

Empresa: GES

País: Chile

Proyecto: Parque Eólico Calama

Descripción: Informe de Potencia Máxima

Código de Proyecto: EE-2019-259

Código de Informe: EE-EN-2021-1670

Revisión: B



30 de septiembre de 2021



Este documento EE-EN-2021-1670-RB fue preparado para GES por Estudios Eléctricos. Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

Ing. Claudio Celman
Coordinador Dpto. Ensayos
claudio.celman@estudios-electricos.com

Ing. Andrés Capalbo
Coordinador Dpto. Ensayos
andres.capalbo@estudios-electricos.com

Ing. Pablo Rifrani
Gerente Dpto. Ensayos
pablo.rifrani@estudios-electricos.com

www.estudios-electricos.com

Este documento contiene 28 páginas y ha sido guardado por última vez el 06/10/2021 por César Colignon, sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Rev	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	30/09/2021	Para presentar.	CiC	AC	PR
B	06/10/2021	Correcciones según observaciones de ENGIE.	CiC	AC	PR

Todas las firmas digitales pueden ser validadas y autenticadas a través de la web de Estudios Eléctricos; <http://www.estudios-electricos.com/certificados>.



Índice

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Medidores utilizados	4
1.2	Nomenclatura y observaciones generales	5
2	ASPECTOS NORMATIVOS	7
3	DESCRIPCIÓN DEL PARQUE	8
3.1	Unifilar de planta.....	8
3.2	Datos de los aerogeneradores	15
3.3	Datos de los transformadores de bloque.....	17
3.4	Datos del transformador de poder	18
4	DETERMINACIÓN DE POTENCIA MÁXIMA	19
4.1	Ensayo de Potencia Máxima	20
4.2	Cálculos y resultados.....	22
4.2.1	Potencia Bruta	22
4.2.2	Potencia de Servicios Auxiliares	22
4.2.3	Potencia Neta medida	23
4.2.4	Potencia de Pérdidas en la central	23
4.2.5	Resultados	25
5	CONCLUSIONES	26
6	ANEXOS	27



1 INTRODUCCIÓN

El presente Informe Técnico documenta el procedimiento y los resultados obtenidos al determinar la Potencia Máxima del Parque Eólico Calama de acuerdo con lo establecido en el “Anexo Técnico: Pruebas de Potencia Máxima en Unidades Generadores”, cuyos aspectos más relevantes se destacan en la Sección 2.

El Parque Eólico Calama se ubica en la región de Antofagasta, emplazado al sureste de la ciudad de Calama, y tiene una potencia instalada de 162.0 MW. El parque se vincula al SEN mediante una derivación de la línea 1x220 Calama – Lasana y la potencia declarada del parque es de 150.0 MW en el POI.

1.1 Medidores utilizados

Todas las mediciones han sido realizadas mediante el SCADA de la central el cual cuenta con una tasa de muestreo de 1 segundo y medidas de todos los aerogeneradores adquiridas con una tasa de muestreo de 2 segundos.



1.2 Nomenclatura y observaciones generales

La Figura 1.1, muestra un sistema equivalente de conexión de un parque eólico, el cual nos permite identificar y definir los siguientes elementos:

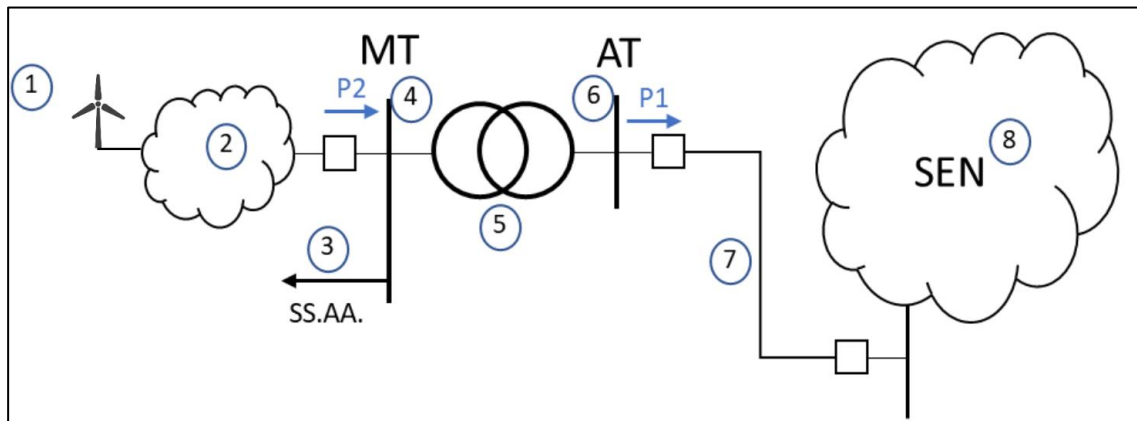


Figura 1.1 – Sistema equivalente parque eólico

- 1) **Generador equivalente:** Corresponde a la suma de los aportes distribuidos de potencia activa alterna de cada aerogenerador del parque eólico.
- 2) **Pérdidas en sistema colector del parque (Pcolector):** Corresponde a las pérdidas del sistema colector del parque eólico, principalmente en cables de baja y media tensión, y en los transformadores colectores que elevan de baja a media tensión.
- 3) **Servicios Auxiliares de la central (SS.AA.).**
- 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).**



