



INFORME DE DETERMINACIÓN DE POTENCIA MÍNIMA

Informe Técnico

Preparado para:



Diciembre - 2022

M 2177 | P 096-22

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS.....	2
ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS.....	3
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	4
REGISTRO DE COMUNICACIONES	5
SECCIÓN PRINCIPAL	6
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Definiciones y nomenclatura	6
1.2. Marco Normativo.....	7
1.3. Descripción del parque eólico.....	7
2. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS	14
3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	15
4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	15
4.1. Registros.....	15
4.2. Pérdidas y consumos propios	18
4.2.1 Potencia de los servicios auxiliares.....	18
4.2.2 Potencia de pérdidas del parque.....	19
4.3. Mínimo Técnico considerando un solo aerogenerador en servicio	21
5. CONCLUSIONES	22

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

Tabla 1. Pérdidas y consumos propios del PE Puelche Sur.	21
Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.	6
Gráfico 2. Ubicación geográfica del PE Puelche Sur.	8
Gráfico 3. Esquema unilineal de conexión del PE Puelche Sur.	9
Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV.	12
Gráfico 5. Curva de capacidad WTG Nordex N149 5,0 MW.	13
Gráfico 6. Pronóstico de viento durante 14 días.	13
Gráfico 7. Potencia activa en el punto de conexión.	15
Gráfico 8. Potencia reactiva en el punto de conexión.	16
Gráfico 9. Tensión en el punto de conexión.	16
Gráfico 10. Potencia Activa en bornes de un aerogenerador.	17
Gráfico 11. Velocidad de Viento registrada en un aerogenerador.	17
Gráfico 12. Potencia bruta y potencia neta durante la prueba de mínimo técnico.	18
Gráfico 13. Determinación del consumo de SSAA.	19
Gráfico 14. Cálculo de pérdidas en el transformador de potencia de la SE Puelche Sur.	20
Gráfico 15. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Puelche Sur.	21
Gráfico 16. Aerogenerador WTG1 despachado en mínimo técnico.	22

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
SET	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.

N°	Fecha dd/mm/año	Preparó	Revisó	Aprobó	Observaciones
1	07/12/2022	BL	FM	FM	Emisión Original
2	15/12/2022	BL	FM	FM	Complemento de Información

SECCIÓN PRINCIPAL

1. INTRODUCCIÓN

En el presente informe se exhiben los resultados obtenidos en los ensayos de campo realizados en el Parque Eólico Puelche Sur, durante los días 10, 14 y 15 de noviembre de 2022, en relación al proceso de determinación de la potencia mínima técnica de la planta.

1.1. Definiciones y nomenclatura

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

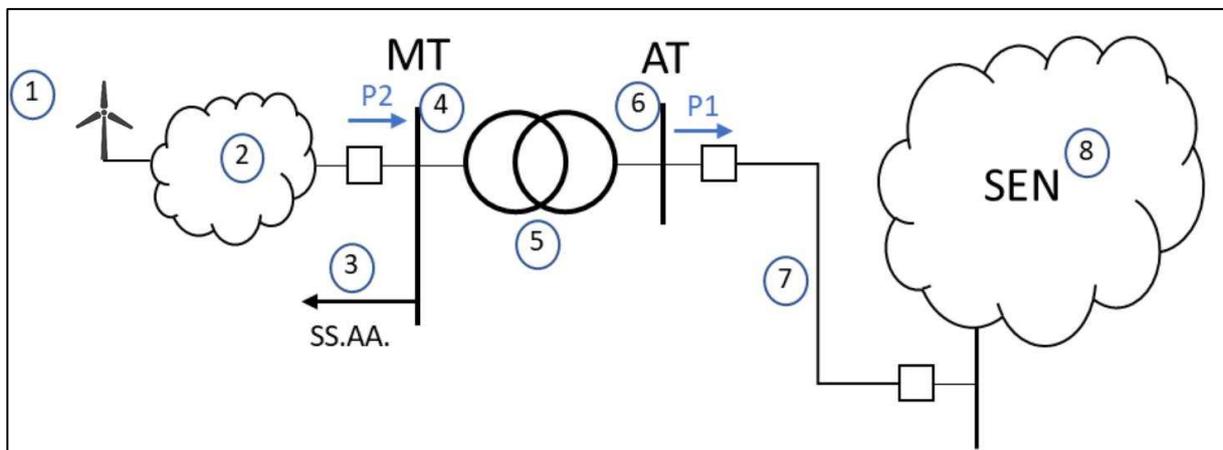


Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.

1) Generador equivalente: Representa la suma de los aportes de potencia activa de los aerogeneradores individuales.

2) Pérdidas en sistema colector del parque (Pcolector): 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.
- P_{bruta}: 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).
- P_{perd}: Potencia de pérdidas en la línea de transmisión (ver punto 7 del Gráfico 1).
- P_{trafo}: Pérdidas activas en el transformador de potencia del parque.
- P_{ssa}: Potencia de servicios auxiliares del parque.
- P_{colector}: Pérdidas en el sistema colector del parque (ver punto 2 del Gráfico 1).

1.2. Marco Normativo

Las pruebas realizadas se programaron en base al ANEXO TÉCNICO de la NTSyCS "Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras". En tal sentido, el valor de Mínimo Técnico 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.

Para el caso del Parque Eólico Puelche Sur la determinación se hará al valor mínimo que permita limitarse la consigna de generación del parque y que no desconecte los inversores, de manera de mantener el soporte de tensión y potencia reactiva al sistema, verificado mediante un ensayo sobre el parque.

1.3. Descripción del parque eólico

El PE Puelche Sur inyecta al sistema una potencia de 156 MW, los cuales son evacuados a través de la SE Frutillar Norte 220 kV. Una línea de 12 km de longitud de 220 kV vincula la SE mencionada con la SE Puelche Sur de 33/220 kV. El parque está conformado por 32 aerogeneradores Nordex N149 de tecnología DFIG. En el Gráfico 5 se muestra la curva de capacidad PQ de los aerogeneradores. Si bien la plataforma se indica como 4,8 MW, los aerogeneradores cuentan con un boost de potencia activa que les permite alcanzar los 5,0 MW.

La distribución en media tensión se realiza mediante un sistema colector en 33 kV formado por 9 circuitos que recolectan la potencia de los aerogeneradores. Cada aerogenerador cuenta con su transformador de bloque de 0,69/33 kV de una potencia de 5,35 MVA.

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

En el Gráfico 2 se muestra la ubicación geográfica del parque, en el Gráfico 3 el esquema unilineal de conexión y en el Gráfico 4 se muestra un esquema unilineal del sistema colector en 33 kV.

