



INFORME DE DETERMINACIÓN DE POTENCIA MÁXIMA

Informe Técnico

Preparado para:



Junio - 2022

A 0609 | R 1207-20

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. Antecedentes.....	6
1.2. Definiciones y nomenclatura.....	6
2. MARCO NORMATIVO.....	7
3. DESCRIPCIÓN DEL PARQUE EÓLICO.....	7
4. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS.....	19
5. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	19
6. RESULTADOS OBTENIDOS.....	20
6.1. Ensayo de potencia máxima.....	20
6.1.1 Potencia Neta.....	23
6.1.2 Potencia Bruta.....	23
6.1.3 Potencia de los servicios auxiliares.....	23
6.1.4 Potencia de pérdida de la central.....	24
6.1.5 Resumen de resultados.....	26
7. CONCLUSIONES.....	26

Índice de tablas y gráficos

Tabla 1. Potencia máxima de referencia y pendiente máxima de los aerogeneradores. .15	15
Tabla 2. Rampa de toma y bajada de carga configuradas.....15	15
Tabla 3. Parametrización del modo LFSM-O.16	16
Tabla 4. Parametrización del modo FSM-O-U.....16	16
Tabla 5. Configuración de los límites del control de potencia reactiva.17	17
Tabla 6. Tabla resumen de valores a presentar.19	19
Tabla 7. Resumen de resultados – Potencia Máxima.....26	26
Tabla 8. Potencia Máxima – PE Lomas de Duqueco.26	26
Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico. 6	6
Gráfico 2. Ubicación geográfica del PE Lomas de Duqueco. 9	9
Gráfico 3. Diagrama unilineal simplificado de la zona de influencia del proyecto.10	10
Gráfico 4. Esquema unilineal de la SE Los Ángeles Sur.11	11
Gráfico 5. Esquema unilineal del circuito colector.....12	12
Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Vestas V150 Mk3B 4.2 MW.13	13
Gráfico 7. Esquema de control y medición del PE Lomas de Duqueco.14	14
Gráfico 8. Característica LFSM-O.15	15
Gráfico 9. Característica FSM-O-U.....16	16
Gráfico 10. Límite PQ del control de potencia reactiva.17	17
Gráfico 11. Comportamiento dinámico del control de potencia reactiva.....18	18
Gráfico 12. Parámetros de desempeño típicos del control de potencia reactiva.18	18
Gráfico 13. Potencia máxima en el punto de conexión.20	20
Gráfico 14. Potencia activa en WTG05.20	20
Gráfico 15. Velocidad de viento en WTG05.....21	21
Gráfico 16. Curva Potencia – Velocidad en WTG05.....21	21
Gráfico 17. Potencia Activa en WTG13.....22	22
Gráfico 18. Velocidad de viento en WTG13.....22	22
Gráfico 19. Curva Potencia – Velocidad en WTG13.....23	23
Gráfico 20. Cálculo de pérdidas en el transformador de potencia de la SE Los Ángeles Sur.24	24
Gráfico 21. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Los Ángeles Sur.25	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
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	29/06/22	FG	FM	FM	Emisión Original

Sección principal

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En el presente informe se exhiben los resultados obtenidos en los ensayos de campo realizados en el Parque Eólico Lomas de Duqueco, durante el día 25 de Mayo de 2022, en relación al proceso de determinación de potencia máxima de la planta. Los ensayos fueron realizados encontrándose en servicio la totalidad de los aerogeneradores.

1.2. 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:

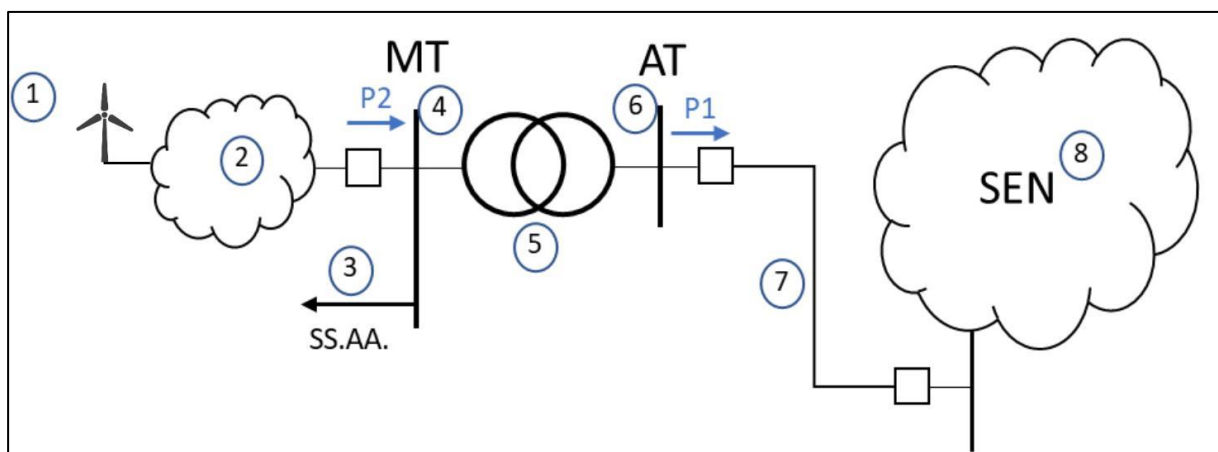


Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.

- 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).

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 del parque eólico

El PE Lomas de Duqueco está ubicado en la comuna de los ángeles Provincia de Bio Bio, VIII región del Bio Bío, Chile. Está conformado por 14 aerogeneradores pertenecientes a la marca Vestas, modelo V150 Mk3B 4.2 MW, todos del tipo Full-Scale Converter Induction Generator, totalizando una potencia total instalada de 58.8 MW. En el Gráfico 6 se muestra la curva de capacidad de los aerogeneradores.

La distribución en media tensión se realiza mediante un sistema colector en 33 kV formado por 3 circuitos que recolectan la potencia de los aerogeneradores. Cada unidad cuenta con un transformador de bloque de 0.72/33 kV de una potencia de 5.15 MVA.

Los circuitos colectores acometen a la barra de 33 kV del transformador de potencia de 66/33 kV y 80 MVA (ONAF), ubicado en la SE Los Ángeles Sur.

El punto de conexión del parque es en barra de 66 kV de la SE Los Ángeles Sur. Desde este nodo parte una línea en 66 kV (formada por 5 tramos de línea) que lo interconecta con la SE Duqueco.

En el Gráfico 2 se muestra la ubicación geográfica del proyecto, en el Gráfico 3 se muestra un diagrama unilineal simplificado de la zona de influencia, en el Gráfico 4 se muestra el

diagrama unilineal de la SE Los Ángeles Sur y en el Gráfico 5 se muestra el diagrama unilineal del sistema colector del PE Lomas de Duqueco.