A A partir de las definiciones anteriores, el presente informe considera la siguiente nomenclatura:

- ✓ **P1:** Potencia activa inyectada en la barra de alta tensión (AT) del parque [MW]. Este valor corresponde a la **Potencia Neta (Pneta)** del parque.
- ✓ **P2:** Potencia activa inyectada en la barra de media tensión (MT) del parque [MW].
- ✓ **Pbruta:** Suma de los aportes distribuidos de potencia activa inyectada por los aerogeneradores a nivel de baja tensión (BT) del parque [MW] (ver número “1” en Figura 1.1).
- ✓ **Pperd:** Pérdidas de potencia activa en línea de transmisión [kW] (ver número “7” en Figura 1.1).
- ✓ **Ptrafo:** Pérdidas activas en el transformador de poder del parque [kW].
- ✓ **Pssaa:** Potencia de Servicios Auxiliares del parque [kW].
- ✓ **Pcolector:** Pérdidas en el sistema colector del parque [kW] (ver número “2” en Figura 1.1).



2 ASPECTOS NORMATIVOS

El “**Anexo Técnico: Pruebas de Potencia Máxima en Unidades Generadoras**” establece las metodologías y procesos para efectuar los ensayos de verificación del máximo valor de potencia activa bruta que puede sostener un sistema de generación.

El **Artículo 39** es el que corresponde considerar para el caso en cuestión debido a que se trata de una central cuya fuente es renovable no convencional sin capacidad de regulación (no hay almacenamiento de energía). Éste establece que el valor de Potencia Máxima deberá ser obtenido 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

El Parque Eólico Calama está constituido por 36 aerogeneradores SIEMENS GAMESA modelo CR45-6P de 4.5 MVA de potencia aparente nominal y 690 V de tensión de operación nominal. Al momento de realizar las pruebas, se encontraban operativos 35 aerogeneradores y considerando estos equipos se totalizan 162.0 MW de potencia instalada.

Cada aerogenerador cuenta con un transformador de bloque de 5.5 MVA (AF) y relación 0.69 kV / (33 kV \pm 2 x 2.5%), que interconecta la salida de cada aerogenerador con la red de MT.

La red colectora del Parque Eólico Calama cuenta con 9 alimentadores en 33 kV que se conectan a la barra principal de 33 kV de la S/E PE Calama. Luego, un transformador de poder de relación 33 kV / (220 kV \pm 11 x 1.25%) de 106/146/175 MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2) de potencia aparente nominal permite la inyección de potencia generada al Sistema Eléctrica Nacional. El valor de potencia activa neta declarado en el POI es de 150.0 MW.

3.1 Unifilar de planta

La red interna de media tensión (MT) del parque se encuentra compuesta por 9 alimentadores en MT, donde cada uno exporta la energía proveniente de 4 aerogeneradores. Adicionalmente, la red interna tiene 2 alimentadores con bancos de capacitores de 10 MVar de capacidad cada uno.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama unilineal de la S/E Elevadora PE Calama. En tanto en las Figura 3.2 a Figura 3.10, se presenta el detalle de cada alimentador de 33 kV.