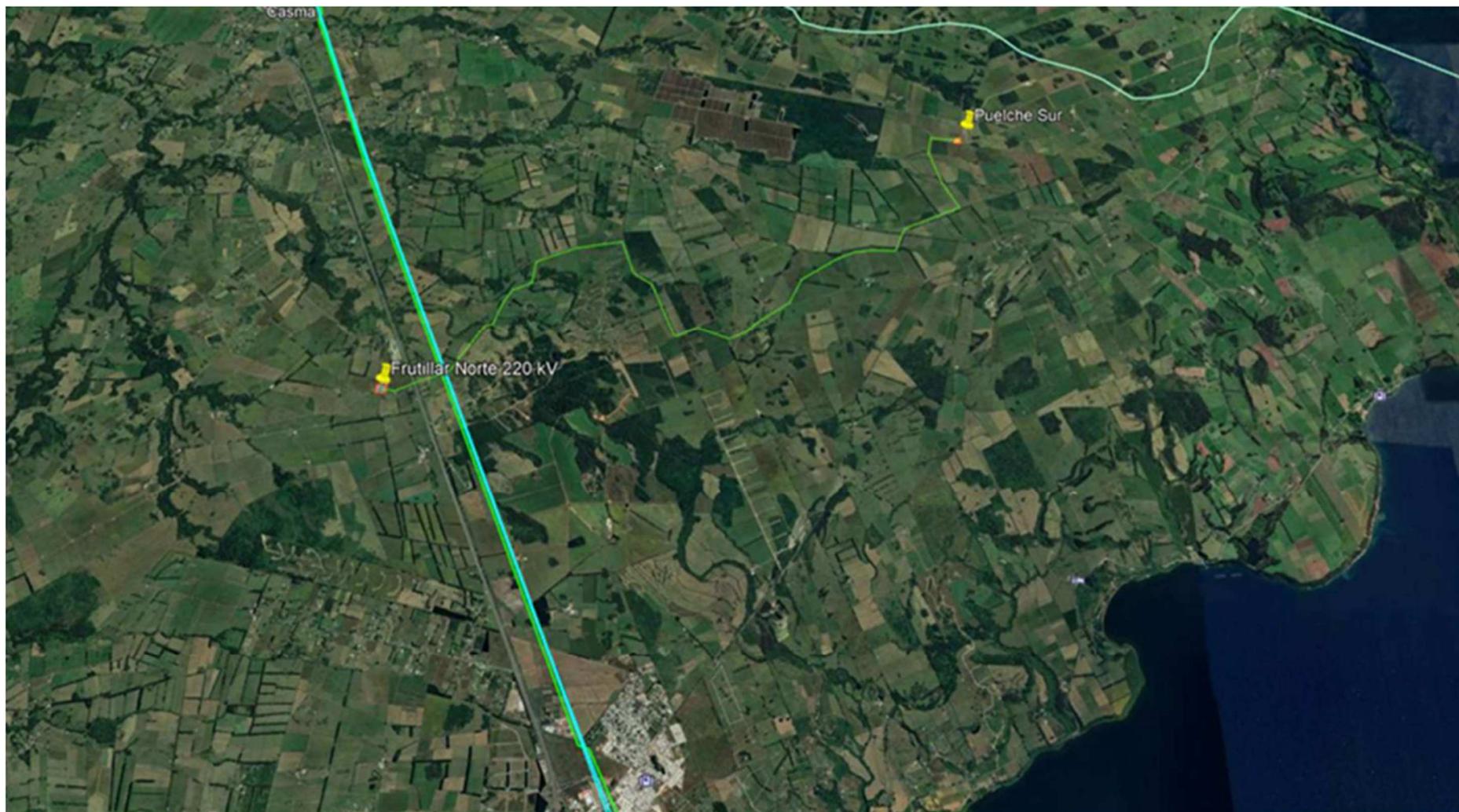
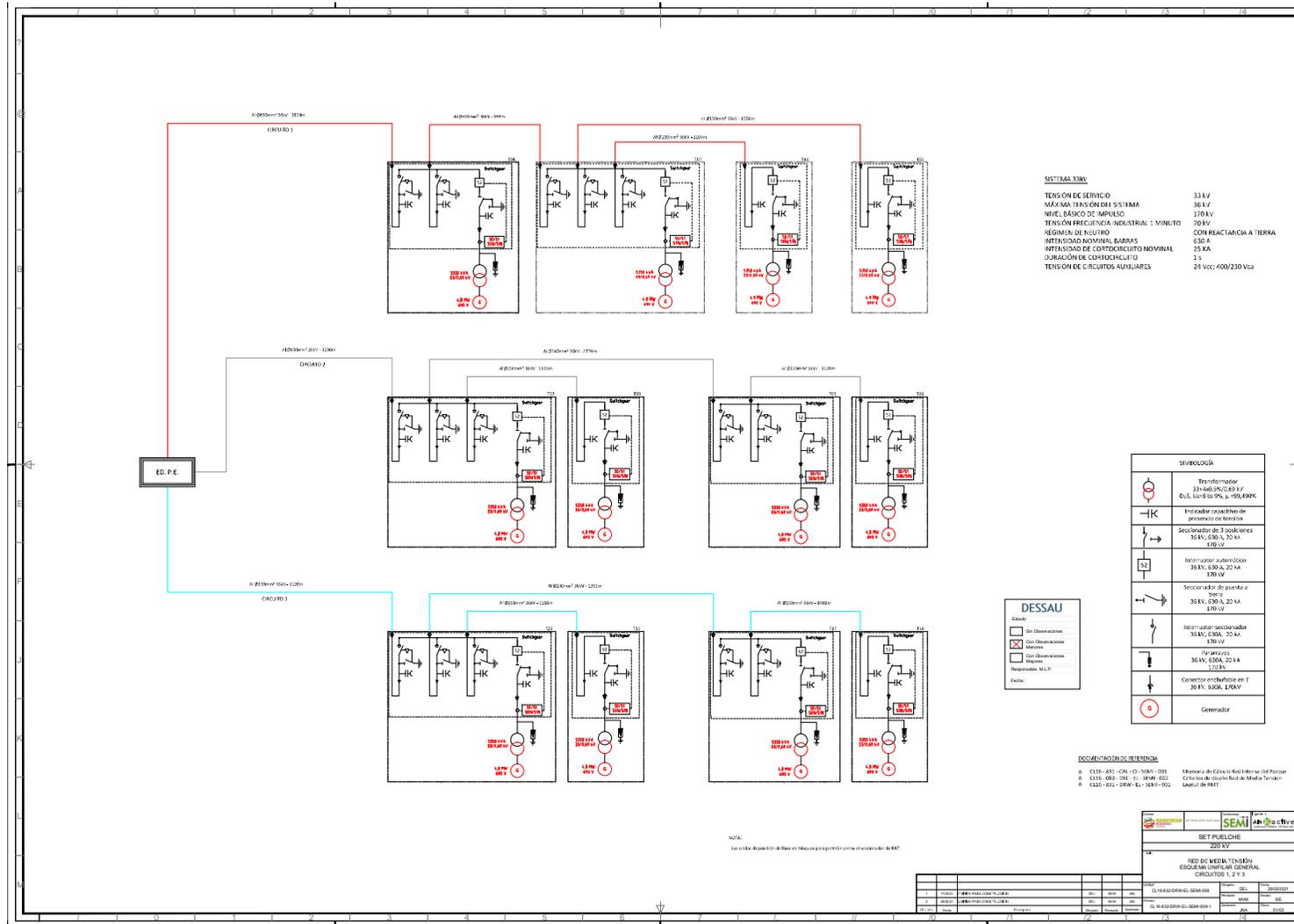
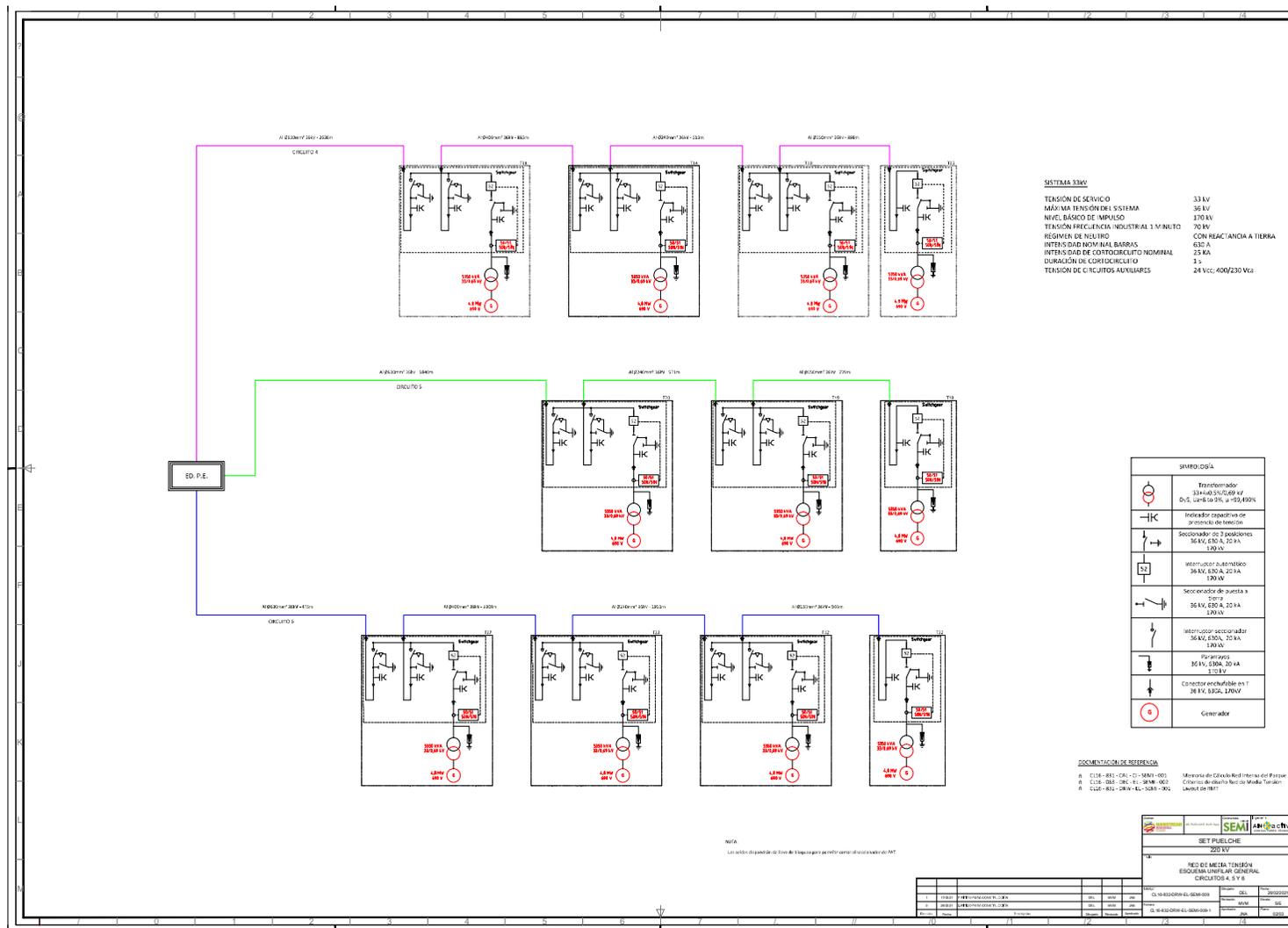


