2. Esquema unilineal de la SE Cerro Tigre.

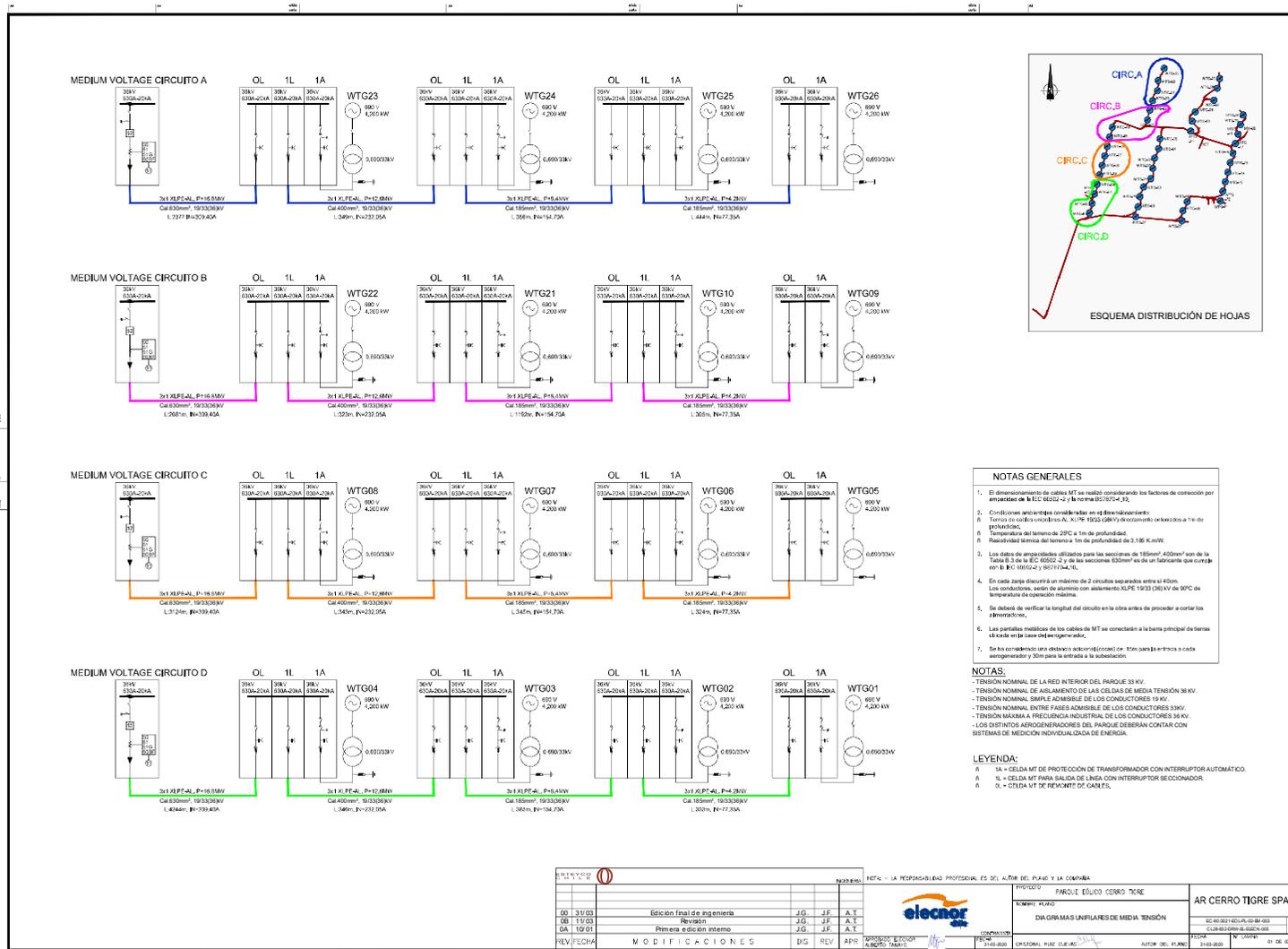


Gráfico 3. Esquema unilíneal del sistema colector en 33 kV. 1 de 3.