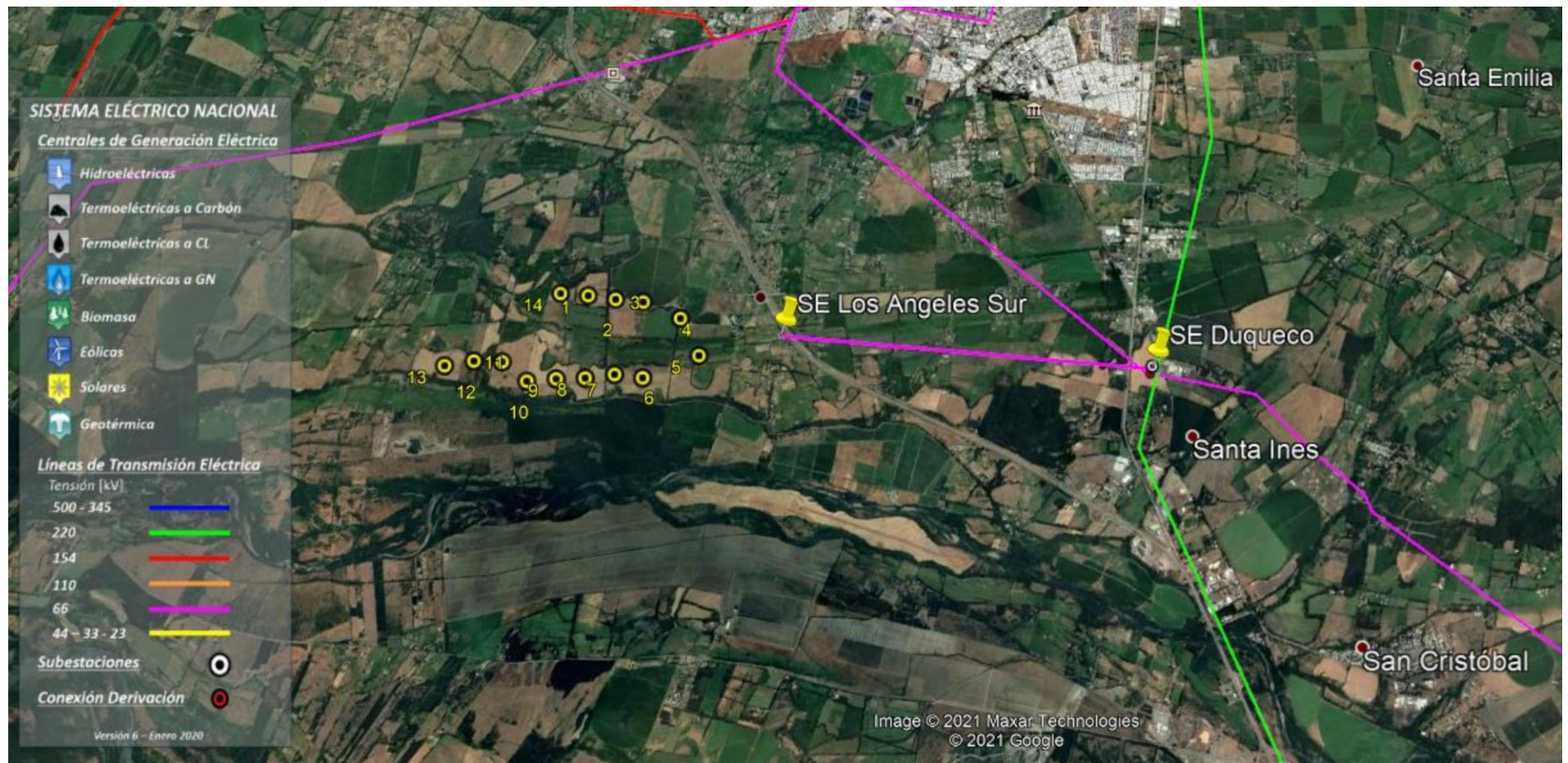


Gráfico 2. Ubicación geográfica del PE Lomas de Duqueco.

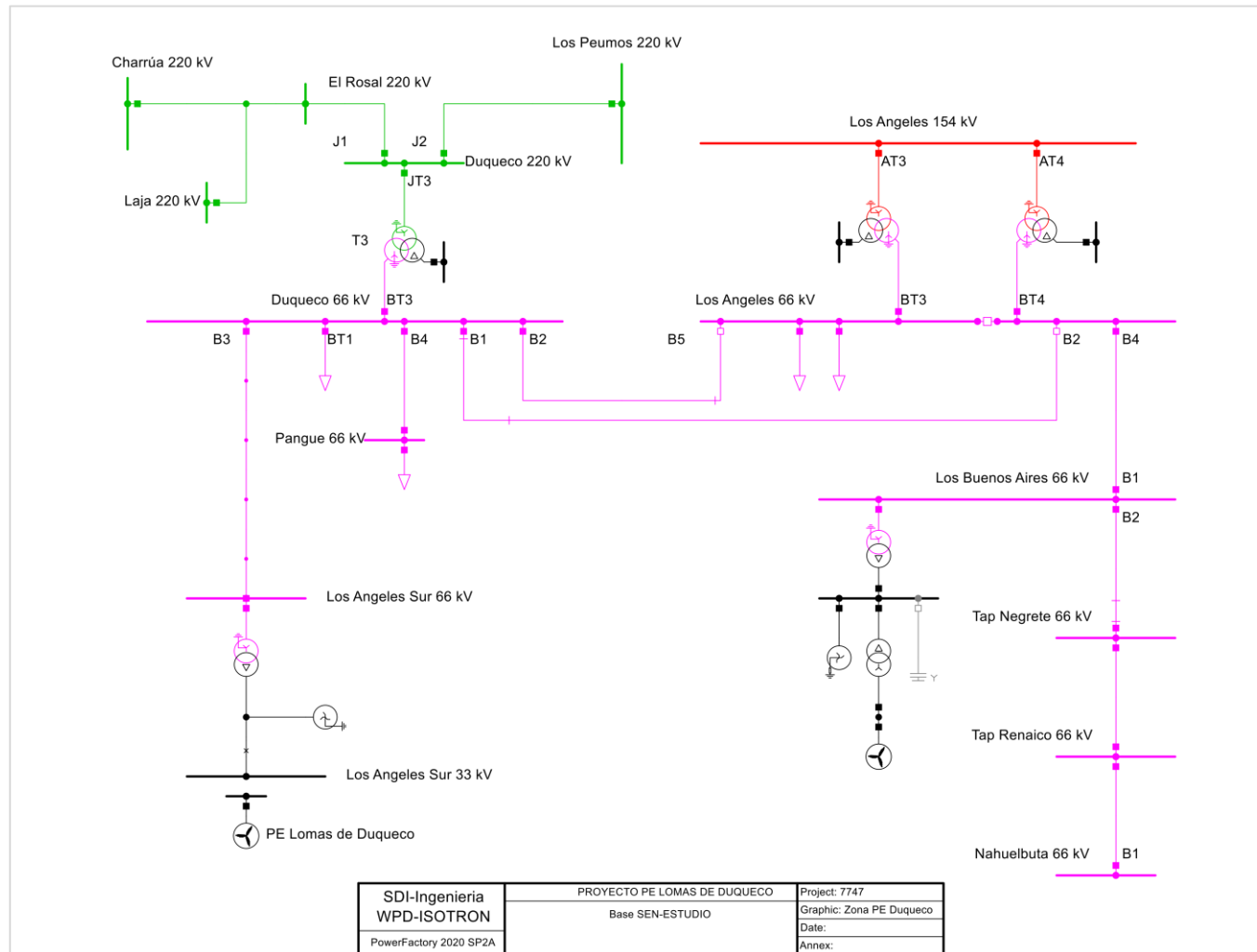


Gráfico 3. Diagrama unilineal simplificado de la zona de influencia del proyecto.