Gráfico 2. Ubicación geográfica del PE Puelche Sur.





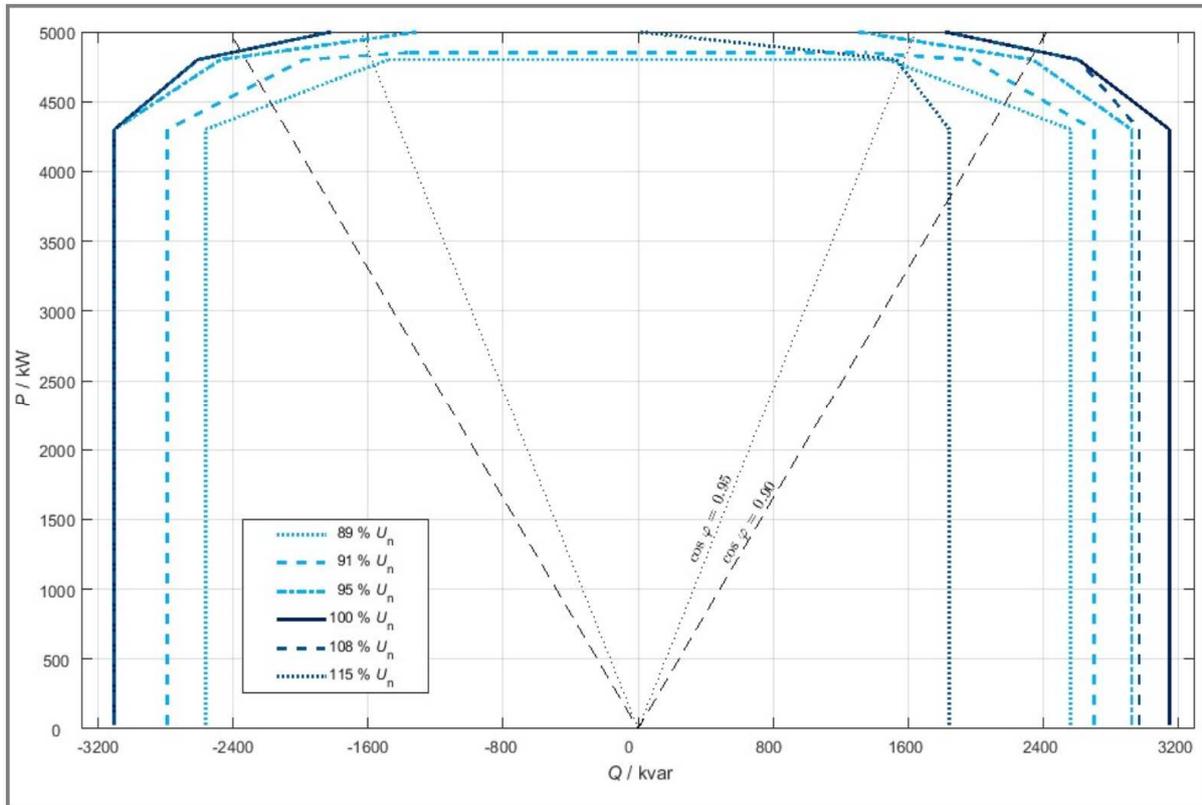


Gráfico 5. Curva de capacidad WTG Nordex N149 5,0 MW.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas se desarrollaron durante los días 10, 14 y 15 de noviembre del año 2022. Los ensayos que corresponden a máxima potencia se realizaron durante el último día, ya que allí se tenía la mayor probabilidad de alto recurso primario. En el siguiente gráfico se muestra la probabilidad de viento extendida, remarcando la ventana de tiempo elegida.