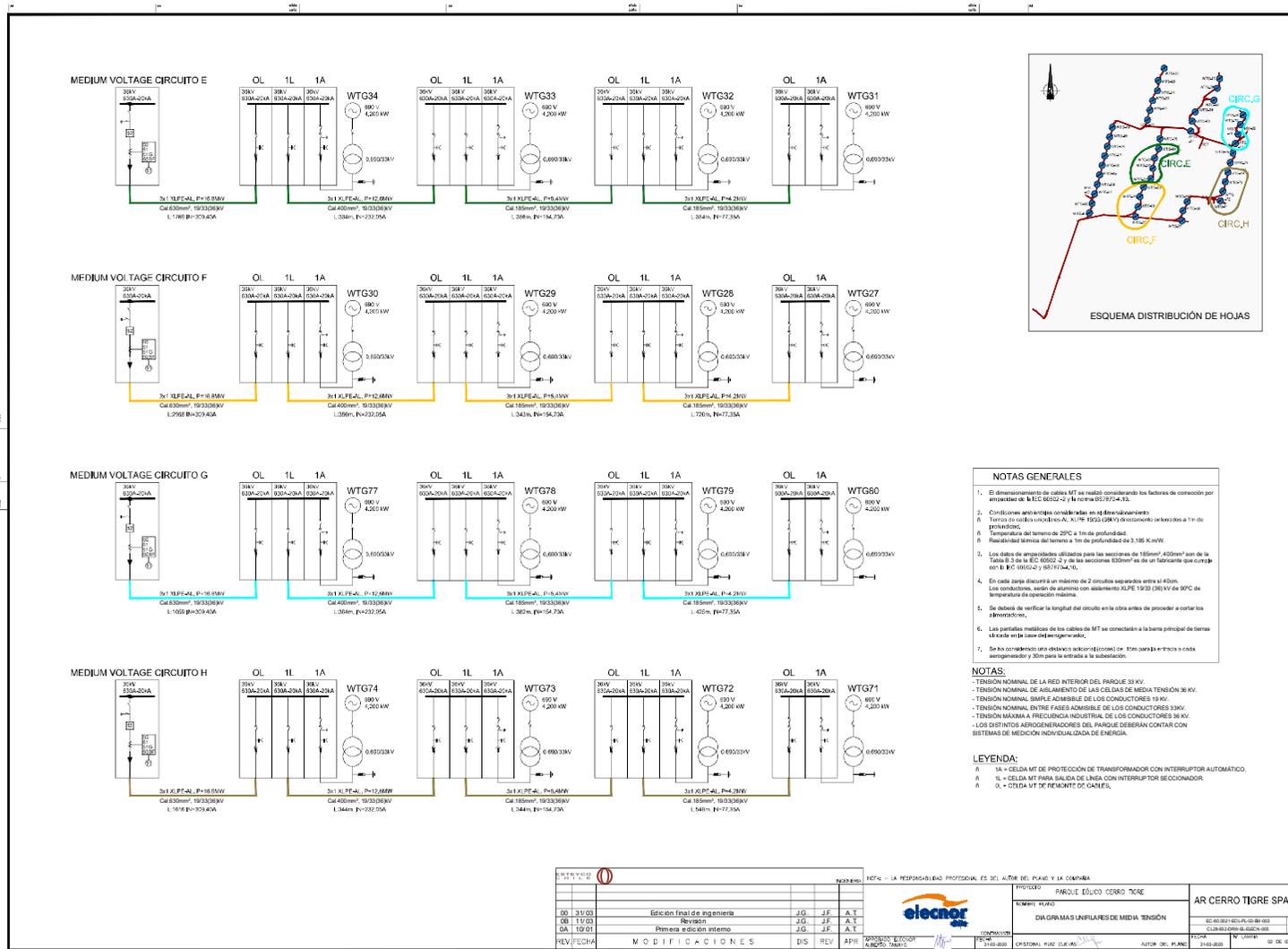


Gráfico 4. Esquema unilíneal del sistema colector en 33 kV. 2 de 3.

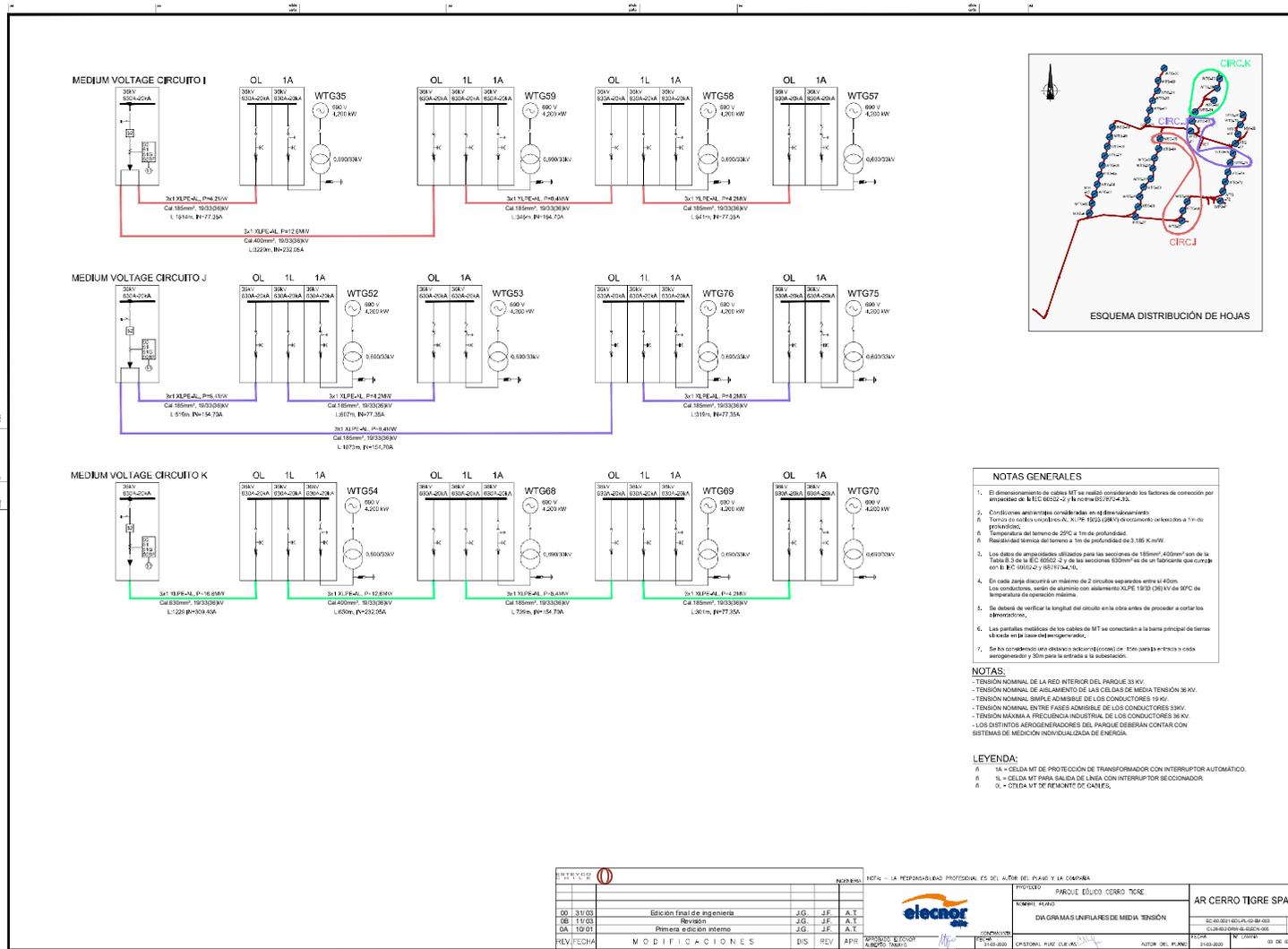


Gráfico 5. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV. 3 de 3.

Los aerogeneradores son de velocidad variable del tipo DFIG (Doubly Fed Asynchronous Generator). Cada unidad cuenta con un transformador de bloque de 0,72/33 kV y 5150 kVA.

En el Gráfico 6 se presenta la curva de capacidad correspondiente al modelo de aerogenerador descrito.