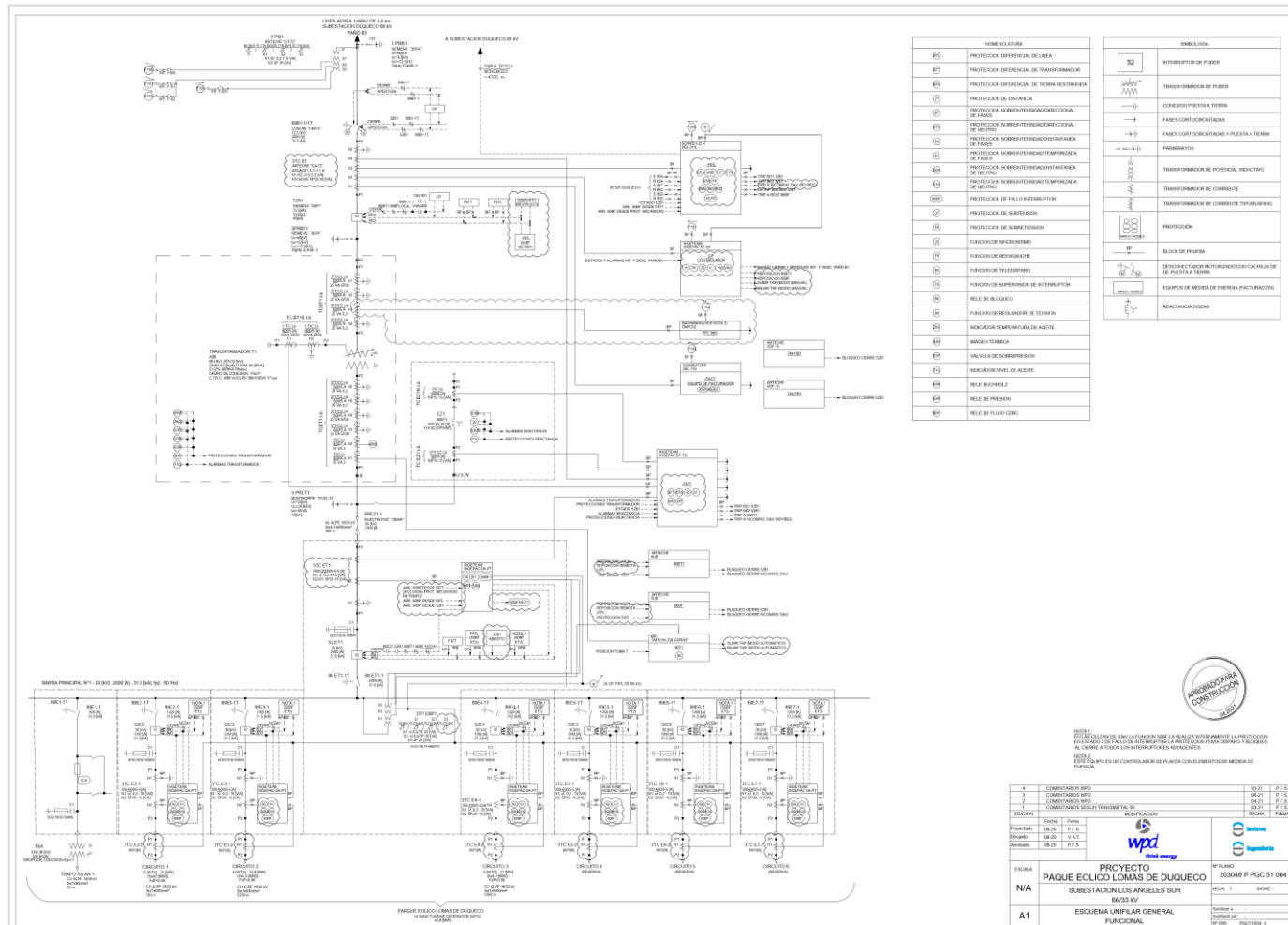


Gráfico 4. Esquema unilínea de la SE Los Ángeles Sur.

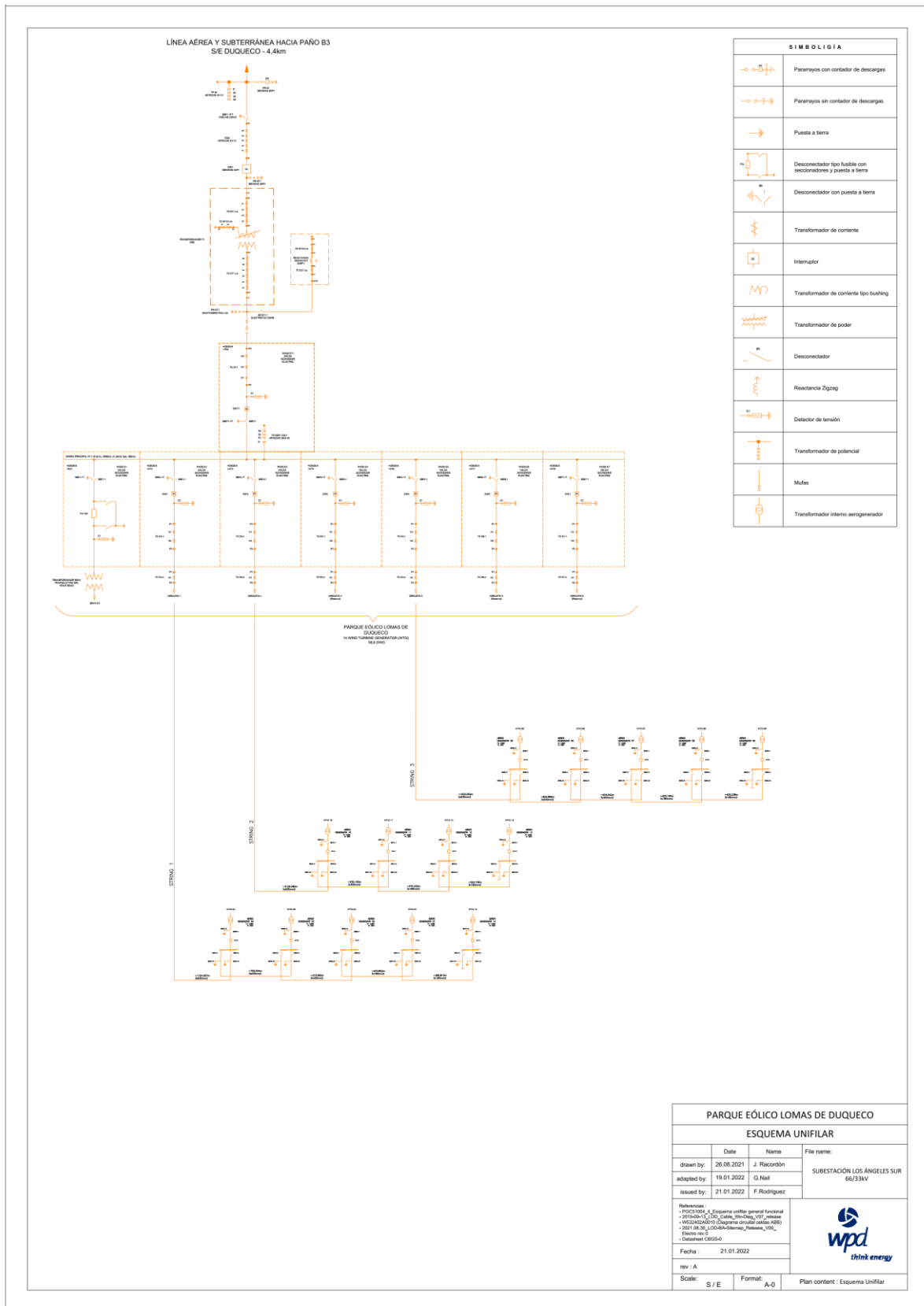


Gráfico 5. Esquema unilínea del circuito colector.