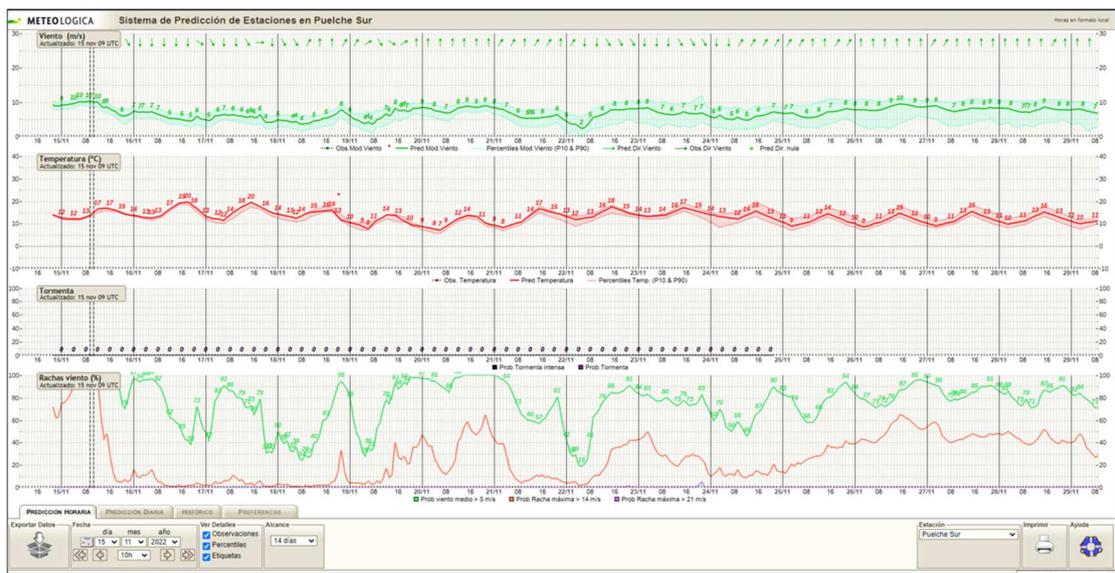


Gráfico 6. Pronóstico de viento durante 14 días.

El control del PE Puelche Sur se realiza mediante a través de un único PPC (Power Plant Controller) de Nordex, mediante el sistema SCADA, siendo la barra de control del parque la situada eléctricamente en la barra de 220 kV de la SE Puelche Sur. 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 Puelche Sur esta tasa estaba configurada en 20 % /min, la cual cumplen 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 Puelche Sur este posee una banda muerta configurada en ± 200 mHz, con un droop de 3.64 %.
- **Control de Tensión:** Permite definir un valor de consigna de tensión en el punto de conexión del PE. En el caso particular del PE Puelche Sur el control de tensión es del tipo proporcional integral (PI). Esto implica que, ante una consigna de tensión, el PPC ajustará la Inyección / absorción de potencia reactiva del PE en el punto de conexión mediante un algoritmo PI que tiene por objetivo reducir el error entre la tensión medida y la consigna o referencia a un valor de 0. Cabe señalar que este modo de control no asegura que se pueda lograr el valor consignado. El PPC saturará su acción de control de potencia reactiva en los límites definidos por el bloque de control de potencia reactiva.
- **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.

Con respecto al valor de potencia máxima de referencia, para el PE Puelche Sur, esta es del 100% de la potencia nominal de la planta (156 MW).

2. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS

El parque eólico presentó parámetros de desempeño equivalentes a parques eólicos de similares características, como los mencionados a continuación¹:

- Parque Eólico Tolpán Sur (mínimo técnico = 0,87 MW).

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

- Parque Eólico Alena (mínimo técnico = 0,029 MW).

3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

De acuerdo con el Artículo 4 “Definiciones” del Anexo Técnico, se determinó “la potencia activa bruta mínima, con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al SI en forma continua”.

El mínimo valor de referencia configurable en el punto de conexión desde el control de planta (PPC) según se informó, es de 15,6 MW (10% de Pn). El PPC reparte la consigna entre los aerogeneradores de la planta, decidiendo además si dejar en pausa o no a algún aerogenerador para cumplir con la consigna enviada. Cuando un aerogenerador recibe una consigna por debajo del 10% de su potencia nominal, automáticamente entra en modo pausa.

Para realizar la prueba, se procedió a reducir la consigna de generación por medio del comando del operador al mínimo valor configurable (15,6 MW). Posteriormente, se evaluó la estabilidad de operación de la planta realizando cambios en la consigna de potencia reactiva, verificándose un correcto desempeño y control, sin desconexión de los aerogeneradores

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Registros

Se obtuvieron los registros de potencia activa (Gráfico 7), potencia reactiva (Gráfico 8) y tensión en el punto de conexión (Gráfico 9), para un valor mínimo de potencia activa configurable en 15,6 MW desde el control de planta. En este estado de carga se realizó un escalón en la potencia reactiva de +16 MVar (capacitivo) y - 16 MVar (inductivo).

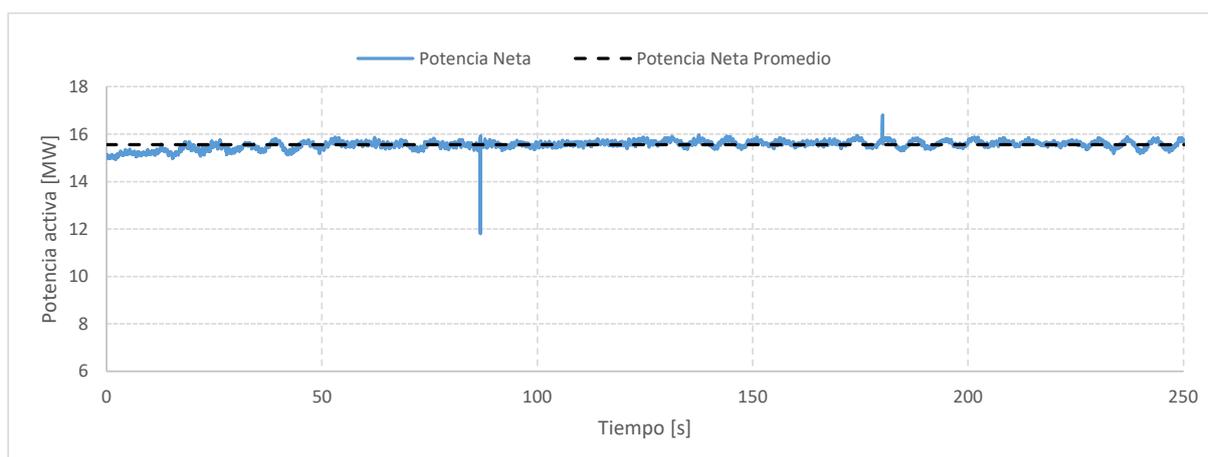


Gráfico 7. Potencia activa en el punto de conexión.