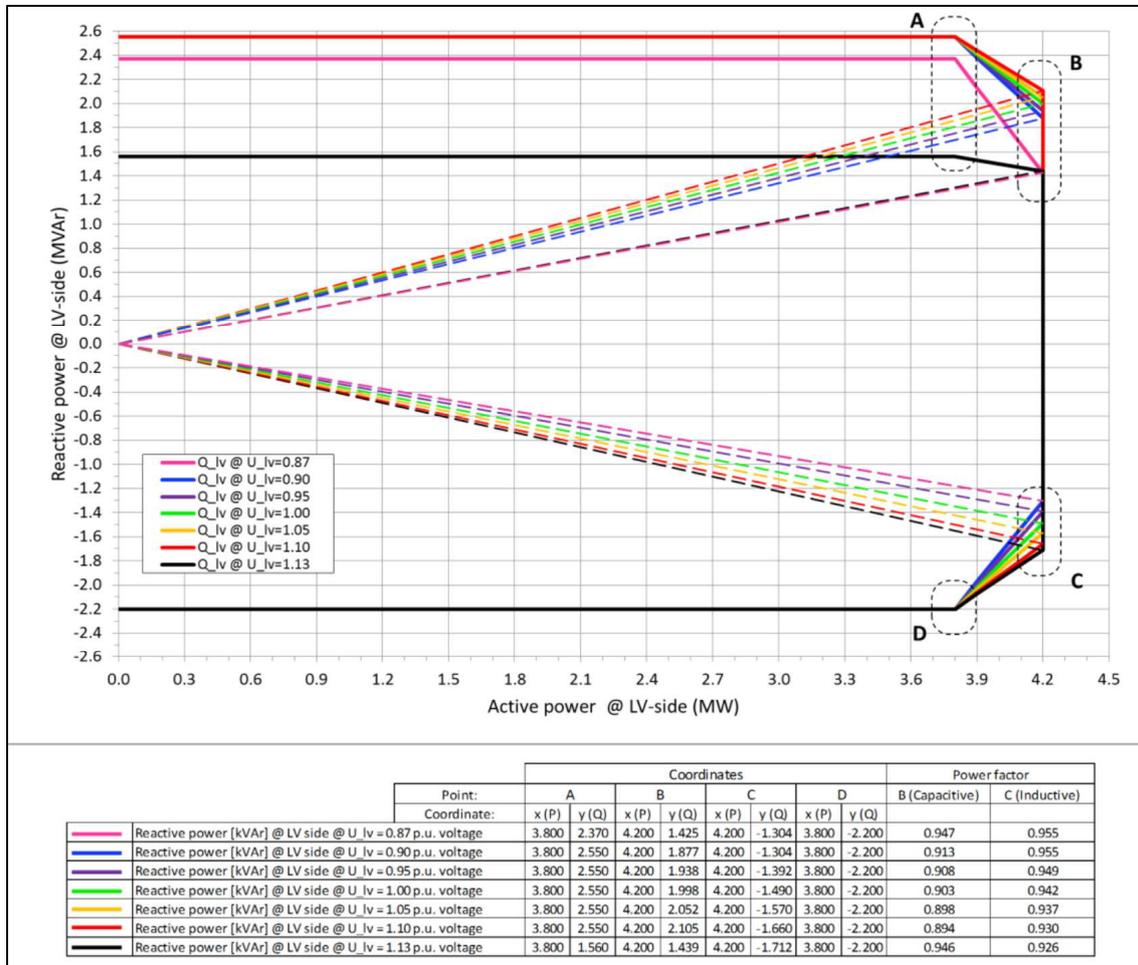


Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Vestas V117-4.2 MW.

1.3. Descripción del control de planta y funcionalidades

El control del PE Cerro Tigre se realiza a través de un único PPC (Power Plant Controller) de Vestas mediante el sistema SCADA, siendo la barra de control del parque la situada eléctricamente en la barra de 220 kV de la SE Cerro Tigre.

En el siguiente gráfico se presenta un esquema del punto de medición (POM) y control del parque.

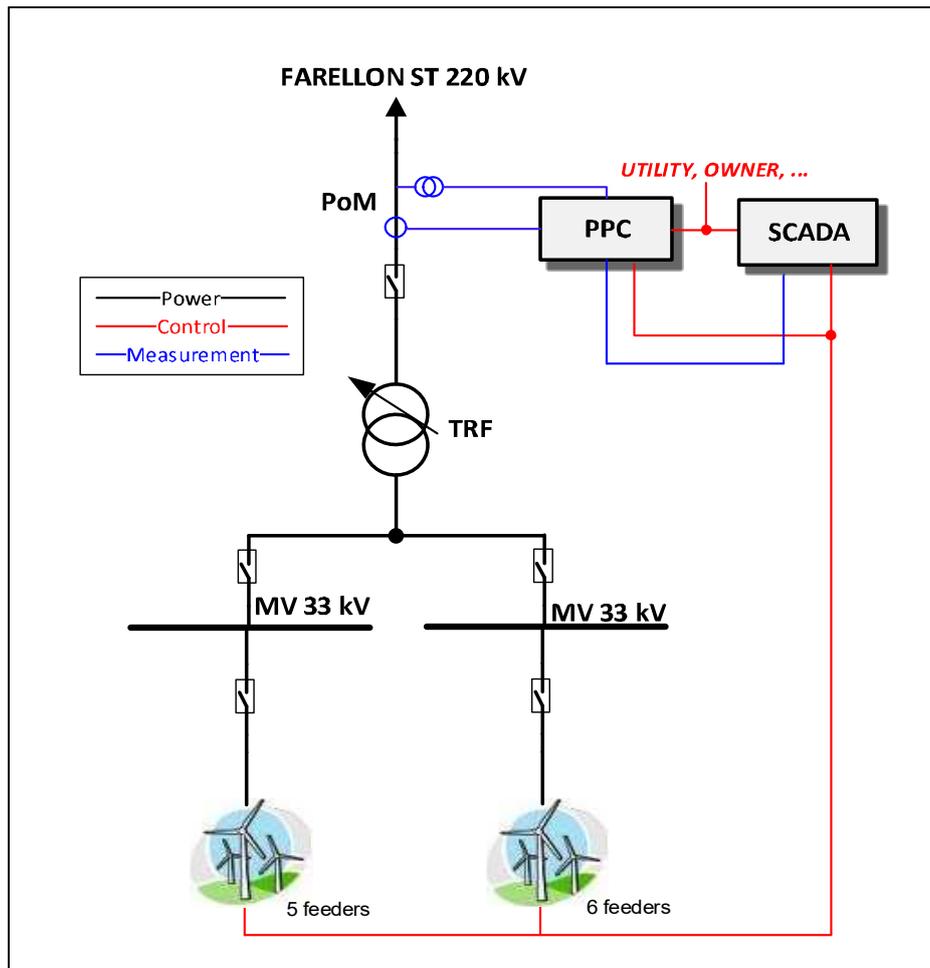


Gráfico 7. Esquema de control y medición del PE Cerro Tigre.

Por otro lado, el control de planta posee las siguientes funcionalidades:

- Funciones de control de potencia activa:
 - Control de potencia activa 0-100%.
 - Control de frecuencia.
- Funciones de control de potencia reactiva:
 - Control de tensión.
 - Control de potencia reactiva.
 - Control de factor de potencia.

El PPC envía las consignas de potencia activa y reactiva a los aerogeneradores. Además, el sistema SCADA permite enviar consignas de potencia activa y potencia reactiva individualmente a cada aerogenerador sin la participación del control del PPC (PPC desactivado).

