



estudios energéticos consultores.
GRUPO MERCADOS ENERGÉTICOS CONSULTORES

INFORME DE DETERMINACIÓN DE MINIMO TÉCNICO

Parque Eólico Alena



Abril 2022

M 2063

Tabla de contenido

REGISTRO DE COMUNICACIONES.....	5
SECCIÓN PRINCIPAL	6
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Definiciones y nomenclatura	6
2. MARCO NORMATIVO	7
3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	7
4. ANTECEDENTES DE UNIDADES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS	12
5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	13
6. RESULTADOS OBTENIDOS	14
6.1. Mínimo técnico con el parque totalmente operativo.....	14
6.2. Mínimo técnico con un aerogenerador operativo	19
7. CONCLUSIONES.....	22

Índice de tablas y gráficos

Tabla 1. Tabla resumen de valores a presentar.	13
Tabla 2. Pérdidas y consumos propios del PE Alena para parque completo.....	18
Tabla 3. Mínimo técnico de planta.	19
Tabla 4. Pérdidas y consumos propios del PE Alena para un aerogenerador operativo.	21
Tabla 5. Mínimo técnico para un aerogenerador operativo.....	22
Tabla 6. Mínimo técnico – Planta completa – PE Alena.	22
Tabla 7. Mínimo técnico – T36 – Pe Alena.	22
Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.	6
Gráfico 2. Esquema Unilineal de interconexión del sistema.	9
Gráfico 3. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Alena.....	10
Gráfico 4. Esquema unilineal del sistema colector en 33 kV.	11
Gráfico 5. Curva de capacidad WTG Nordex N149 4.8 MW.	11
Gráfico 6. Potencia activa en el punto de conexión.	14
Gráfico 7. Potencia reactiva en el punto de conexión.	14
Gráfico 8. Tensión en el punto de conexión.	15
Gráfico 9. Potencia Activa en bornes de un aerogenerador.	15
Gráfico 10. Velocidad de Viento registrada en un aerogenerador.	16
Gráfico 11. Potencia bruta y potencia neta durante la prueba de mínimo técnico.	16
Gráfico 12. Cálculo de flujo de potencia en el transformador de potencia de la SE Alena.....	17
Gráfico 13. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Alena.	18
Gráfico 14. Resultado del cálculo de flujo de potencia para el mínimo técnico en T36.	19
Gráfico 15. Potencia mínima bruta en T36.	20
Gráfico 16. Flujo de potencia en el transformador de la subestación para mínimo técnico en T36.	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	18/11/2021	Emisión original	V1	Preparó JL	FM
2	19/04/2022	Correcciones en función de las observaciones del CEN	V2	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 Alena, durante el día 11 de octubre de 2021, en relación al proceso de determinación del mínimo técnico de la planta. Los ensayos fueron realizados encontrándose en servicio la totalidad de los inversores que conforman el parque.

1.1. Definiciones y nomenclatura

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

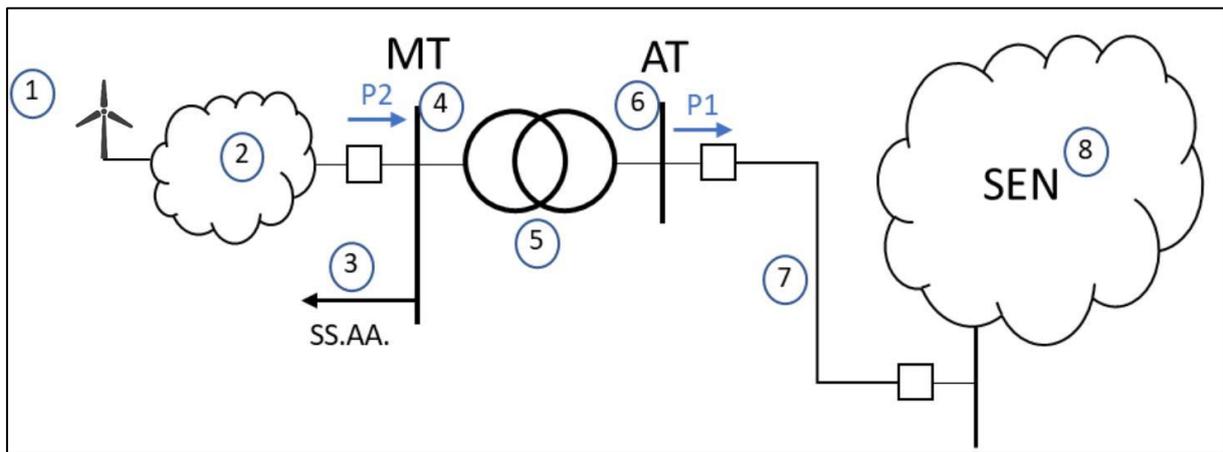


Gráfico 1. Sistema equivalente de un parque eólico.

- 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_{neto}**).
- **P2:** Potencia activa inyectada en el lado de media tensión del parque.
- **Pbruta:** Suma de los aportes de potencia activa de los aerogeneradores del parque en el lado baja tensión (BT) del parque (en correspondencia con el punto 1 del Gráfico 1).
- **Pperd:** Potencia de pérdidas en la línea de transmisión (ver punto 7 del Gráfico 1).
- **Ptrafo:** Pérdidas activas en el transformador de potencia del parque.
- **Pssa:** Potencia de servicios auxiliares del parque.
- **Pcolector:** Pérdidas en el sistema colector del parque (ver punto 2 del Gráfico 1).

2. MARCO NORMATIVO

Las pruebas realizadas se programaron en base al ANEXO TÉCNICO de la NTSyCS “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 Alena la determinación se hará al valor mínimo que permita limitarse la consigna de generación del parque y que no desconecte los aerogeneradores, de manera de mantener el soporte de tensión y potencia reactiva al sistema, verificado mediante un ensayo sobre el parque.