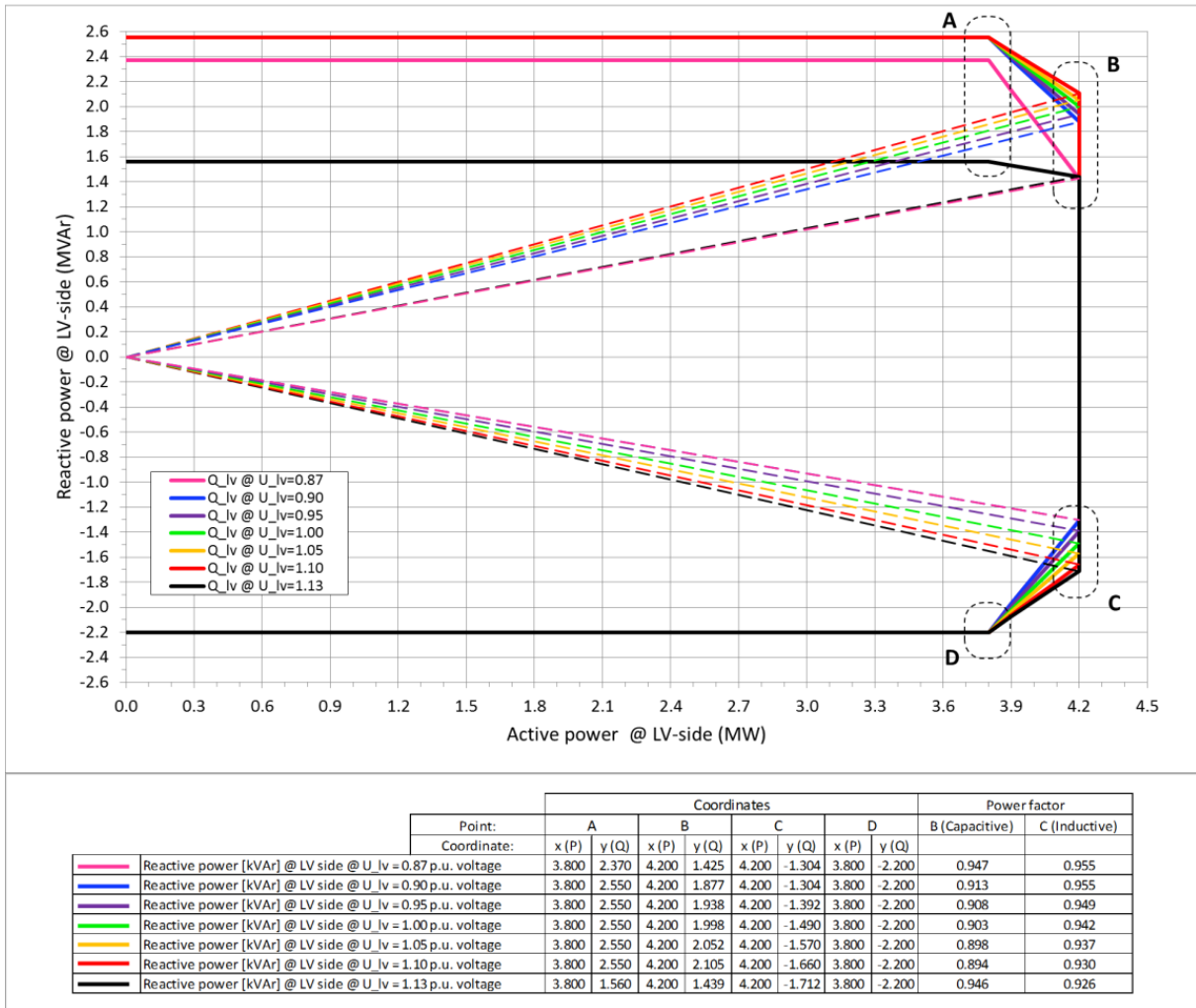


Gráfico 6. Curva de capacidad WTG Vestas V150 Mk3B 4.2 MW.

El control del PE Lomas de Duqueco 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 66 kV de la SE Los Ángeles Sur. En el siguiente gráfico se muestra un esquema de los puntos de medición (POM) y control del parque.

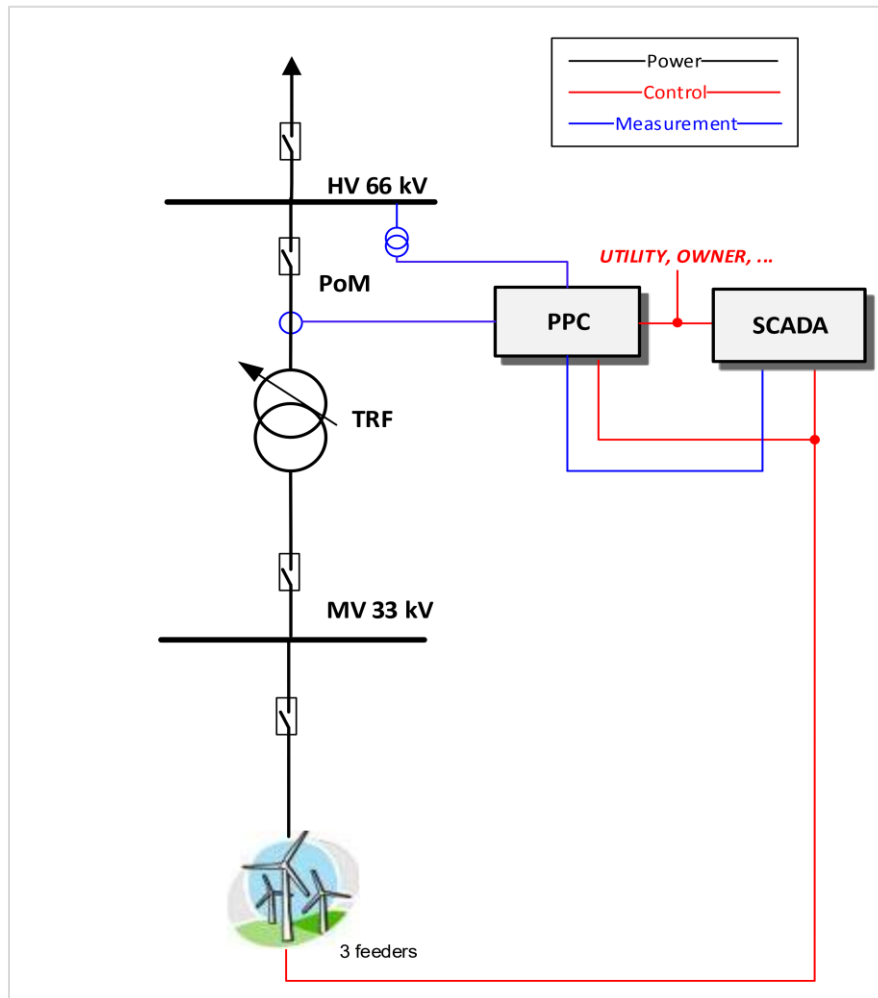


Gráfico 7. Esquema de control y medición del PE Lomas de Duqueco.

El control de planta posee las siguientes funcionalidades:

- Funciones de control de potencia activa:
 - Control de potencia activa (0 – 100%): Permite ajustar el valor de potencia activa a un valor determinado. Cuando la limitación de rampa está activa, tanto la rampa subida como de bajada quedan definidas por una pendiente determinada. En el caso particular del PE Lomas de Duqueco está pendiente estaba configurada en 20 %/min tanto para la toma como para la reducción de generación. Cuando la limitación de rampa está desactivada, la reducción y toma de carga se realizarán a una tasa que está dada por la pendiente natural de los aerogeneradores (PrampLimit).

Con respecto al valor de potencia máxima de referencia, para el PE Lomas de Duqueco, esta es del 100% de la potencia nominal de la planta (58.8 MW).

En la sección 7.2 del documento de referencia del fabricante se muestra las configuraciones sugeridas para el control de potencia activa que en este caso coinciden con las adoptadas en el PE y se muestran a continuación:

Tabla 1. Potencia máxima de referencia y pendiente máxima de los aerogeneradores.

P_{ref} maximum	58.8 MW
P_{ramp} limit (internal)	0.02 pu/s

Tabla 2. Rampa de toma y bajada de carga configuradas.

Active power output ramp	11760 kW/min (0.2 pu/min)
---------------------------------	---------------------------

- 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 las secciones 7.1.1 y 7.1.2 del documento de referencia, se establece la configuración sugerida por el fabricante VESTAS para los modos LFSM-O (modo de control de frecuencia sin reserva) y LFSM-O-U (modo de control de frecuencia con reserva de potencia activa). En los siguientes gráficos y tablas se detallan las curvas características y parametrización para ambos modos de control.