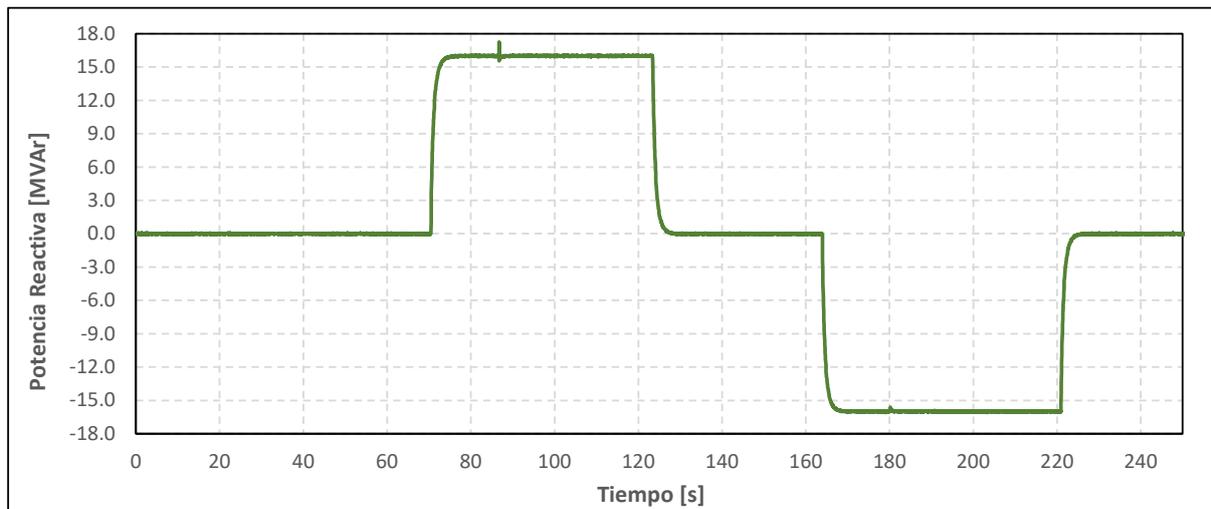


Gráfico 8. Potencia reactiva en el punto de conexión.

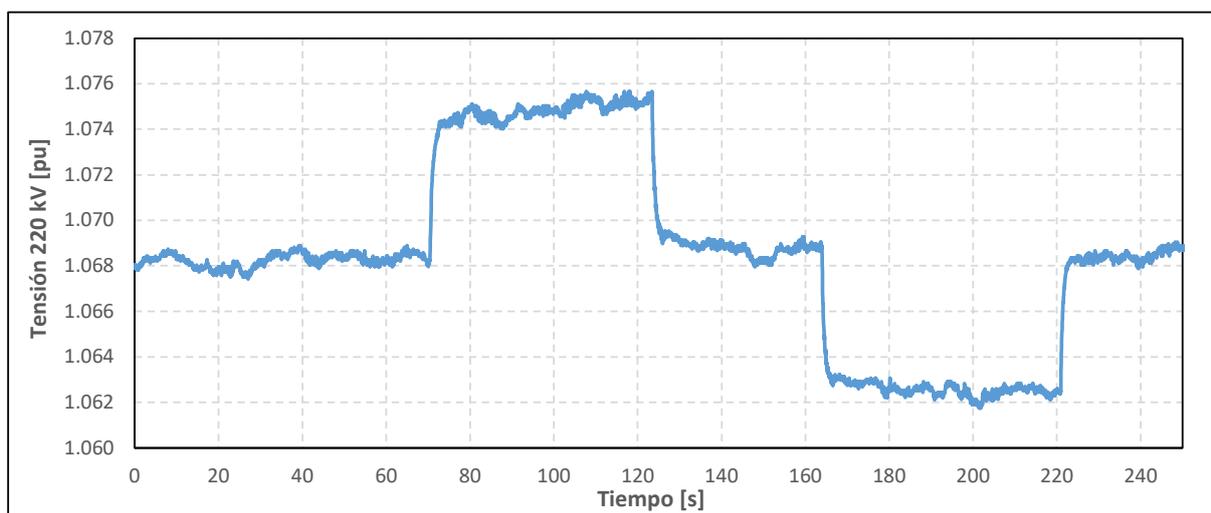


Gráfico 9. Tensión en el punto de conexión.

El parque operó satisfactoriamente sin presentar inestabilidades y manteniendo el soporte de potencia reactiva y tensión a la red sin desconexión de aerogeneradores. De lo anterior se determinó que la potencia neta en el punto de conexión es de $P_{neta} = 15,6$ MW.

En los siguientes gráficos se muestra la potencia activa en bornes de un aerogenerador en la condición de mínimo técnico.

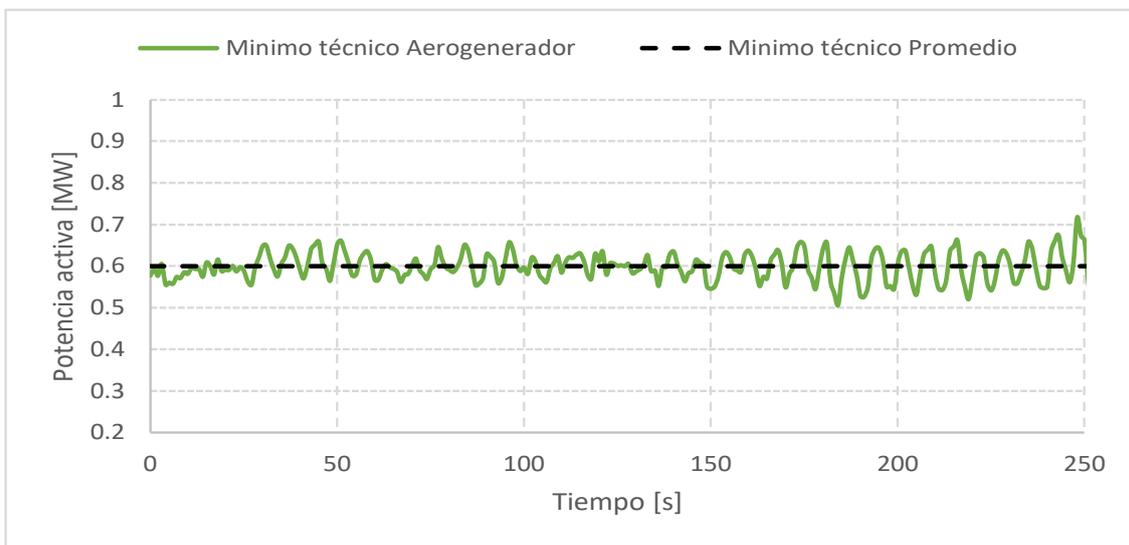


Gráfico 10. Potencia Activa en bornes de un aerogenerador.