Los valores de mínimo técnico se obtuvieron considerando distintas condiciones operativas del PE Alena. Los escenarios considerados se detallan a continuación:

- **Mínimo técnico con el parque totalmente operativo:** Valor de potencia activa mínima bruta con la cual el parque puede operar considerando todos los aerogeneradores y elementos de la red colectora en servicio y en condiciones de operación estable.
- **Mínimo técnico considerando un aerogenerador en servicio:** Valor de potencia activa bruta entregada por un **único aerogenerador** (con el resto en pausa) que permite entregar una Potencia activa neta en el punto de conexión de 0 MW.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El PE Alena se ubica en la comuna de Los Ángeles, en la Región del Bio Bio, Chile. Está conformado por 18 aerogeneradores Nordex N149 4.8 MW de tecnología DFIG, totalizando una potencia instalada de 86.4 MW (4.8 MW x 18) y una potencia comprometida en el punto de conexión de 84 MW. En el Gráfico 5 se muestra la curva de capacidad PQ de los aerogeneradores.

La distribución en media tensión se realiza mediante un sistema colector en 33 kV formado por 5 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 154/33 kV 100 MVA (ONAF), de la SE Alena.

El PE Alena, se conecta al SEN, mediante una línea en 154 kV de 949 m, que une la SE Alena y el y el tap existente Coyanco en el paño A1.

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

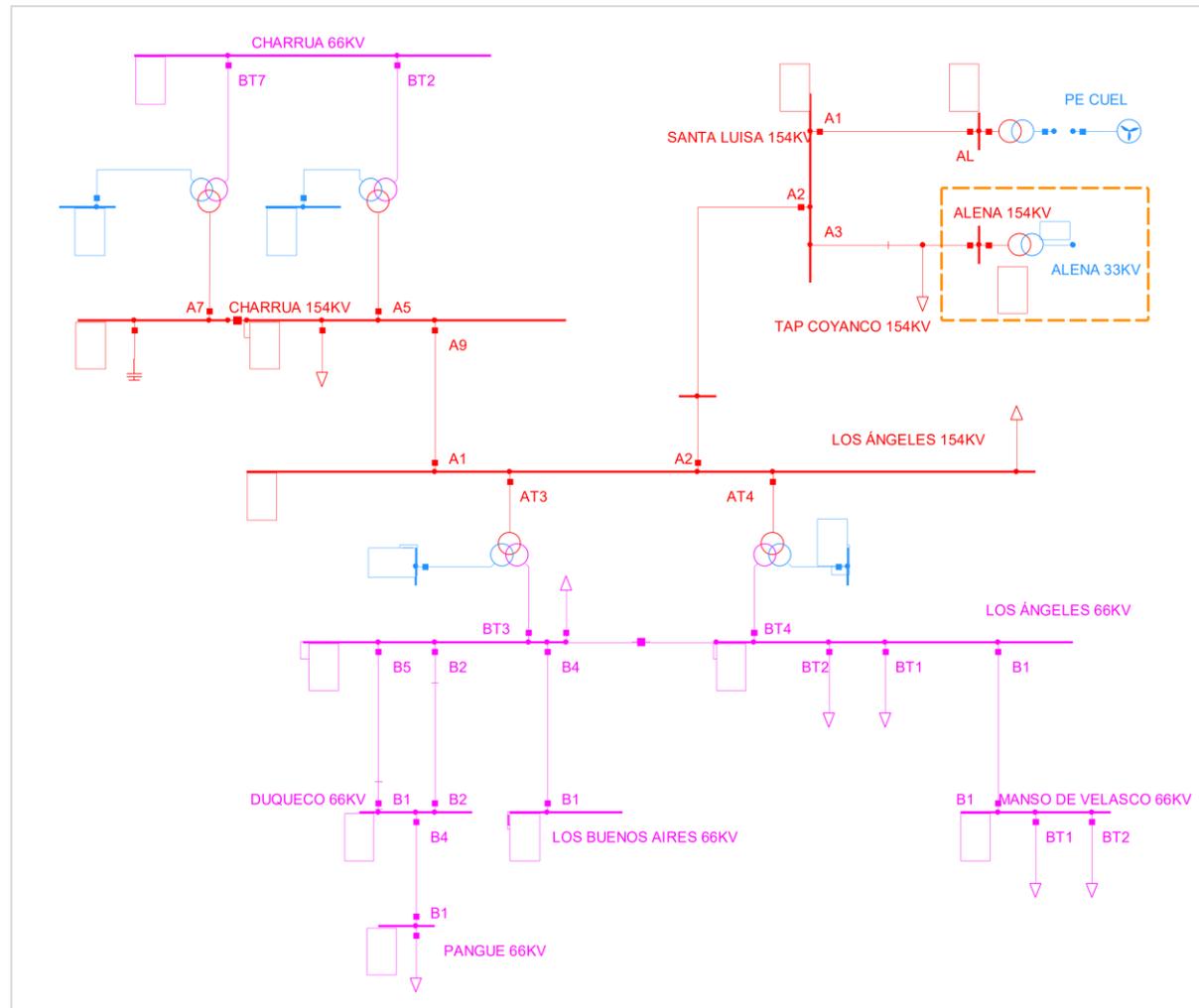


Gráfico 3. Esquema unilineal de la zona de influencia del PE Alena.