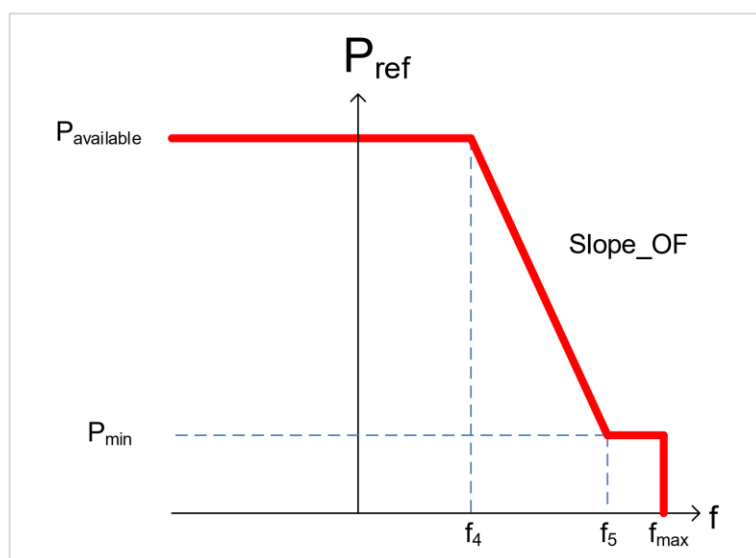


Gráfico 8. Característica LFSM-O.

Tabla 3. Parametrización del modo LFSM-O.

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

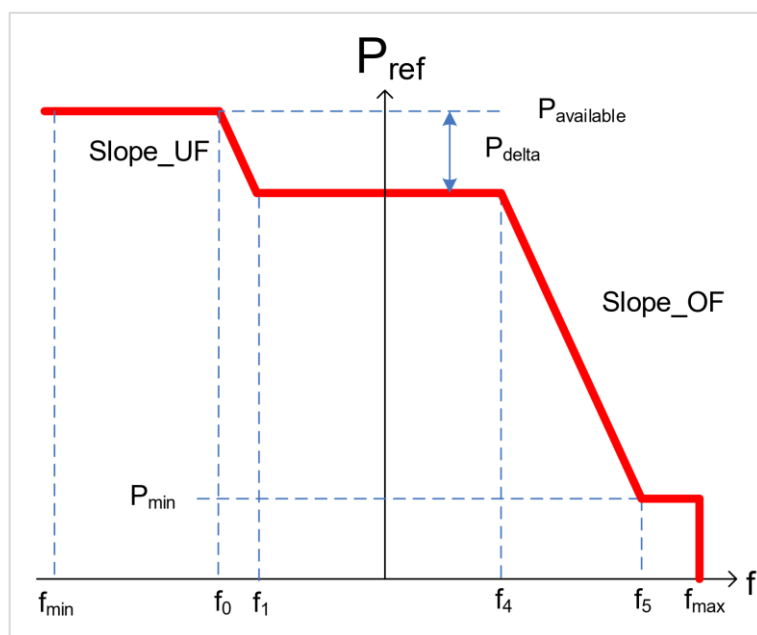


Gráfico 9. Característica FSM-O-U.

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

fmin	48 Hz
f0	$(f_1 - (Pdelta [\%] \times Slope_{UF} / 100 / 100 \times 50))$ 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	28.5% of Pavailable
P ramp rate limit (default)	0.02 pu/s

El modo configurado en la planta es el LFSM-O (Modo de control de frecuencia sin reserva).

- Funciones de control de potencia reactiva:
 - Control de Tensión: Permite definir un valor de consigna de tensión en el punto de conexión del PE. En el caso particular del PE Lomas de Duqueco, 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. En la sección 5.1 del documento de referencia de fabricante, se establecen los límites máximos de potencia reactiva según se detalla a continuación:

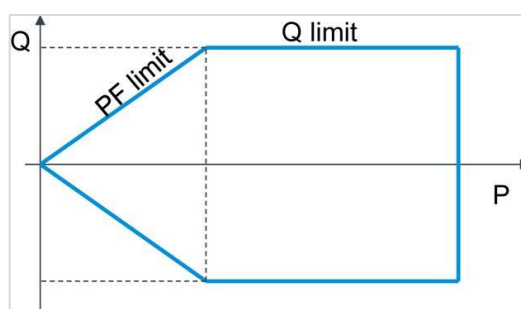


Gráfico 10. Límite PQ del control de potencia reactiva.

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

PF limit capacitive	0.51
PF limit inductive	0.83
Q limit capacitive	19.4 MVar
Q limit inductive	19.4 MVar
Q_{ref} ramp rate limit	0.1 pu/s

En cuanto a los tiempos de respuesta del control en la siguientes tablas y gráficas se muestran los tiempos típicos de respuesta del control.

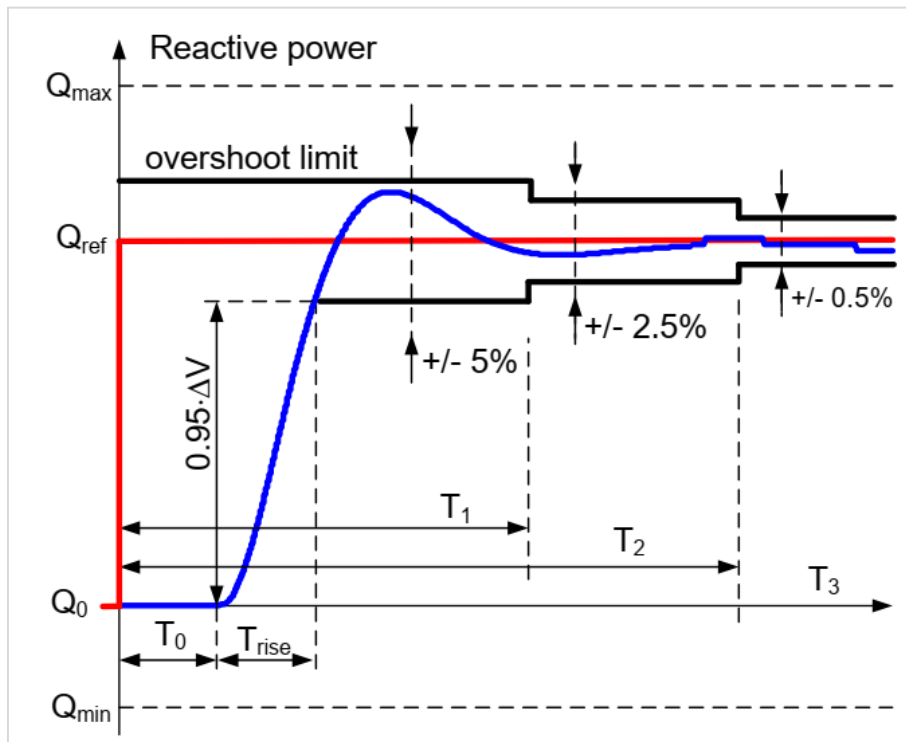


Gráfico 11. Comportamiento dinámico del control de potencia reactiva.

Gráfico 12. Parámetros de desempeño típicos del control de potencia reactiva.

T₀	Typical performance around 0.2 s
T_{rise}	4 s
T₂	< 15 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 en función de los mostrados para el control de potencia reactiva.

4. Antecedentes de unidades de similares características

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

- Parque Eólico Malleco Norte (Potencia máxima neta medida = 135.507 MW y Potencia máxima bruta medida = 137.85 MW)¹

5. Descripción de los ensayos

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 miércoles 25/05/2021, incluyendo los antecedentes técnicos y los cálculos usados para obtener el valor. 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 6. Tabla resumen de valores a presentar.