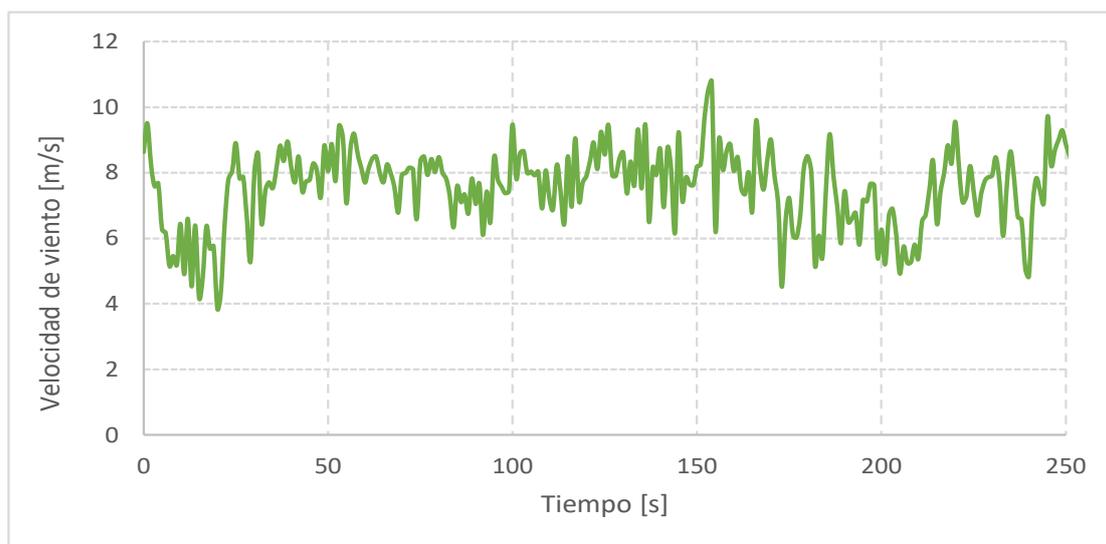


Gráfico 11. Velocidad de Viento registrada en un aerogenerador.

En el Gráfico 12 se observa la comparación entre la potencia bruta generada, que se obtuvo como la sumatoria de los registros de potencia activa en bornes de cada aerogenerador que compone el parque, y la potencia neta inyectada en el punto de conexión.

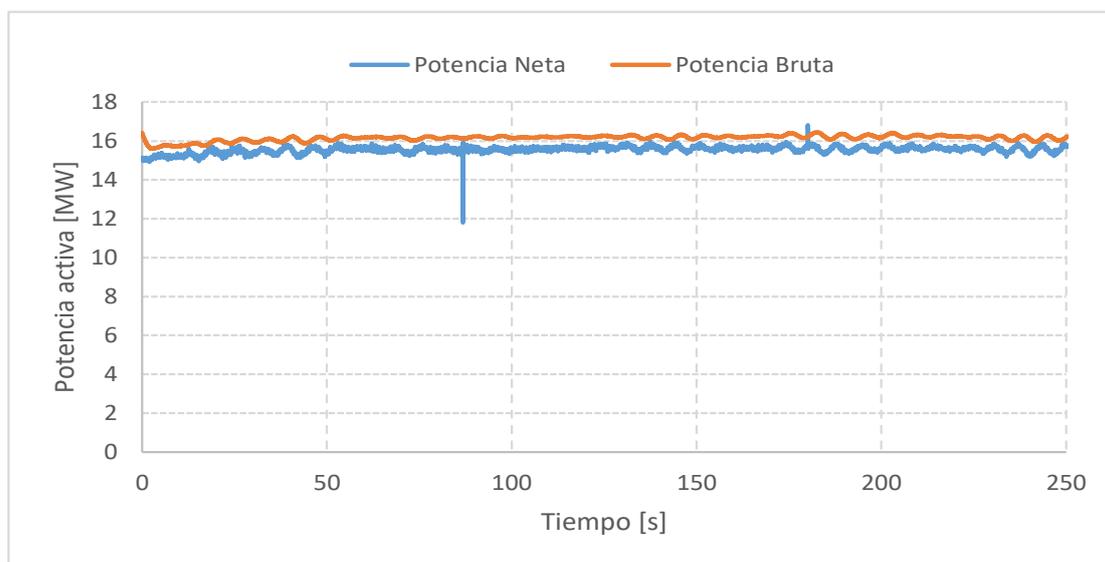


Gráfico 12. Potencia bruta y potencia neta durante la prueba de mínimo técnico.

La potencia bruta se obtiene como un promedio de la medición de "Potencia Bruta" del Gráfico 12, resultando el siguiente valor:

$$P_{bruta} = 16,144 \text{ MW}$$

En esta condición operativa las pérdidas activas totales junto con el consumo de servicios auxiliares resultan de la diferencia entre la potencia bruta y la potencia neta en el punto de conexión:

$$P_{dtot} = 16,144 \text{ MW} - 15,6 \text{ MW} = 544 \text{ kW}$$

Esta potencia calculada incluye a las pérdidas en el transformadore de potencia de la SE Puelche Sur, el circuito colector y los consumos propios de los servicios auxiliares (SSAA).

4.2. Pérdidas y consumos propios

Las componentes que generan pérdidas respecto a la potencia bruta generada en el parque se pueden enumerar a continuación:

- Pérdidas activas en el transformador de potencia de la central.
- Pérdidas en la red de media tensión del PE (incluye sistema colector y transformadores del aerogenerador).
- Consumo de servicios auxiliares de la planta.

Para poder desagregar las pérdidas anteriores se realiza una simulación estática (flujo de potencia) en el software PowerFactory, tomando el modelo empleado en el estudio de validación.

4.2.1 Potencia de los servicios auxiliares

El consumo de los servicios auxiliares para la condición de mínimo técnico se determinó mediante un cálculo de flujo de potencia en el software PowerFactory, empleando el modelo desarrollado del parque. Se despachó el mismo, obteniendo una potencia de 15.6 MW en el punto de conexión, donde se obtuvo un consumo de SSAA de 55 kW, tal como se muestra en el siguiente gráfico.