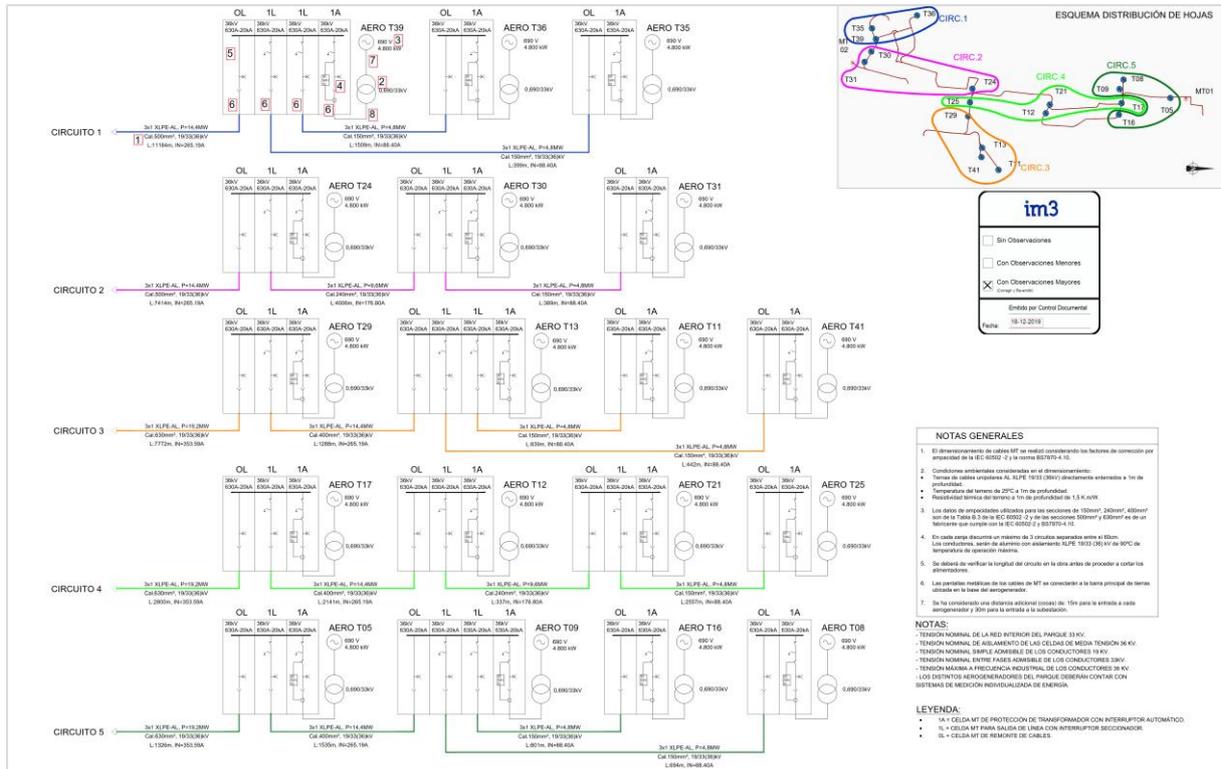


Gráfico 4. Esquema unilíneal del sistema colector en 33 kV.

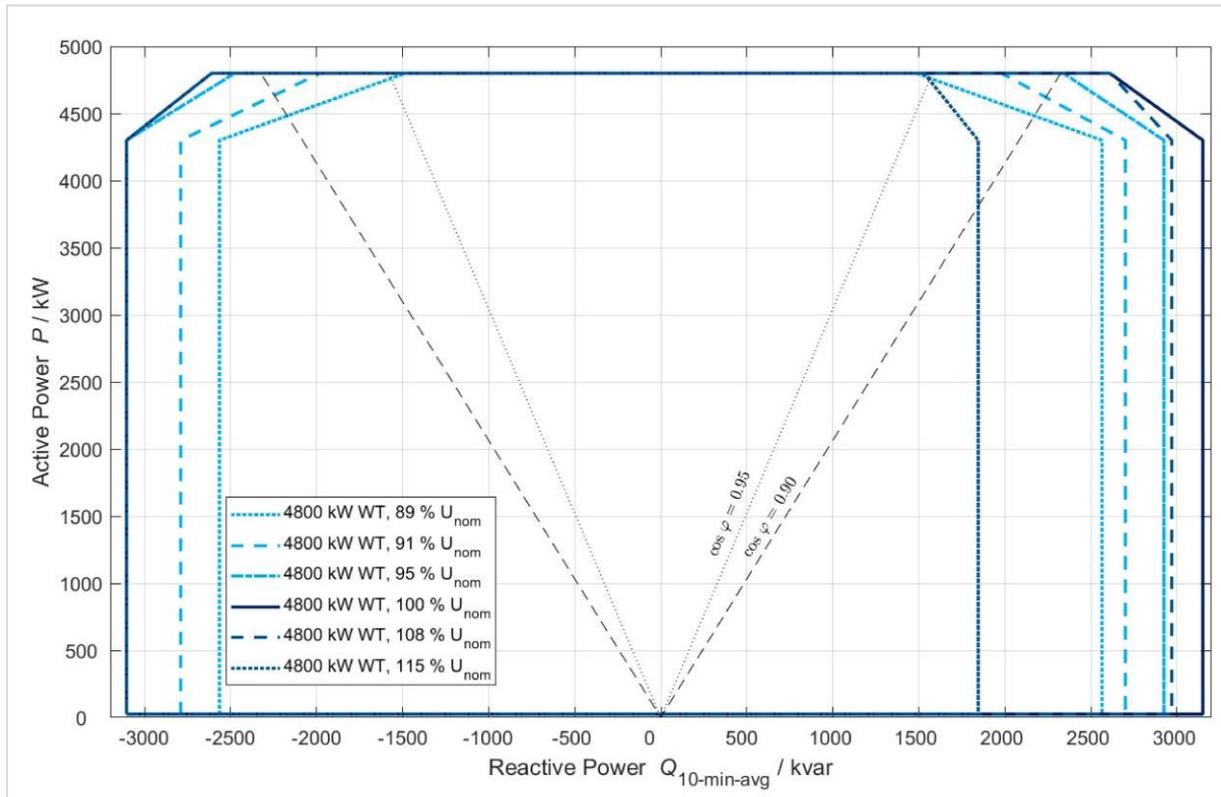


Gráfico 5. Curva de capacidad WTG Nordex N149 4.8 MW.

El control del PE Alena se realiza 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 154 kV de la SE Alena.

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 Alena esta tasa estaba configurada en 16 % /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 Alena este posee una banda muerta configurada en ± 200 mHz, con un droop de 3.63 %.
- **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 Alena 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.