1.3.1. Funciones de control de potencia activa

El PPC podrá operar en dos modos diferentes de control:

- **Control de potencia activa de 0-100%:** permite ajustar la consigna de potencia activa a un

valor determinado. 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). Si la función está desactivada, la reducción y la toma de carga se harán a una tasa que estará dada por la pendiente natural de los aerogeneradores (PrampLimit).

Con respecto al valor máximo de potencia activa, corresponde al 100% de la potencia nominal de la planta (184,8 MW).

La configuración sugerida por el fabricante y la limitación en el control de potencia activa se muestra a continuación:

Tabla 1. Valores máximos de pendiente y consigna de potencia activa.

P_{ref} maximum	184.8 MW
P_{ramp} limit (internal)	0.02 pu/s

A nivel PPC la tasa sugerida por defecto en este documento se muestra a continuación:

Tabla 2. Valores sugeridos de pendiente para la función limitación de rampa.

Active power output ramp	36960 kW/min (0.2 pu/min)
---------------------------------	---------------------------

Cabe aclarar que el PE Cerro Tigre posee una tasa ajustada en 20 %/min, cumpliendo con lo exigido por la normativa 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. En los siguientes gráficos y tablas se detallan las curvas características y parametrización para ambos modos de control.

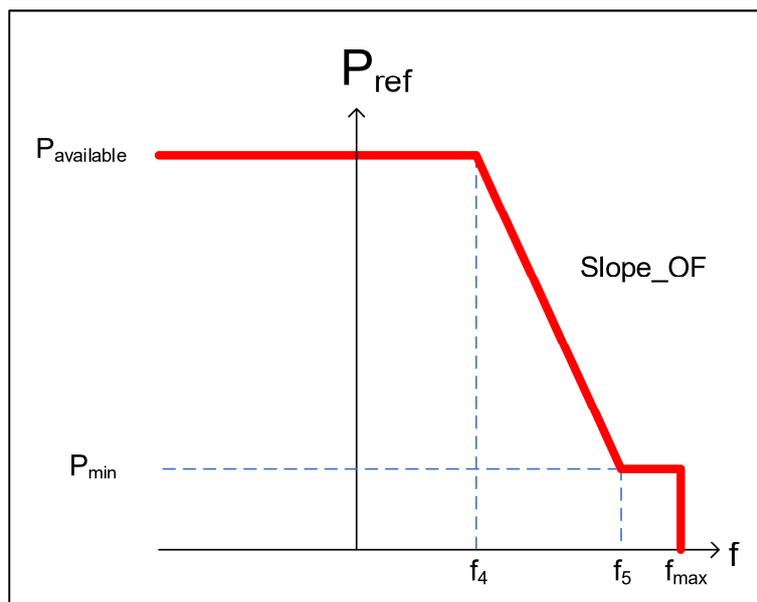


Gráfico 8. Característica LFSM-O.

Tabla 3. Parametrización del modo LFSM-O.

f4	50.2 Hz
fmax	52 Hz
f5	51.5 Hz
Pmin	28.5% of Pavailable
Slope_OF	3.64%
P ramp rate limit (default)	0.02 pu/s

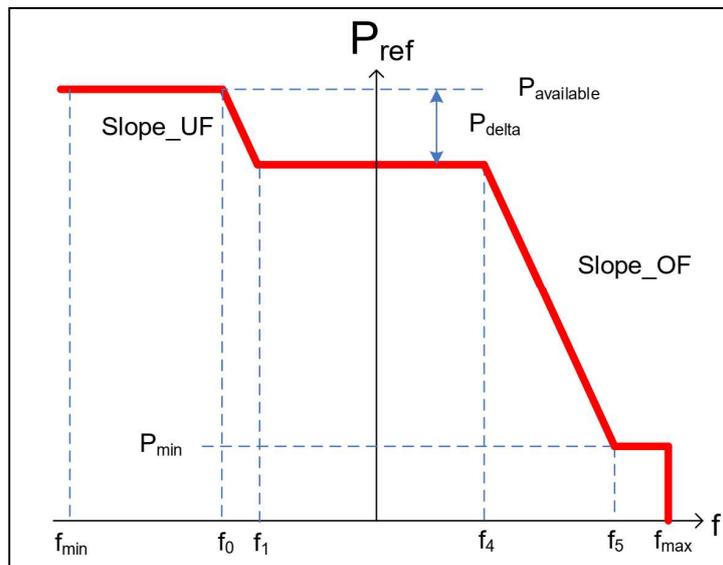


Gráfico 9. Característica FSM-O-U.

Tabla 4. Parametrización del modo FSM-O-U.

fmin	48 Hz
f0	$(f_1 - (P_{delta} [\%] \times Slope_{UF} / 100 / 100 \times 50))$ Hz
f1	49.8 Hz
SLOPE_UF	3.64%
Pdelta	Defined by WPP Operator or TSO (default: 3%)
f4	50.2 Hz
fmax	52 Hz
f5	51.5 Hz
Pmin	$((100 - 100 \times (f_5 - f_4) / 50 \times 100 / Slope_{OF}) \%) - P_{delta} \%$
SLOPE_OF	3.64%
P ramp rate limit (default)	0.02 pu/s

El modo que se encuentra configurado en el parque es el modo LFSM-O.

1.3.2. Funciones de control de potencia reactiva

- **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.

Según la información provista por el fabricante, los límites máximos de potencia reactiva son los siguientes:

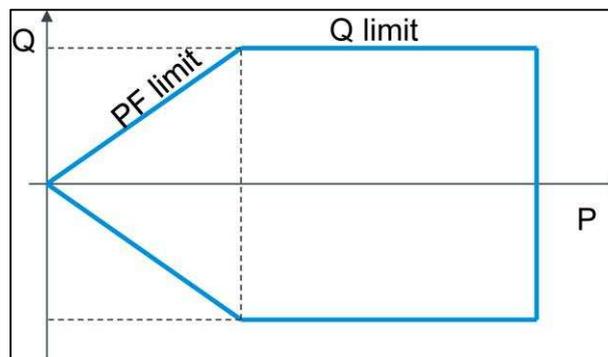


Gráfico 10. Límite PQ del control de potencia reactiva.

Tabla 5. Configuración de los límites PQ del control de potencia reactiva.

PF limit capacitive	0.51
PF limit inductive	0.83
Q limit capacitive	60.8 MVar
Q limit inductive	60.8 MVar
Q _{ref} ramp rate limit	0.1 pu/s

Tabla 6. Tiempos asociados a la dinámica del control de potencia reactiva.

T ₀	Typical performance around 0.2 s
T _{rise}	3 s
T ₂	< 5 s

- **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. Los límites de este modo de control están asociados a los correspondientes al control de potencia reactiva.