Parque Eólico	Potencia Bruta [kW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [kW]
PE Lomas de Duqueco	(1)	(2)	(3)	(4)

- (1) **Potencia Bruta:** Corresponde a la suma del aporte de potencia activa de todos los aerogeneradores del PE Lomas de Duqueco en el lado de BT.
- (2) **SS.AA.:** Corresponde al consumo de servicios auxiliares de la central (aerogeneradores + SE Los Ángeles Sur).
- (3) **Pérdidas en la central:** Corresponde a la suma de las pérdidas en el transformador de potencia de la SE Los Ángeles Sur 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 del PE Lomas de Duqueco es la barra de AT de la SE Los Ángeles Sur.

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

6. Resultados obtenidos

6.1. Ensayo de potencia máxima

A continuación, se muestran los registros de potencia máxima obtenidos en el punto de conexión y a nivel aerogenerador, en el aerogenerador más cercano (WTG05) y más lejano (WTG13) el día miércoles 25/05/2022.

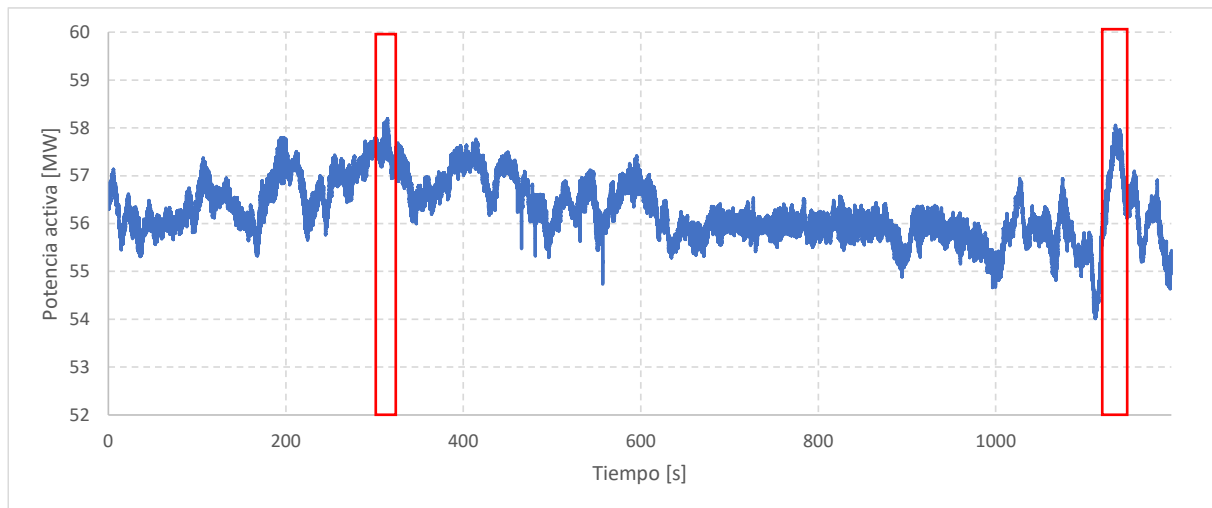


Gráfico 13. Potencia máxima en el punto de conexión.

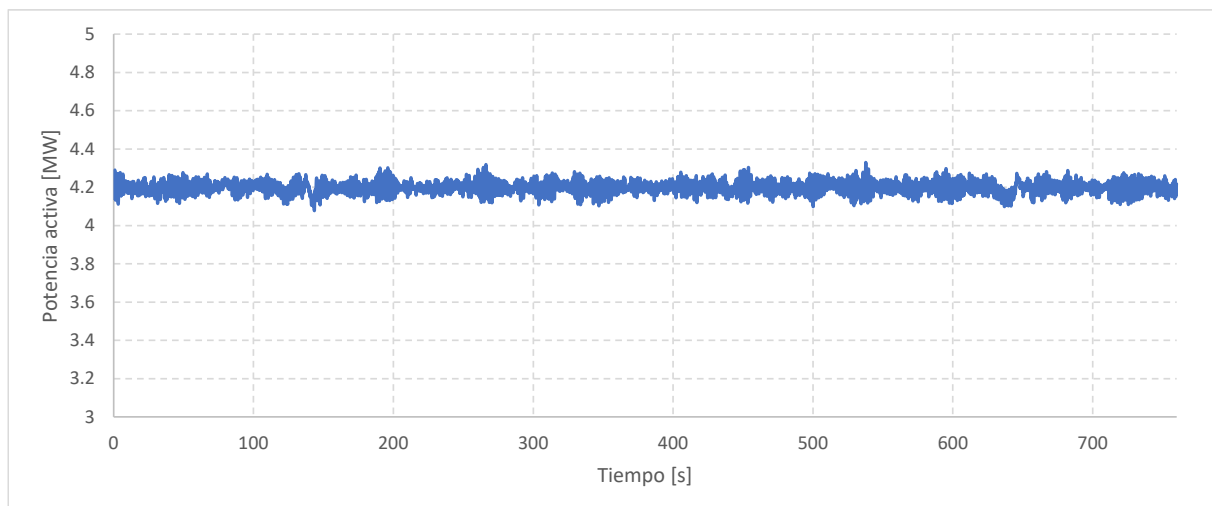


Gráfico 14. Potencia activa en WTG05.

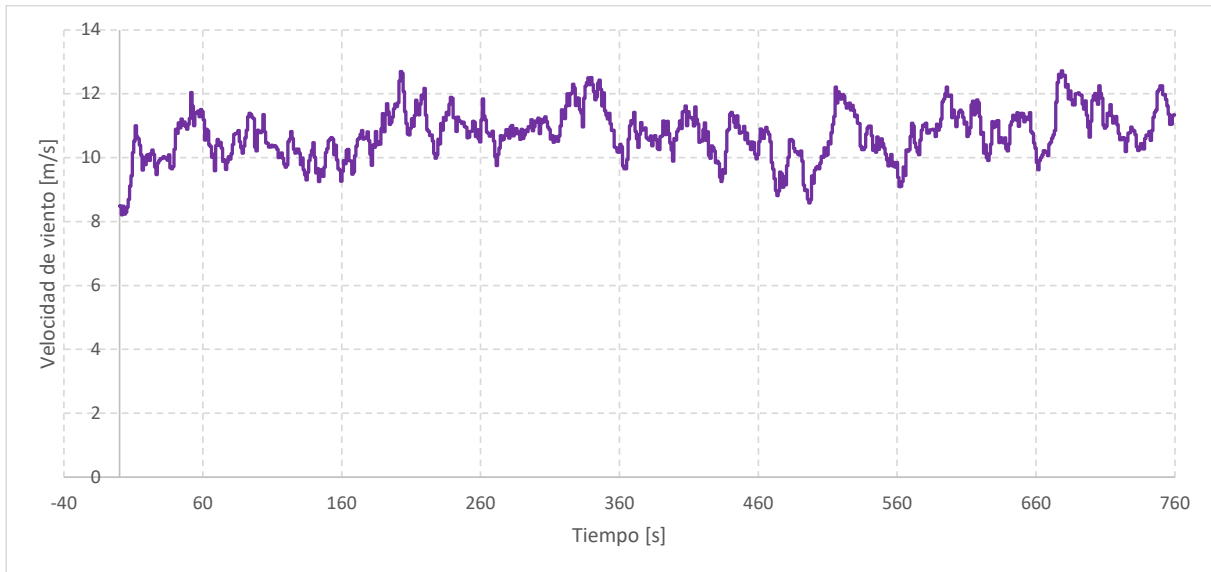


Gráfico 15. Velocidad de viento en WTG05.