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 TOLPAN SUR (Mínimo Técnico: 0,87 MW)

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

5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

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”.

Tal como se comentó en la **Sección 2** el valor de mínimo técnico se determinará con el parque totalmente operativo y además con un aerogenerador en servicio (con el resto en pausa).

Para el caso del mínimo técnico a nivel planta, el mínimo valor de referencia configurable en el punto de conexión desde el control de planta (PPC) según se informó por el fabricante, es de 8,64 MW (10% de P_n). 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 (8,64 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.

Para el cálculo de mínimo técnico con un aerogenerador operativo se procedió a despachar un aerogenerador con un valor de potencia tal que la potencia activa inyectada en el punto de conexión sea igual a 0 MW ($P_{neta} = 0$ MW). En este caso los resultados fueron obtenidos mediante simulación en el modelo detallado del PE desarrollado en el software Power Factory.

Para cada una de las pruebas, se desglosan los valores de potencia obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tabla resumen de valores a presentar.

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

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

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Mínimo técnico con el parque totalmente operativo

Se obtuvieron los registros de potencia activa **P1** (Gráfico 6), potencia reactiva (Gráfico 7) y tensión en el punto de conexión (Gráfico 8), para un valor mínimo de potencia activa configurable en 8,64 MW desde el control de planta. En este estado de carga se realizó un escalón en la potencia reactiva de +8,7 MVar (capacitivo) y - 8,7 MVar (inductivo).

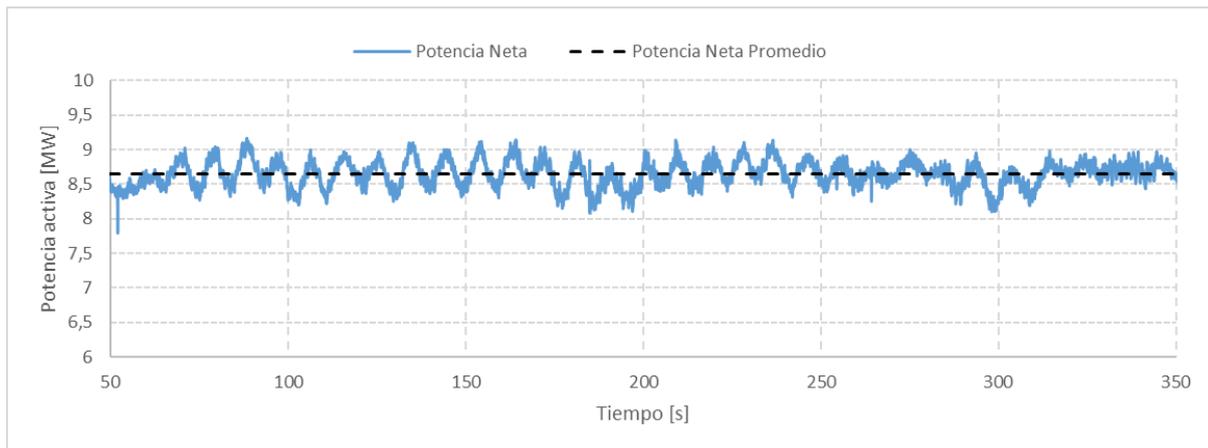


Gráfico 6. Potencia activa en el punto de conexión.

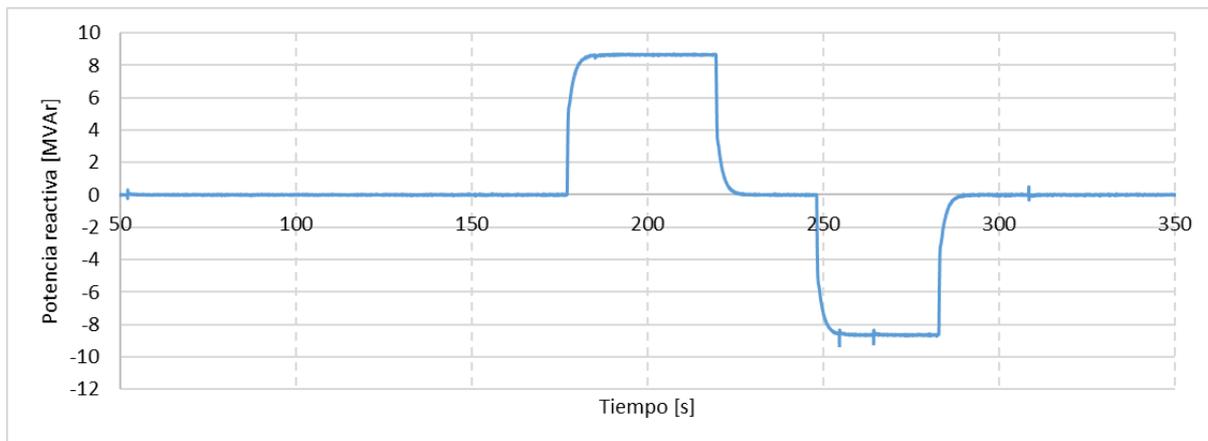


Gráfico 7. Potencia reactiva en el punto de conexión.