1.4. Antecedentes de unidades de similares características

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

- PE Alena.
- PE Malleco Norte
- PE Duqueco

1.5. Descripción de las pruebas

De acuerdo a lo informado por el personal de la planta, el procedimiento de desconexión total consiste en la reducción de potencia (mediante una señal de parada desde el SCADA), en el cual el aerogenerador entra en pausa sin desconexión, hasta la espera de la consigna de arranque.

Las rampas de subida y bajada de potencia activa se encuentran configuradas en 20% por minuto respecto a la potencia nominal del parque, en cumplimiento con el Art. 3-17 de la NTSyCS. La detención y partida del PE se realizaron mediante la consigna de parada de las unidades con la posterior toma de carga hasta potencia máxima disponible sin limitación de rampa, es decir, la toma de carga se dio con la pendiente natural de cada aerogenerador.

2. RESULTADOS OBTENIDOS

2.1. Registros

Se obtuvieron registros de potencia activa, potencia reactiva y tensión en el punto de conexión del parque eólico (sobre la barra de 220 kV de la SE Cerro Tigre). El proceso de detención y partida se efectuó cambiando las consignas de producción por medio del control de planta del parque, con las estampas de tiempo descritas a continuación, las cuales coinciden con el Gráfico 11.

- Señal de detención (parada): 13 s.
- Llegada a mínimo técnico: 22,1 s.
- Señal de partida (arranque): 115 s
- Inicio de toma de carga: 250 s
- Llegada a potencia máxima: 360 s.

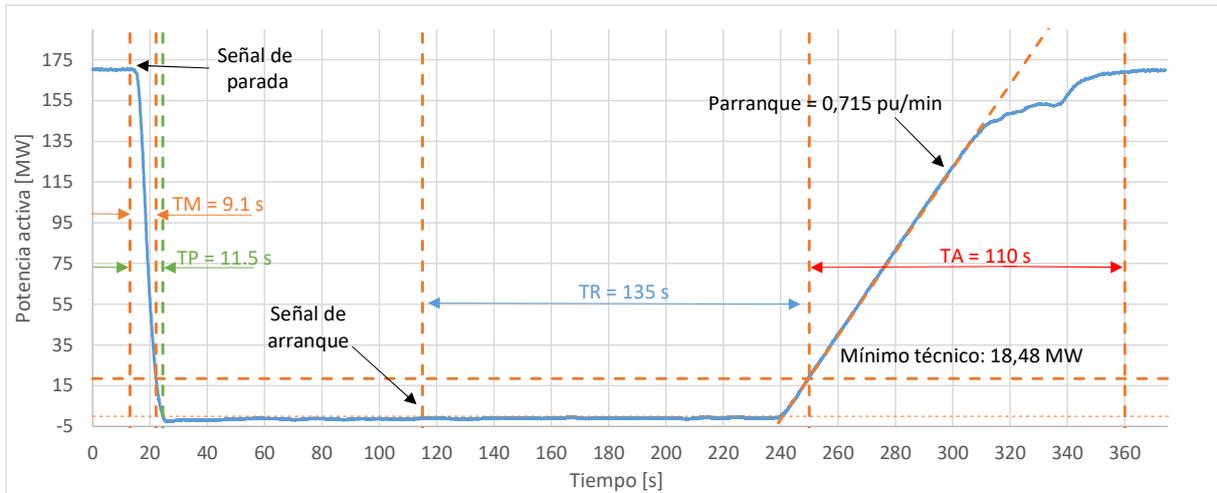


Gráfico 11. Potencia activa durante el proceso de detención y partida del parque eólico.

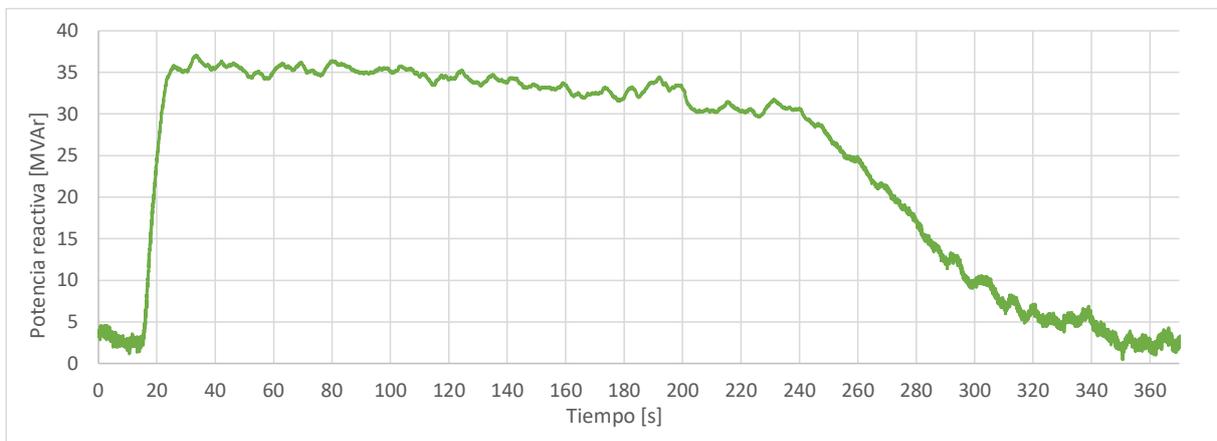


Gráfico 12. Potencia reactiva durante el proceso de detención y partida del parque eólico.

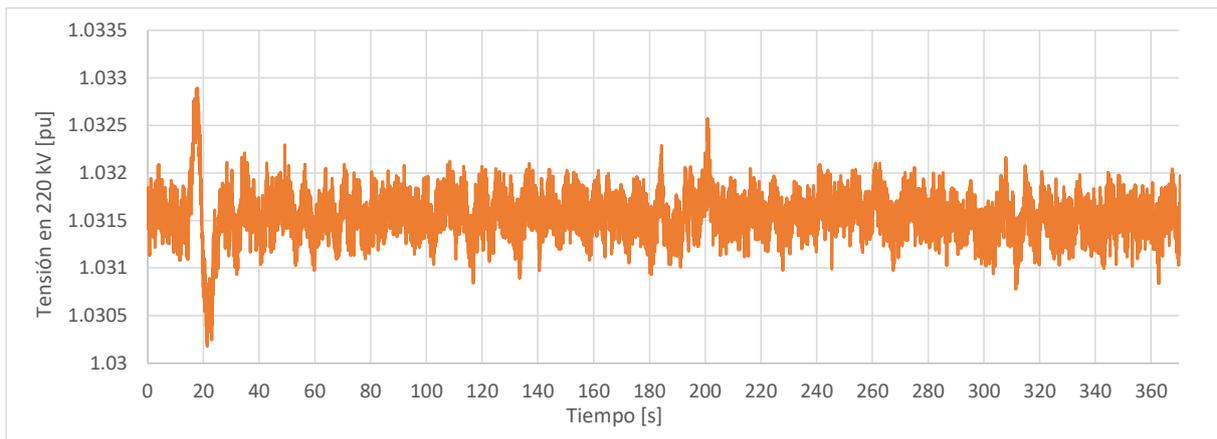


Gráfico 13. Tensión en el punto de conexión durante el proceso de detención y partida del parque eólico.