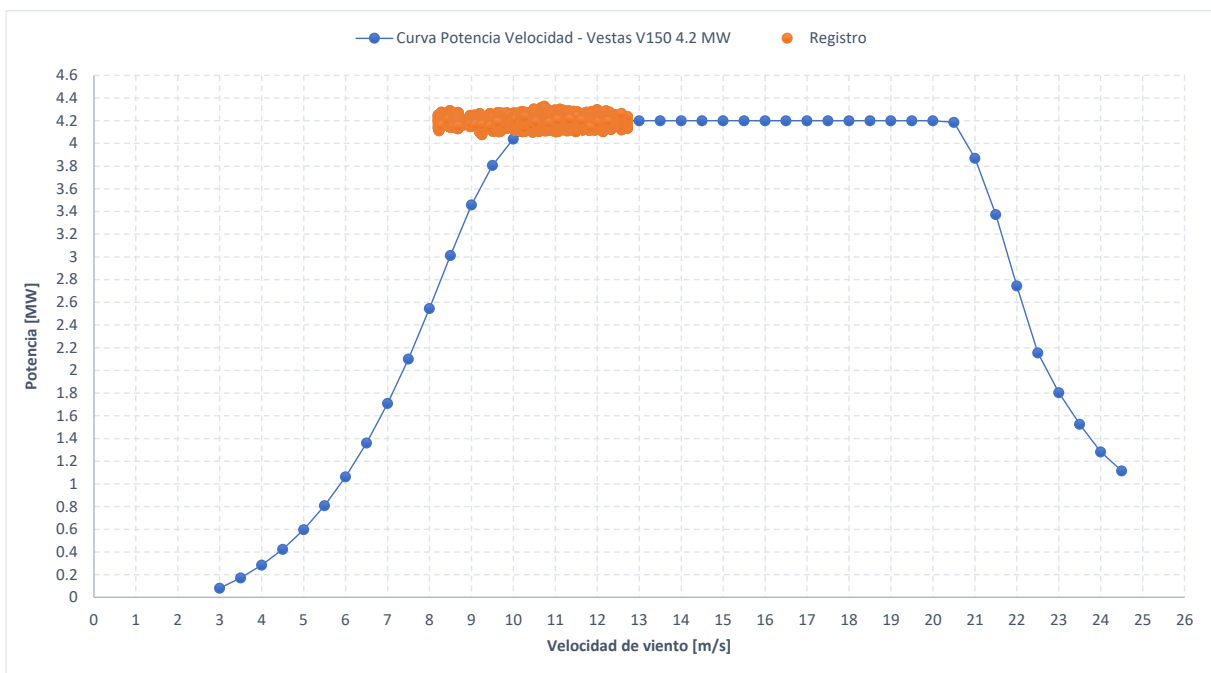


Gráfico 16. Curva Potencia – Velocidad en WTG05.

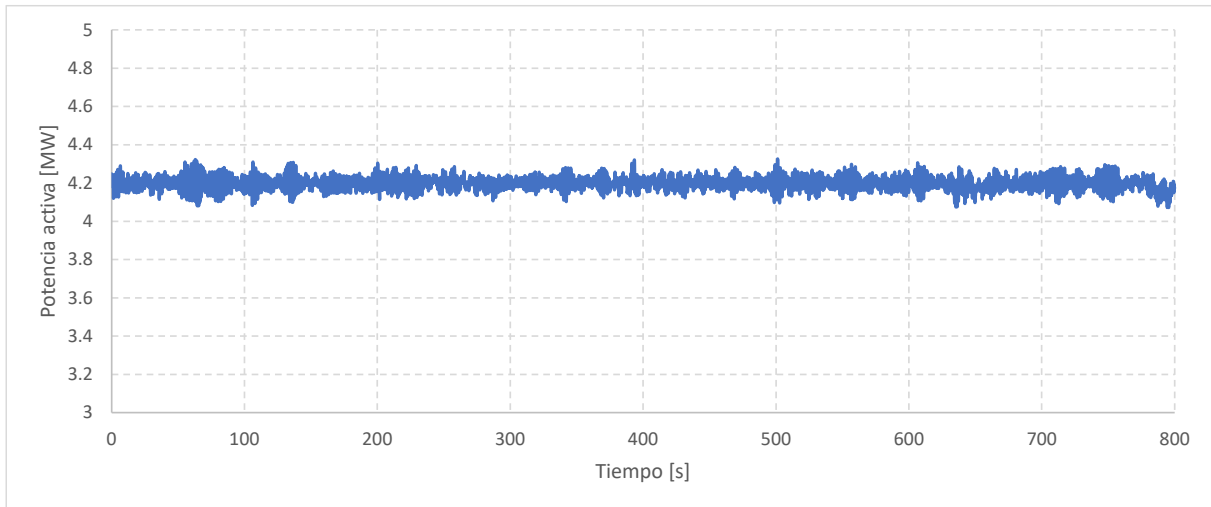


Gráfico 17. Potencia Activa en WTG13.

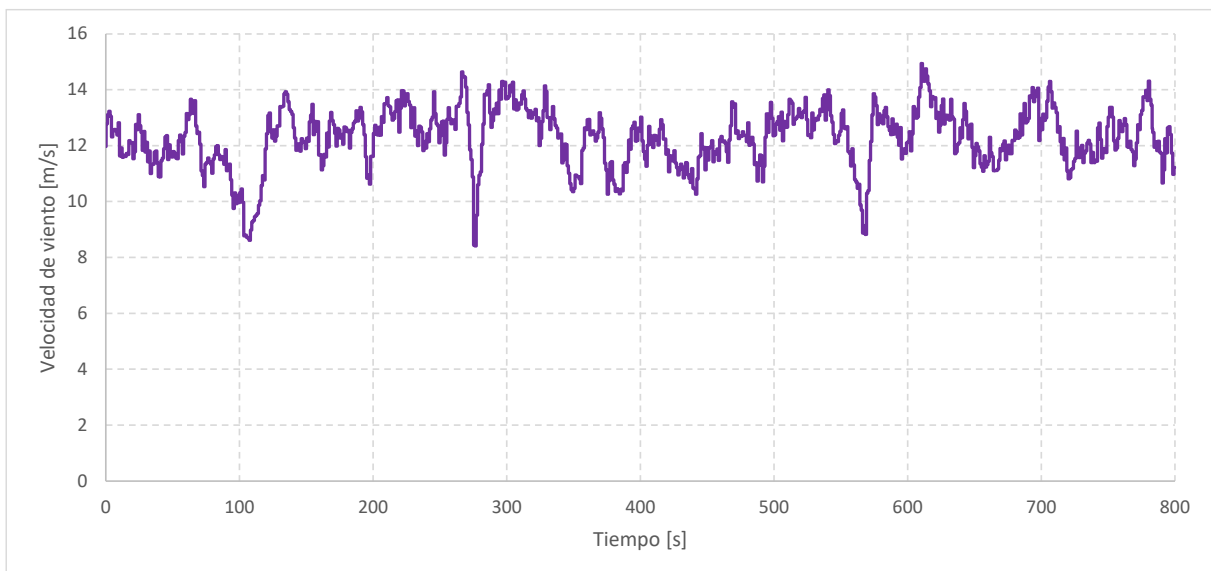


Gráfico 18. Velocidad de viento en WTG13.