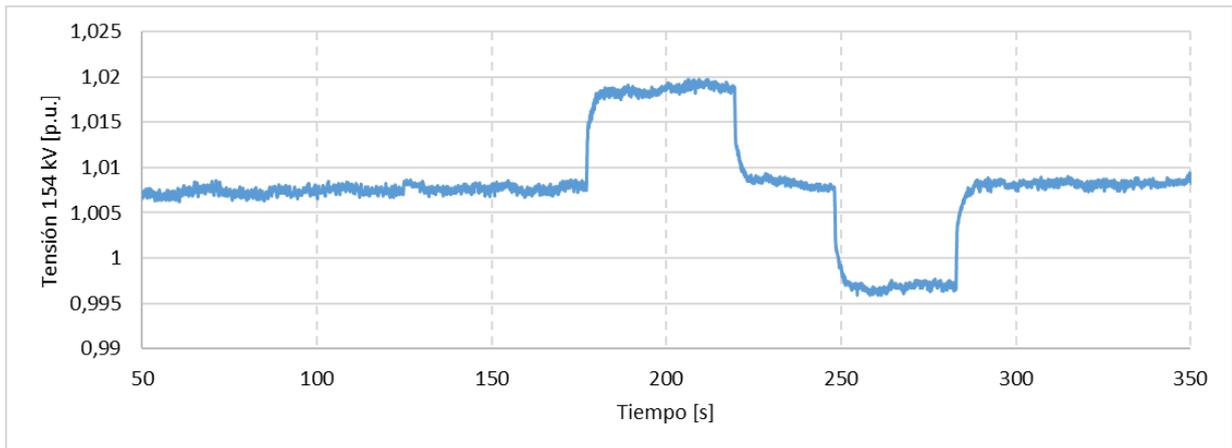


Gráfico 8. Tensión en el punto de conexión.

El parque operó satisfactoriamente sin presentar inestabilidades y manteniendo el soporte de potencia reactiva y tensión a la red sin desconexión de aerogeneradores. A continuación, se realiza el cálculo de potencia según la Tabla 1:

6.1.1. Potencia Neta

De lo anterior se determinó que la potencia neta en el punto de conexión es el promedio del registro del Gráfico 6.

$$P_{neta} = 8,64 \text{ MW.}$$

6.1.2. Potencia Bruta

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

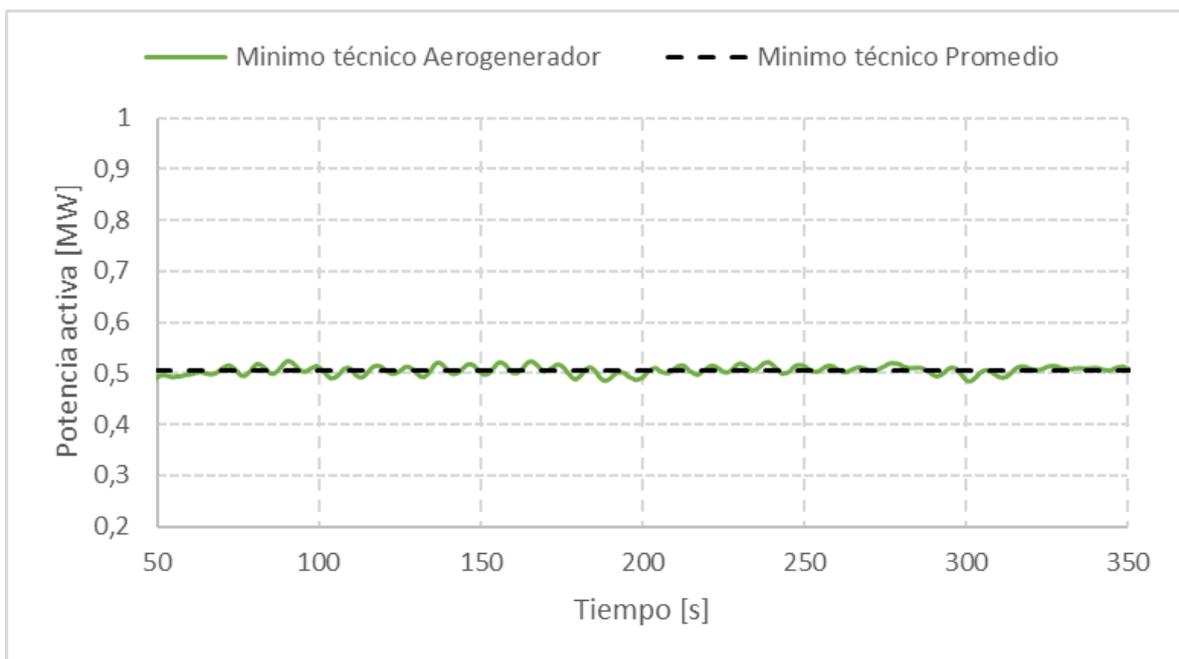


Gráfico 9. Potencia Activa en bornes de un aerogenerador.

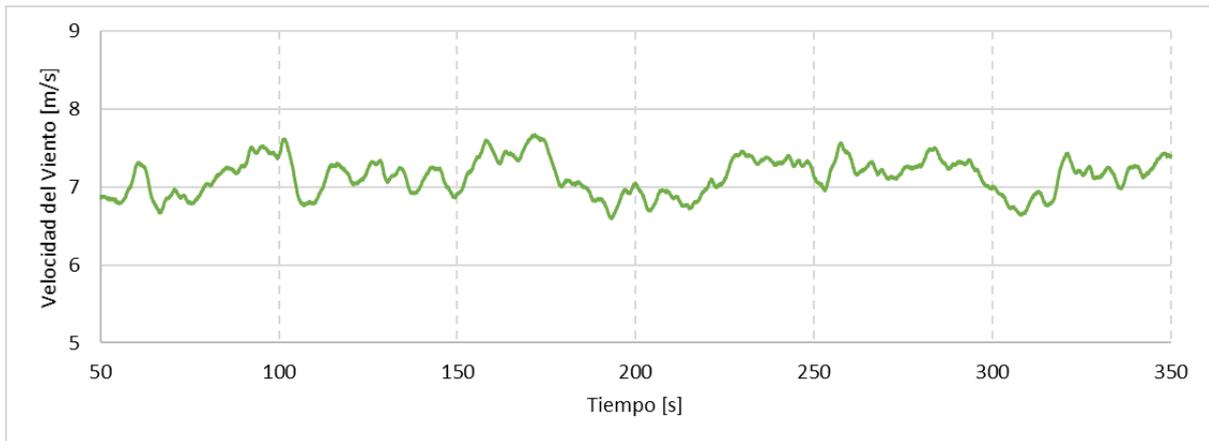


Gráfico 10. Velocidad de Viento registrada en un aerogenerador.

En el Gráfico 11 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.