En el Gráfico 14 se observa el detalle del proceso de detención, desde el momento del envío de la consigna hasta la llegada al mínimo técnico, contabilizándose un tiempo hasta llegar al mínimo técnico de 9,1 segundos y un tiempo hasta la pausa de los aerogeneradores de 11,5 s.

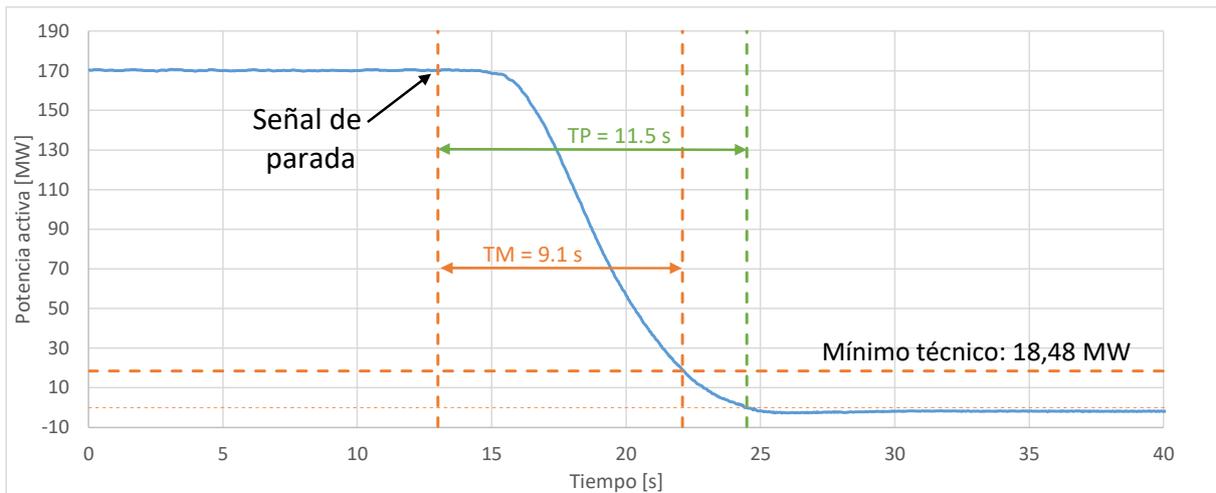


Gráfico 14. Detalle del proceso de detención.

Para la partida, el operador consignó una referencia de potencia activa de 172,2 MW (parque liberado), observándose un **retardo de 110 segundos** aproximadamente hasta que la planta comienza a tomar carga por sobre el mínimo técnico (Gráfico 15).

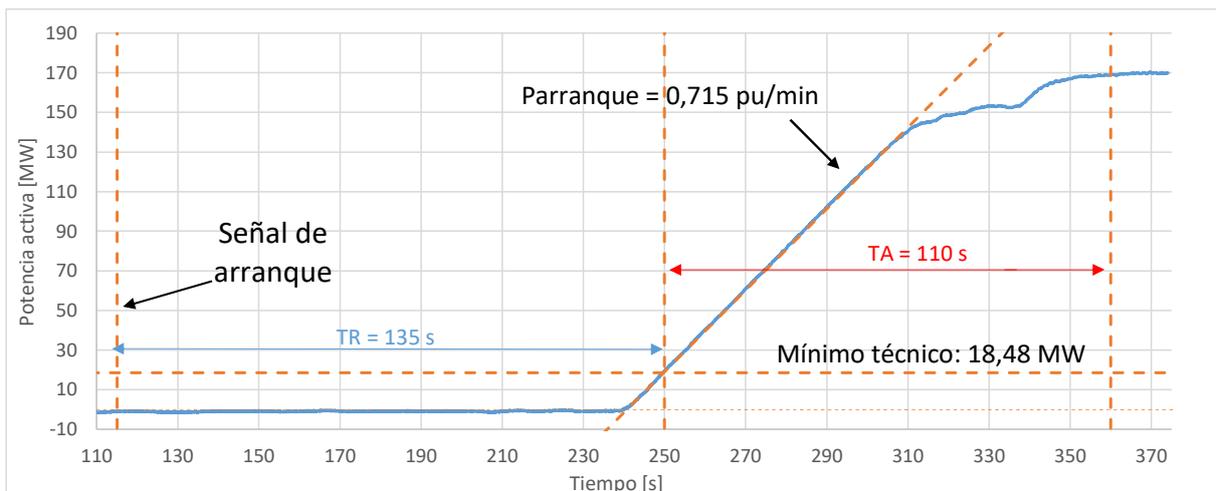


Gráfico 15. Detalle del proceso de partida.

Del gráfico anterior, se observa una rampa de subida de 0,715 pu/min, con un tiempo desde la sincronización hasta alcanzar el mínimo técnico de 135 s y desde el mínimo técnico hasta alcanzar la máxima potencia disponible de 110 s.

En el siguiente gráfico se muestran los resultados a nivel aerogenerador, a través del envío de la orden individual de parada a la unidad WTG71.