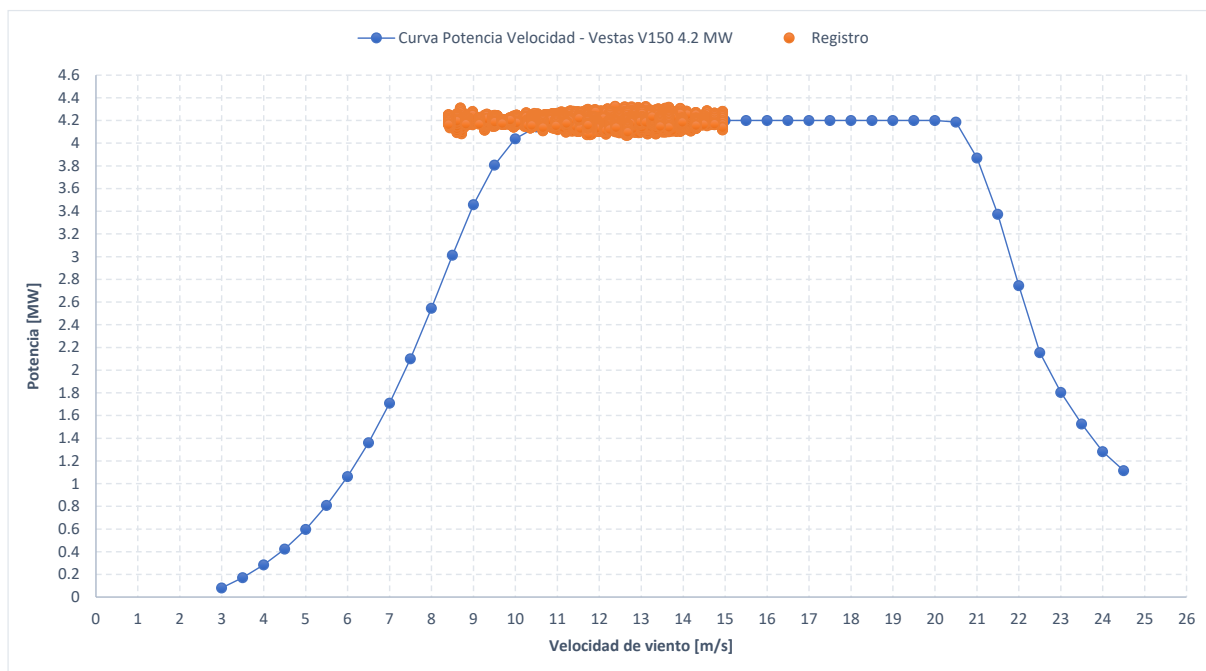


Gráfico 19. Curva Potencia – Velocidad en WTG13.

A continuación, se realiza el cálculo de potencia según la Tabla 6.

6.1.1 Potencia Neta

Como puede visualizarse en el Gráfico 13 en ciertos instantes la potencia máxima inyectada en el punto de conexión fue de 58 MW, por lo tanto:

$$P_{neta} = 58 \text{ MW}$$

6.1.2 Potencia Bruta

Como puede verse en el Gráfico 14 y el Gráfico 17, los aerogeneradores pueden inyectar una potencia máxima bruta promedio de 4.2 MW. La potencia bruta total surge de la sumatoria de las potencias individuales en bornes de cada aerogenerador para el instante de máxima potencia en el punto de conexión.

$$P_{bruta} = \sum_{i=1}^{14} P_{gi} = 58.8 \text{ MW}$$

6.1.3 Potencia de los servicios auxiliares

El consumo para esta condición operativa se determinó en un valor de 40 kW (SE Los Ángeles Sur + Aerogeneradores).

$$P_{SSAA} = 40 \text{ kW}$$

6.1.4 Potencia de pérdida 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 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:

$$P_{perd\ central} = P_{bruta} - P_{neta} - P_{SSAA}$$

$$P_{perd\ central} = 58.8\ MW - 58\ MW - 0.04\ MW$$

$$P_{perd\ central} = 760\ kW$$

Este valor debe ser desagregado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en el transformador principal (Ptrrafo).
- 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 Los Ángeles Sur. Para el estado de potencia máxima se tiene:

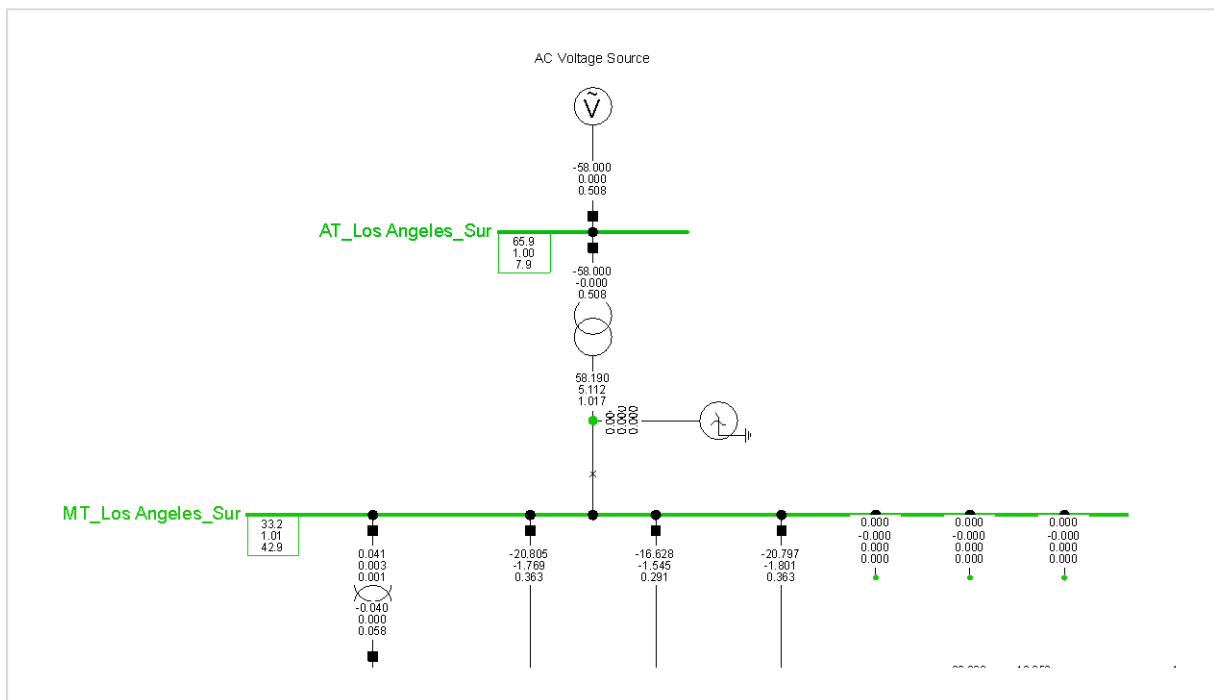


Gráfico 20. Cálculo de pérdidas en el transformador de potencia de la SE Los Ángeles Sur.

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

$$P_{trafo} = 58.19 \text{ MW} - 58 \text{ MW} = 190 \text{ kW}$$

Los datos del transformador de potencia se muestran a continuación:

Name	T1 Los Angeles Sur 66/33 kV 80 MVA	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	80.	MVA
Nominal Frequency	50.	Hz
Rated Voltage		
HV-Side	66.	kV
LV-Side	33.	kV
Vector Group		
HV-Side	YN	
LV-Side	D	
Phase Shift	11.	*30deg
Name	YNd11	
Positive Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk	12.09	%
Copper Losses	316.41	kW
Zero Sequence Impedance		
Short-Circuit Voltage uk0	11.88	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0.	%

General	Tap Changer	Saturation	Advanced
Magnetising Impedance			
No Load Current	0.032	%	
No Load Losses	22.691	kW	
Distribution of Leakage Reactances (p.u.)			
x, Pos. Seq. HV-Side	0.5		
x, Pos. Seq. LV-Side	0.5		
Distribution of Leakage Resistances (p.u.)			
r, Pos. Seq. HV-Side	0.5		
r, Pos. Seq. LV-Side	0.5		

Gráfico 21. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Los Ángeles Sur.

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

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

$$P_{colector} = 760\ kW - 190\ kW$$

$$P_{colector} = 570\ kW$$

6.1.5 Resumen de resultados

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

Tabla 7. Resumen de resultados – Potencia Máxima.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
PE Lomas de Duqueco	58.8	40	760	58

7. Conclusiones

Se determinó en base a los registros operacionales y cálculos que el PE Lomas de Duqueco puede generar una potencia bruta máxima de 58.8 MW, entregando en el punto de conexión una potencia de 58 MW.

Tabla 8. Potencia Máxima – PE Lomas de Duqueco.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
PE Lomas de Duqueco	58.8	40	760	58