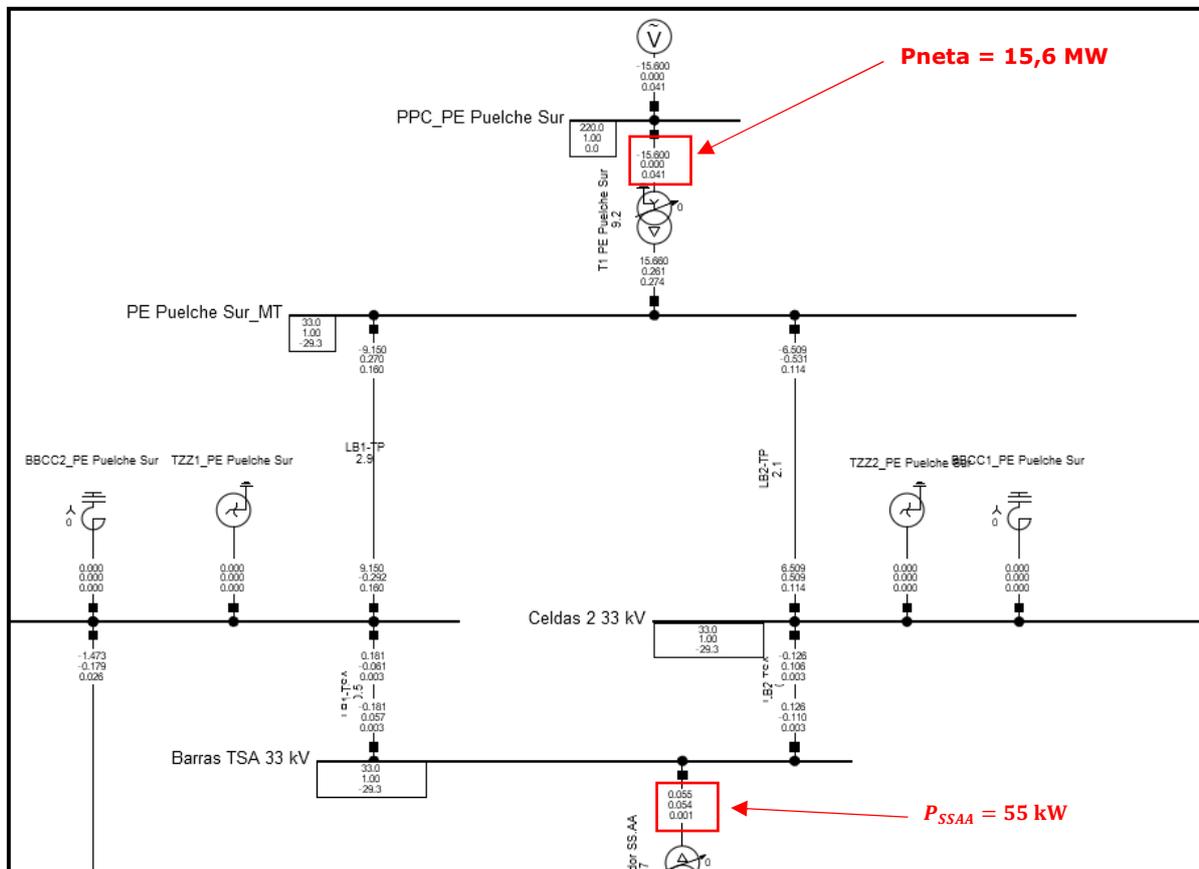


Gráfico 13. Determinación del consumo de SSAA.

Por lo tanto, el consumo de servicios auxiliares se determinó en 55 kW.

$$P_{SSAA} = 55 \text{ kW}$$

4.2.2 Potencia de pérdidas del parque

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

Además, debe descontarse el consumo de los SSAA. La expresión para el cálculo de la potencia de pérdidas de la central se muestra a continuación:

$$P_{\text{perd parque}} = P_{\text{bruta}} - P_{\text{neta}} - P_{SSAA}$$

$$P_{\text{perd parque}} = 16,144 \text{ MW} - 15,6 \text{ MW} - 0,055 \text{ MW}$$

$$P_{\text{perd parque}} = 0,489 \text{ MW}$$

Este valor debe ser desagregado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en el transformador principal (Ptrafa).
- Pérdidas en la red colectora de MT (Pcolector).

Para poder desagregar las pérdidas anteriores, se realizó un cálculo de flujo de potencia

en el software PowerFactory, tomando el modelo detallado empleado en el estudio de validación.

Considerando la simulación de flujo de potencia mencionada anteriormente se pueden determinar las pérdidas activas de potencia asociadas al transformador elevador de la SE Puelche Sur. Para el estado de potencia mínima se tiene:

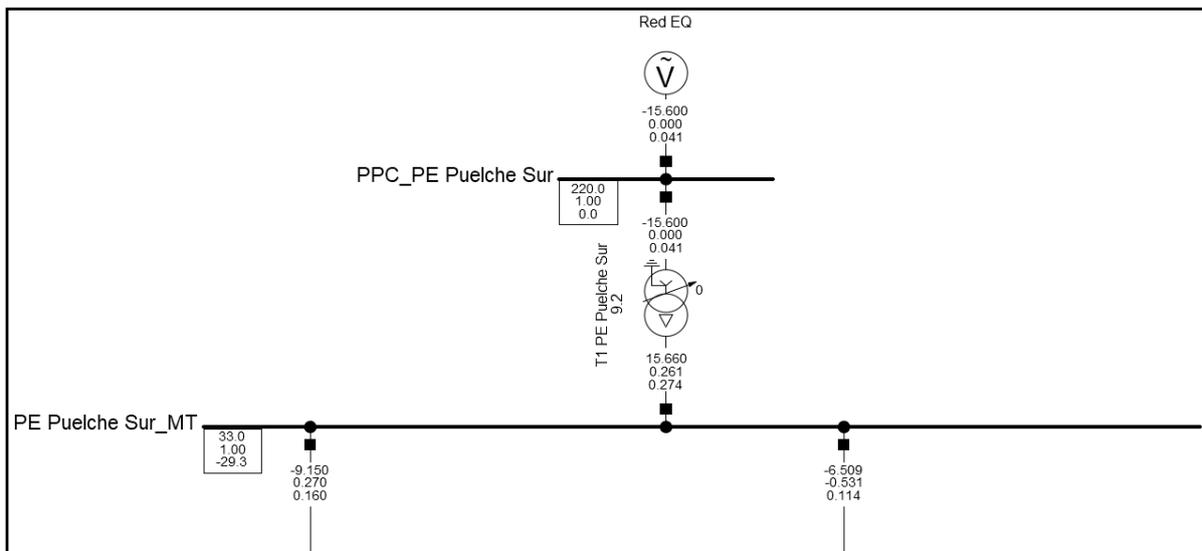


Gráfico 14. Cálculo de pérdidas en el transformador de potencia de la SE Puelche Sur.