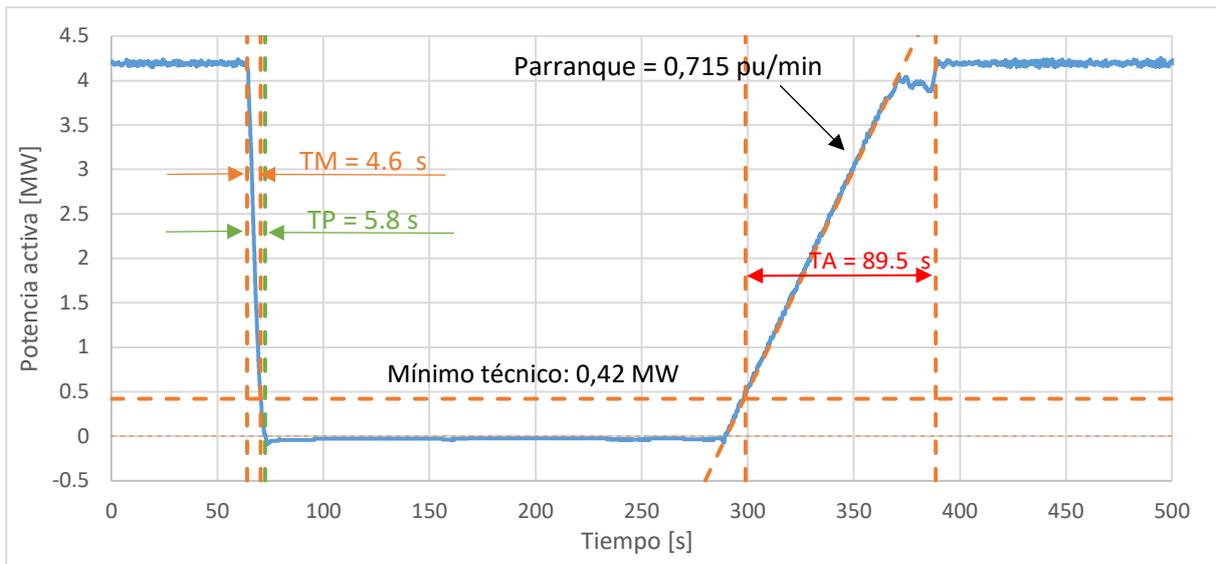


Gráfico 16. Potencia activa durante el proceso de detención del aerogenerador.

En el Gráfico 17 se observa el detalle del proceso de detención, desde el momento del envío de la consigna hasta la llegada al mínimo técnico, contabilizándose un tiempo hasta alcanzar el mínimo técnico (bruto de un aerogenerador) de 4.6 segundos.

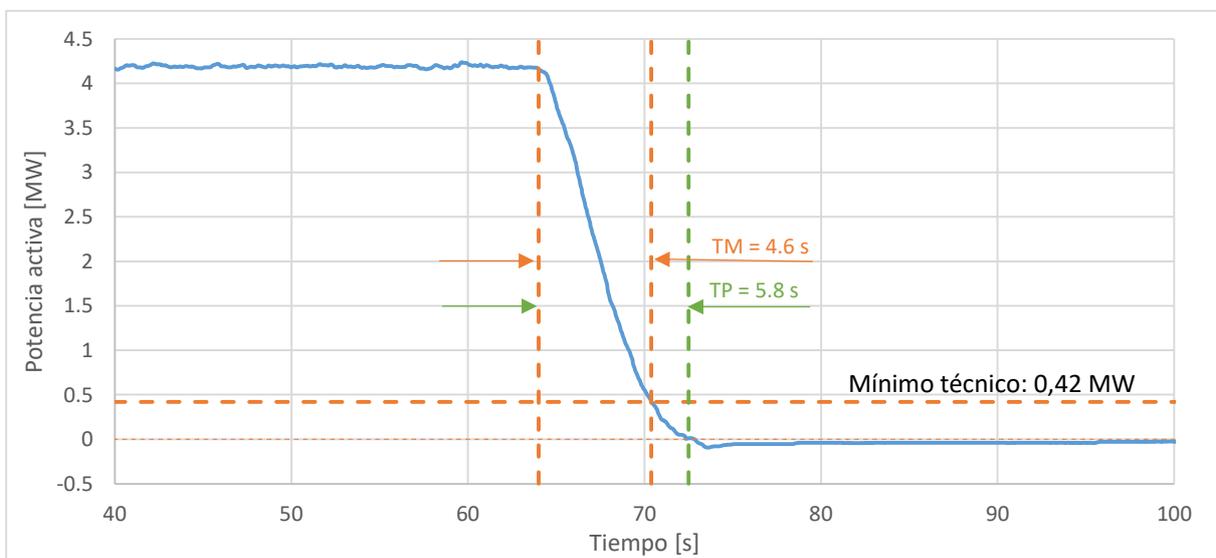


Gráfico 17. Proceso de detención del aerogenerador.

Para la partida, el operador consignó una referencia de potencia activa de 4.2 MW (aerogenerador libre), observándose un **retardo de 89.5 segundos** desde el mínimo técnico hasta alcanzar la potencia máxima (Gráfico 18).

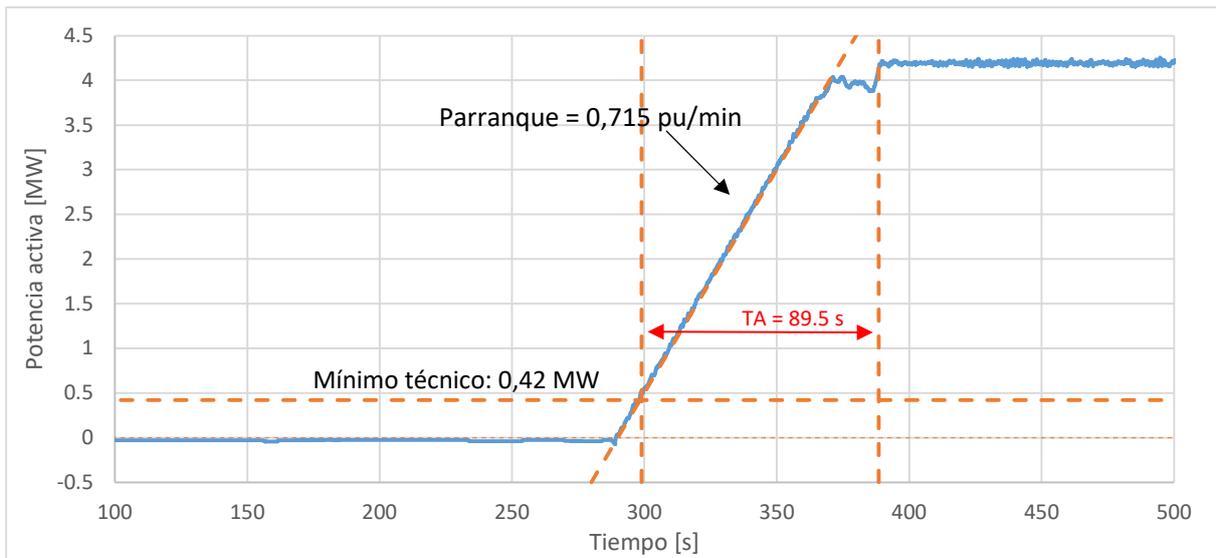


Gráfico 18. Proceso de partida del aerogenerador

Luego, se activó el limitador de rampa de reducción/toma de carga a su valor de operación normal en la planta ($\pm 20\%/min$). En el Gráfico 19 se puede observar una reducción de potencia, donde se cumple el límite de rampa mencionado.