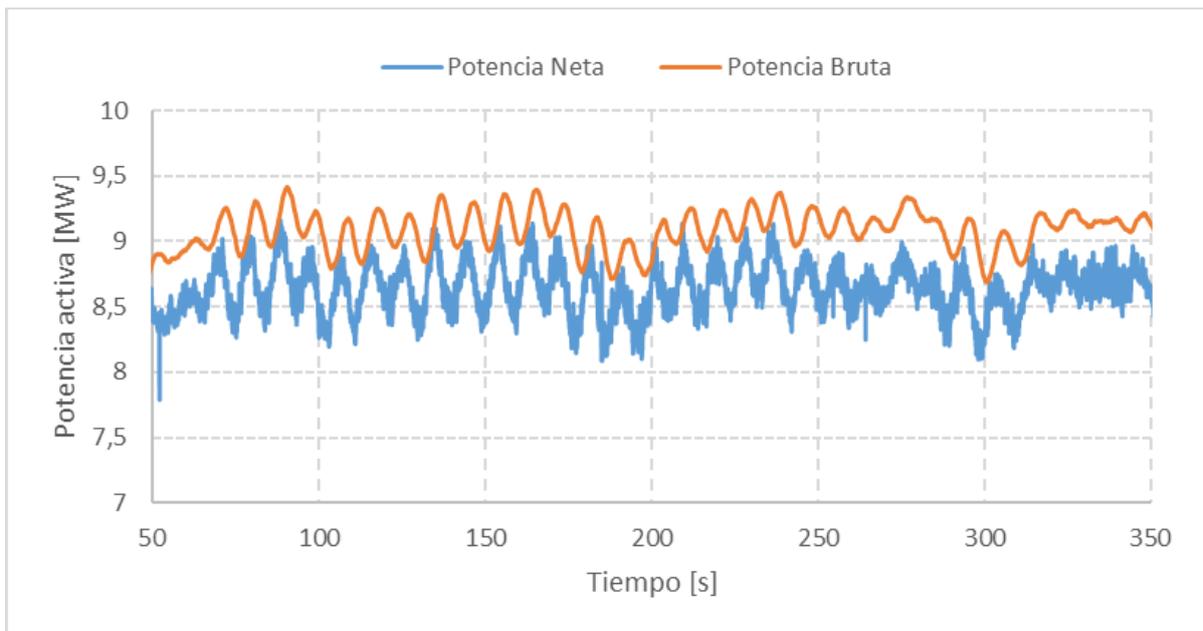


Gráfico 11. Potencia bruta y potencia neta durante la prueba de mínimo técnico.

De lo anterior la potencia Bruta se obtiene como un promedio de la medición de P_{bruta} del Gráfico 11, resultando el siguiente valor:

$$P_{bruta} = 9,08MW$$

6.1.3. Potencia de los servicios auxiliares

El consumo de servicios auxiliares total (SE Alena + Aerogeneradores) fue informado en un valor de 100 kW.

$$P_{SSAA} = 100 kW$$

6.1.4. Potencia de pérdidas de la central

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

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

$$P_{perd\ central} = 9,08\ MW - 8,64\ MW - 0,1\ MW$$

$$P_{perd\ central} = 340\ kW$$

Este valor debe ser desagregado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en el transformador principal (P_{trafo}).
- Pérdidas en la red colectora de MT ($P_{colector}$).

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 Alena. Para el estado de mínimo técnico se tiene:

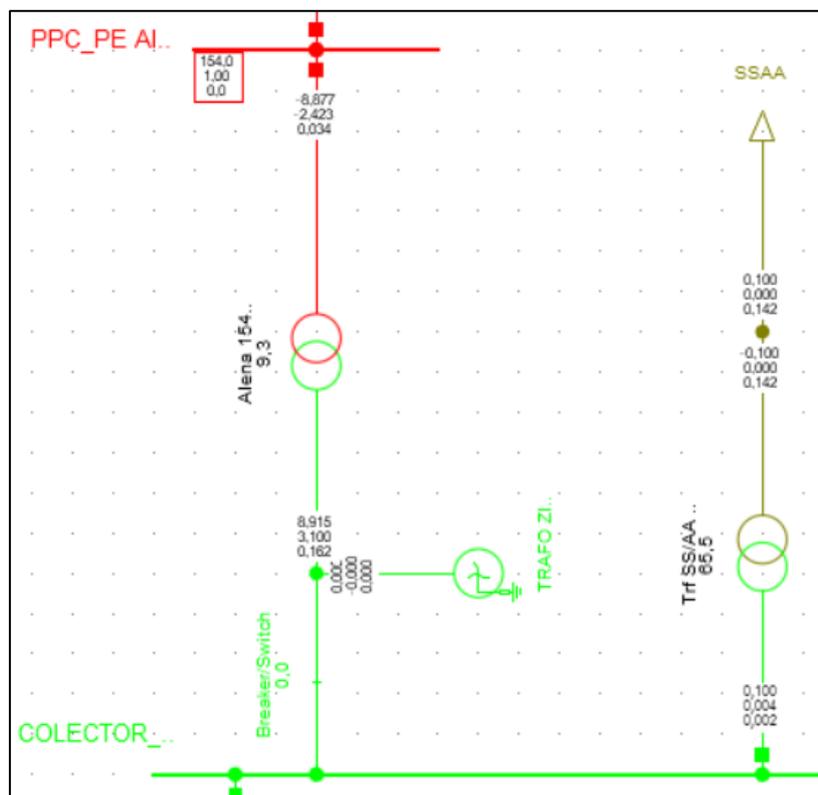


Gráfico 12. Cálculo de flujo de potencia en el transformador de potencia de la SE Alena.