De lo anterior las pérdidas activas en el transformador de potencia de la SE Puelche Sur, se calculan como:

$$P_{trafo} = 15,66 \text{ MW} - 15,6 \text{ MW} = 60 \text{ kW}$$

Los datos del transformador de potencia se muestran a continuación:

Name	ABB 220/33 kV 170 MVA PE_PS	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	170.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		
HV-Side	220.	kV
LV-Side	33.	kV
Vector Group		
HV-Side	YN	
LV-Side	D	
Phase Shift	1.	*30deg
Name	YNd1	
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	12.765	%
Copper Losses	462.99	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	12.297	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.272	%

Magnetising Impedance		
No Load Current	0.056	%
No Load Losses	55.773	kW

Gráfico 15. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Puelche Sur.

Por lo tanto, las pérdidas en la red colectora quedan determinadas por la siguiente expresión:

$$P_{colector} = P_{perd\ parque} - P_{trafo}$$

$$P_{colector} = 489\text{ kW} - 60\text{ kW}$$

$$P_{colector} = 429\text{ kW}$$

En la siguiente tabla se resumen las pérdidas y consumo propios del PE Puelche Sur:

Tabla 1. Pérdidas y consumos propios del PE Puelche Sur.

Parámetro	Valor
Pérdidas en el transformador de potencia de la SE Puelche Sur	60 kW
Pérdidas en el circuito colector (Sist colector + Tr de los aerogeneradores)	429 kW
Consumos de SSAA	55 kW
Pérdidas y consumos propios totales (P_{dtot})	544 kW

4.3. Mínimo Técnico considerando un solo aerogenerador en servicio

Cabe aclarar que, la potencia mínima determinada anteriormente, corresponde con todos los aerogeneradores en servicio, sin embargo, es posible pausar varios aerogeneradores hasta contener uno solo en servicio y despachado en su mínimo técnico (0.5 MW). Para comprobar el mínimo técnico del parque en este estado de operación, se utilizó el modelo homologado del parque detallado. Despachando el aerogenerador WTG1 en 0.5 MW y estando los demás en pausa, se obtiene una potencia neta en el punto de conexión (SE Puelche 220 kV) de 0.167 MW.

Esto último, se muestra en los siguientes gráficos.

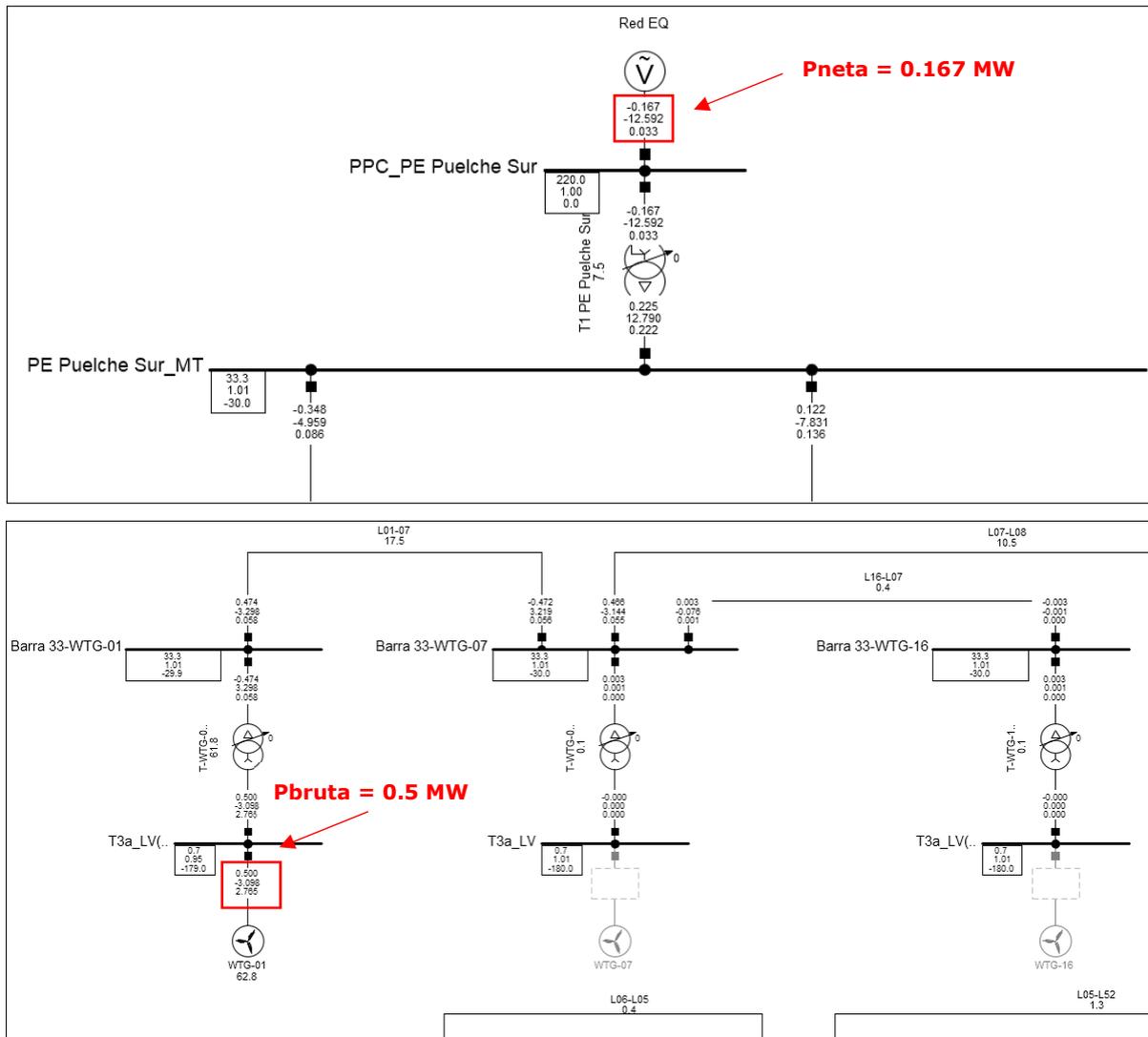


Gráfico 16. Aerogenerador WTG1 despachado en mínimo técnico.

La diferencia entre la potencia de despacho del aerogenerador WTG1 y la potencia en el punto de conexión está dada tanto por el consumo de SSAA como por las pérdidas en el sistema colector y el transformador de potencia del parque. Por lo tanto, se puede considerar una potencia mínima bruta, considerando un solo aerogenerador en servicio, de 0,5 MW.

5. CONCLUSIONES

Dada la mínima consigna operable del parque eólico de 15,6 MW (potencia mínima neta) en el punto de conexión (Barra de 220 kV de la SE Puelche Sur), y considerando una pérdida promedio de 544 kW en ese estado de carga, se determinó una potencia mínima bruta de 16,144 MW para Parque Eólico Puelche Sur, considerando todos los aerogeneradores en servicio y una potencia mínima bruta de 0,5 MW considerando un único aerogenerador en servicio.