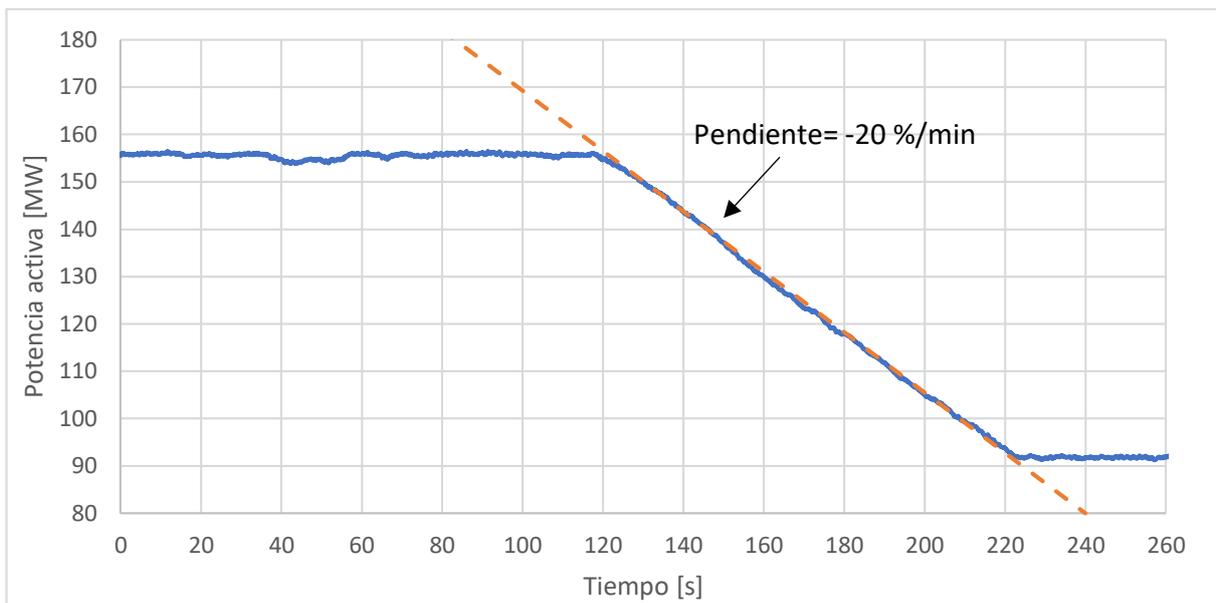


Gráfico 19. Verificación del limitador de rampa.

2.2. Consumos de servicios auxiliares

El consumo de servicios auxiliares (SSAA) de cada aerogenerador está especificado de acuerdo con el documento del fabricante VESTAS [1]. En la siguiente tabla se muestran los consumos de SSAA asociadas a los aerogeneradores del PE.

Tabla 7. Consumo de servicios auxiliares de los aerogeneradores

ELEMENTO	Consumo kW
Consumo motor hidráulico	30
Motor de ajuste	21
Calefacción de agua	10
Bombas de agua	7.7
Calefacción de aceite	7.9
Bombeo de lubricantes	12.5
Sistema de control	3
Perdidas en vacío transformador	8.5
Total	100.6
Total (41 Aerogeneradores)	4124,6

Estos consumos son máximos, sin considerar factores de simultaneidad y consumos asociados a calefacción que en estado de carga no estarían presentes. Se estima un consumo de servicios auxiliares promedio de **1915,5 kW** (con un consumo de SSAA por aerogenerador de **46,72 kW**), para la condición de mínimo técnico. En cuanto al consumo de SSAA de la SE Cerro Tigre, se considera un valor de **100 kW**.

De lo anterior, el consumo total de SSAA queda determinado como:

$$P_{SSAA} = SSAA_{SE} + SSAA_{ae} = 100 \text{ kW} + 1915,5 \text{ kW} = 2015.5 \text{ kW}$$

3. CONCLUSIONES

En base a los registros obtenidos en el Parque Eólico Cerro Tigre se determinaron los parámetros asociados a la partida y detención del parque:

Tabla 8. Parámetros de partida y detención del Parque Eólico Cerro Tigre.

Parámetro	I. Desde el inicio del proceso de partida hasta la sincronización	II. Desde la sincronización hasta alcanzar el valor de mínimo técnico	III. Desde la operación a Mínimo Técnico hasta la operación a potencia máxima disponible.	IV. Desde la operación a potencia máxima disponible hasta la operación a mínimo técnico.	V. Desde la operación a mínimo técnico hasta la desconexión (estado de apagado)	VI. Desde la desconexión de la unidad hasta el término del proceso de detención.
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica ¹	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida ²	0,559 kWh	75,581 kWh	61,584 kWh	6,438 kWh	1,343 kWh	0 kWh
Tiempo requerido	1 s ³	135 s	110 s ⁴	11,5 s	2,4 s	0 s

Los resultados obtenidos para una unidad generadora se muestran a continuación:

¹ La planta no consume ningún tipo de combustible para su funcionamiento.

² Se considera la energía consumida durante el tiempo requerido de cada ítem a una potencia de consumos propios de SSAA igual a 2015.5 kW

³ Tiempo requerido para que el convertidor verifique condiciones idóneas de tensión y frecuencia para sincronizarse a la red.

⁴ Considerando una tasa de toma de carga de 0.715 pu/min desde 18,48 MW (mínimo técnico) hasta 172,2 MW (potencia máxima al momento del ensayo).

Tabla 9. Parámetros de partida y detención para un aerogenerador.

Parámetro	I. Desde el inicio del proceso de partida hasta la sincronización	II. Desde la sincronización, hasta alcanzar el valor de mínimo técnico.	III. Desde la operación a Mínimo Técnico hasta la operación a potencia máxima disponible.	IV. Desde la operación a potencia máxima disponible hasta la operación a mínimo técnico.	V. Desde la operación a mínimo técnico hasta la desconexión (estado de apagado)	VI Desde la desconexión de la unidad hasta el término del proceso de detención.
Cantidad y tipo de combustible utilizado	No aplica ⁵	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Energía eléctrica consumida ⁶	0,013 kWh	1,755 kWh	1,161 kWh	0.059kWh	0.015 kWh	0 kWh
Tiempo requerido	1 s ⁷	135 s	89,5 s	4,6 s	1,2 s	0 s

⁵ La planta no consume ningún tipo de combustible para su funcionamiento.

⁶ Se considera la energía consumida durante el tiempo requerido de cada ítem a una potencia de consumos propios de SSAA igual a 46,72 kW.

⁷ Tiempo requerido para que el convertidor verifique condiciones idóneas de tensión y frecuencia para sincronizarse a la red.