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

$$P_{trafo} = 8,915 \text{ MW} - 8,877 \text{ MW} = 38 \text{ kW}$$

Los datos del modelo del transformador se muestran a continuación:

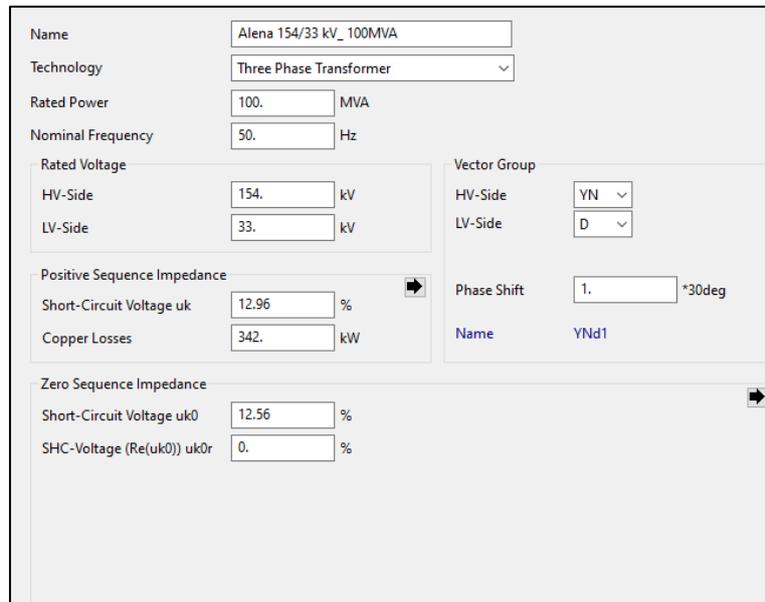


Gráfico 13. Modelo PowerFactory del transformador de potencia de la SE Alena.

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

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

$$P_{colector} = 340 \text{ kW} - 38 \text{ kW}$$

$$P_{colector} = 302 \text{ kW}$$

6.1.5. Resultados

En la siguiente tabla se resumen las pérdidas y consumo propios del PE Alena en la condición de parque completo:

Tabla 2. Pérdidas y consumos propios del PE Alena para parque completo.

Parámetro	Valor
Pérdidas en el transformador de potencia de la SE Alena	38 kW
Pérdidas en el circuito colector (Sist colector + Tr de los aerogeneradores)	302 kW
Consumos de SSAA	100 kW
Potencia de pérdidas de la central	340 kW

Finalmente, los resultados de mínimo técnico a nivel planta se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Mínimo técnico de planta.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
PE Alena	9,08	100	340	8,64

6.2. Mínimo técnico con un aerogenerador operativo

Se procedió a despachar el aerogenerador más lejano (T36), con el resto de los aerogeneradores en pausa, en un valor tal que la potencia inyectada en la barra de AT de la SE Alena (P_{neta}) sea igual a 0 MW. En el siguiente gráfico se muestra el resultado obtenido:

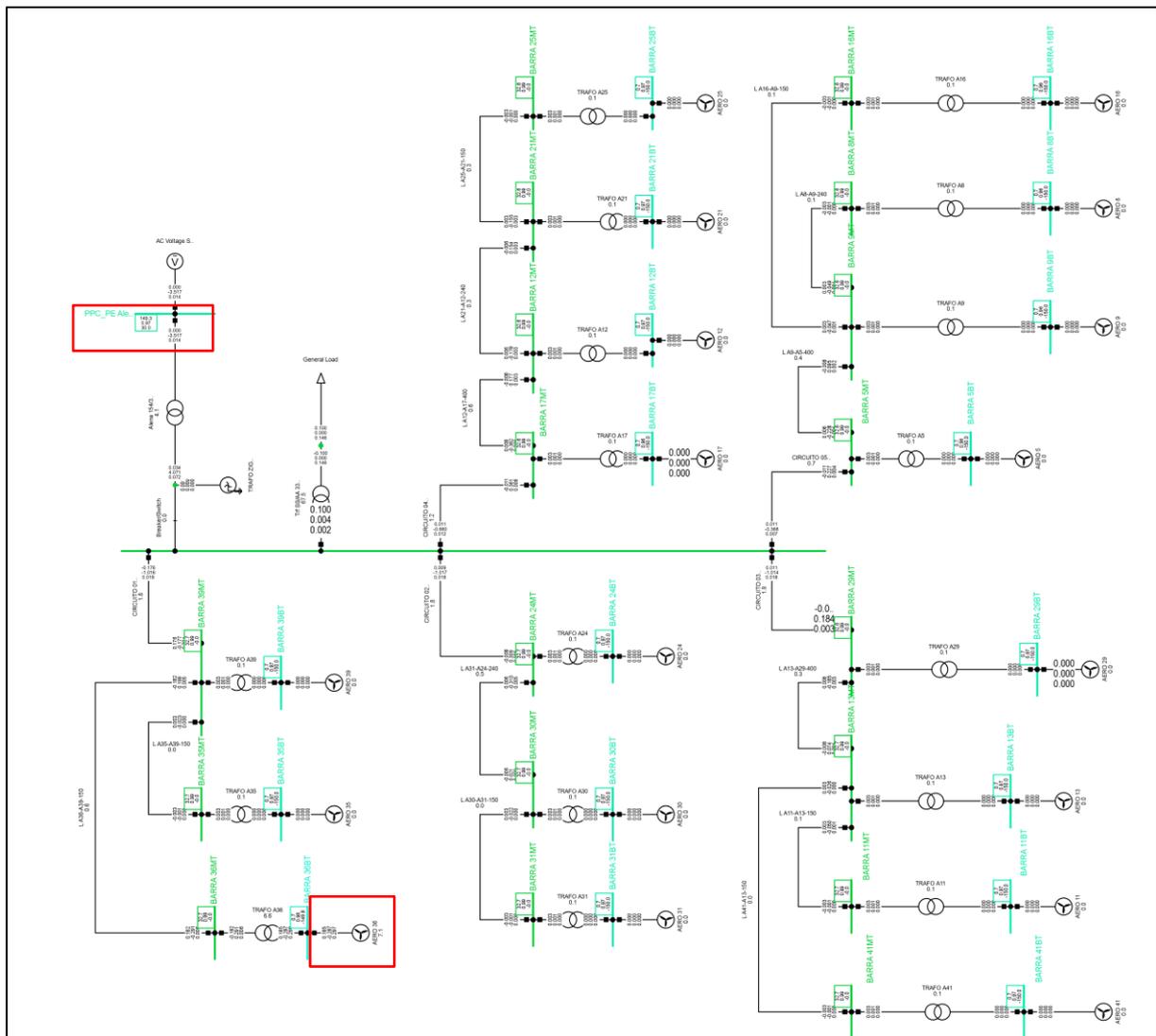


Gráfico 14. Resultado del cálculo de flujo de potencia para el mínimo técnico en T36.

6.2.1. Potencia Neta

La potencia neta para este escenario operativo es de 0 MW.

$$P_{neta} = 0 \text{ MW.}$$

6.2.2. Potencia Bruta

La potencia bruta en T36 para una Pneta de 0 MW se muestra a continuación:

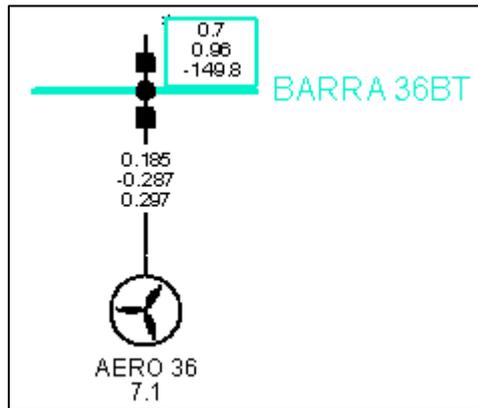


Gráfico 15. Potencia mínima bruta en T36.

De lo anterior:

$$P_{bruta} = 185 \text{ kW}$$

6.2.3. Potencia de los servicios auxiliares

El consumo de servicios auxiliares total (SE Alena + Aerogeneradores) fue informado en un valor de 100 kW.

$$P_{SSAA} = 100 \text{ kW}$$

6.2.4. Potencia de pérdidas de la central

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

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

$$P_{perd \text{ central}} = 185 \text{ kW} - 0 \text{ kW} - 100 \text{ kW}$$

$$P_{perd \text{ central}} = 85 \text{ kW}$$

Este valor debe ser desagregado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en el transformador principal (P_{trafo}).

- Pérdidas en la red colectora de MT (*P_{colector}*).

Considerando el resultado obtenido en el Gráfico 14, las pérdidas en el transformador de potencia se obtienen del flujo de potencia en el transformador de la SE como se muestra en el siguiente gráfico:

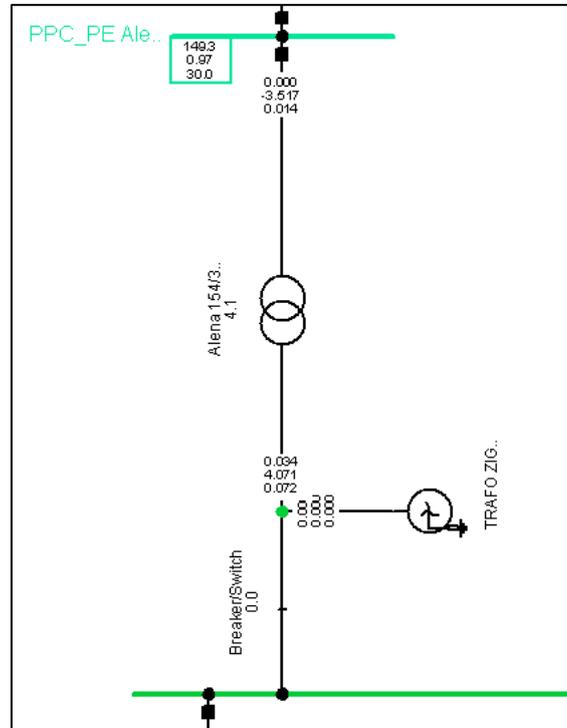


Gráfico 16. Flujo de potencia en el transformador de la subestación para mínimo técnico en T36.

$$P_{trafo} = 0,034 \text{ MW} - 0 \text{ MW} = 34 \text{ kW}$$

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

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

$$P_{colector} = 85 \text{ kW} - 34 \text{ kW}$$

$$\mathbf{P_{colector} = 51 \text{ kW}}$$

6.2.5. Resultados

En la siguiente tabla se resumen las pérdidas y consumo propios del PE Alena para la condición de mínimo técnico en un aerogenerador:

Tabla 4. Pérdidas y consumos propios del PE Alena para un aerogenerador operativo.

Parámetro	Valor
Pérdidas en el transformador de potencia de la SE Alena	34 kW
Pérdidas en el circuito colector (Sist colector + Tr de los aerogeneradores)	51 kW

Consumos de SSAA	100 kW
Potencia de pérdidas de la central	85 kW

Finalmente, los resultados de mínimo técnico para un aerogenerador operativo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Mínimo técnico para un aerogenerador operativo.

Parque Eólico	Potencia Bruta [kW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [kW]
PE Alena	185	100	85	0

7. CONCLUSIONES

Dada la mínima consigna operable del parque eólico de 8,64 MW (potencia mínima neta) en el punto de conexión (Barra de 154 kV de la SE ALENA), y considerando una pérdida promedio de 442,2 kW en ese estado de carga, se determinó una **potencia mínima bruta de 9,082 MW** para el total de los aerogeneradores del Parque Eólico Alena operativos.

Considerando una potencia neta en el punto de conexión de 0 MW y un aerogenerador operativo (T36), se determinó una potencia mínima bruta **de 185 kW**.

Los resultados se resumen a continuación:

Tabla 6. Mínimo técnico – Planta completa – PE Alena.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
PE Alena	9,08	100	340	8,64

Tabla 7. Mínimo técnico – T36 – Pe Alena.

Parque Eólico	Potencia Bruta [kW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [kW]
PE Alena	185	100	85	0