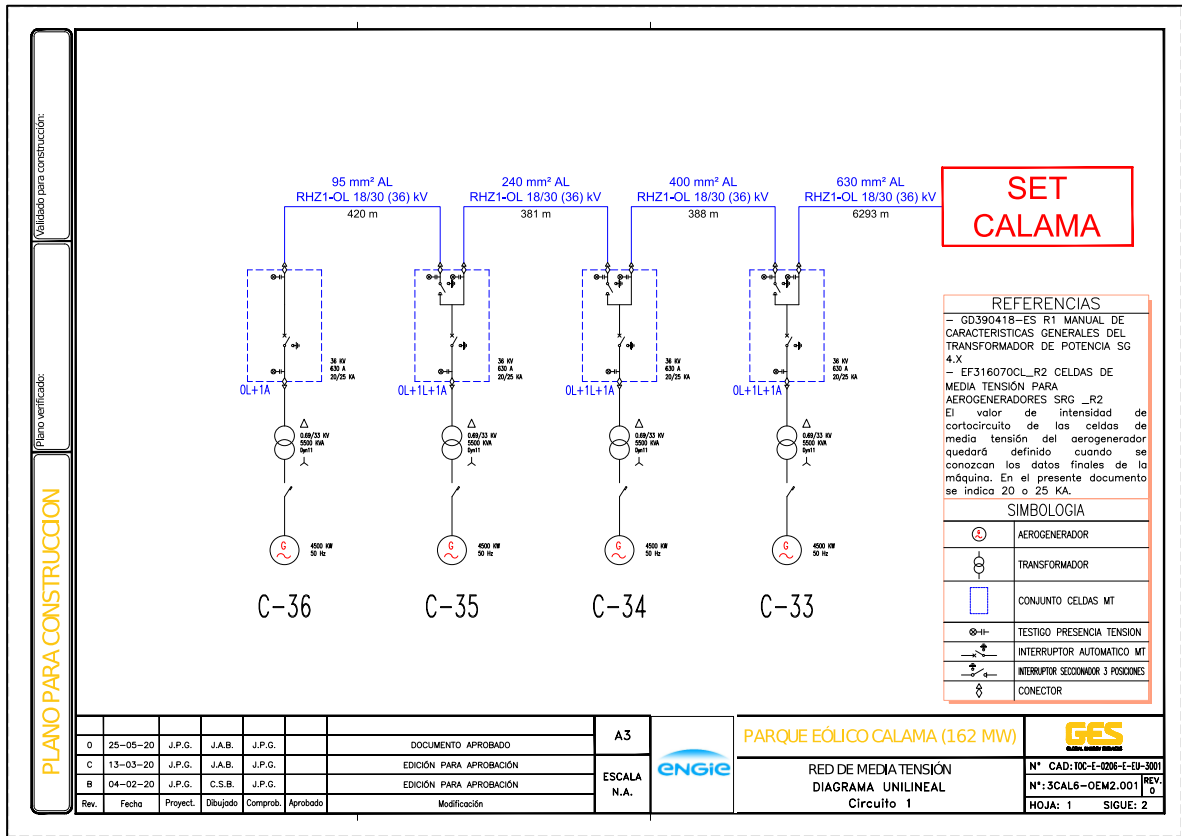


Figura 3.2 - Diagrama unilineal circuito colector 1

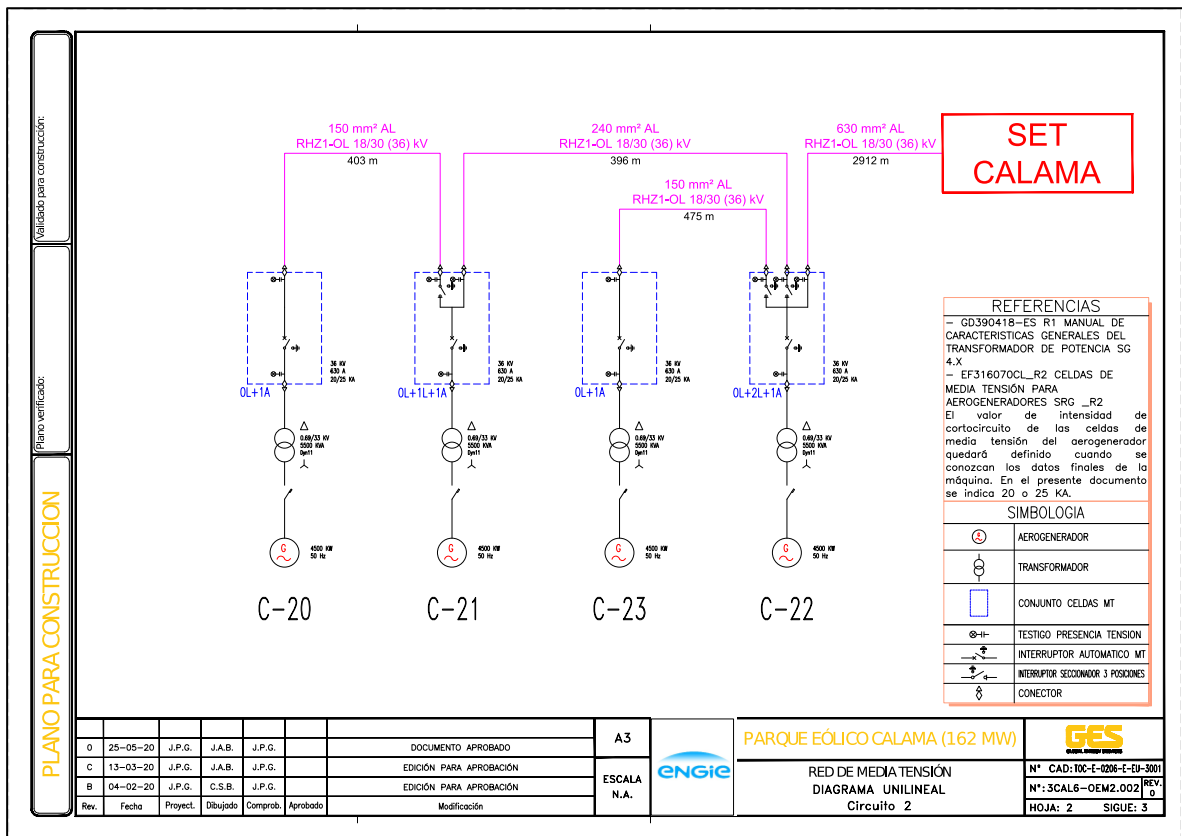


Figura 3.3 - Diagrama unilineal circuito colector 2

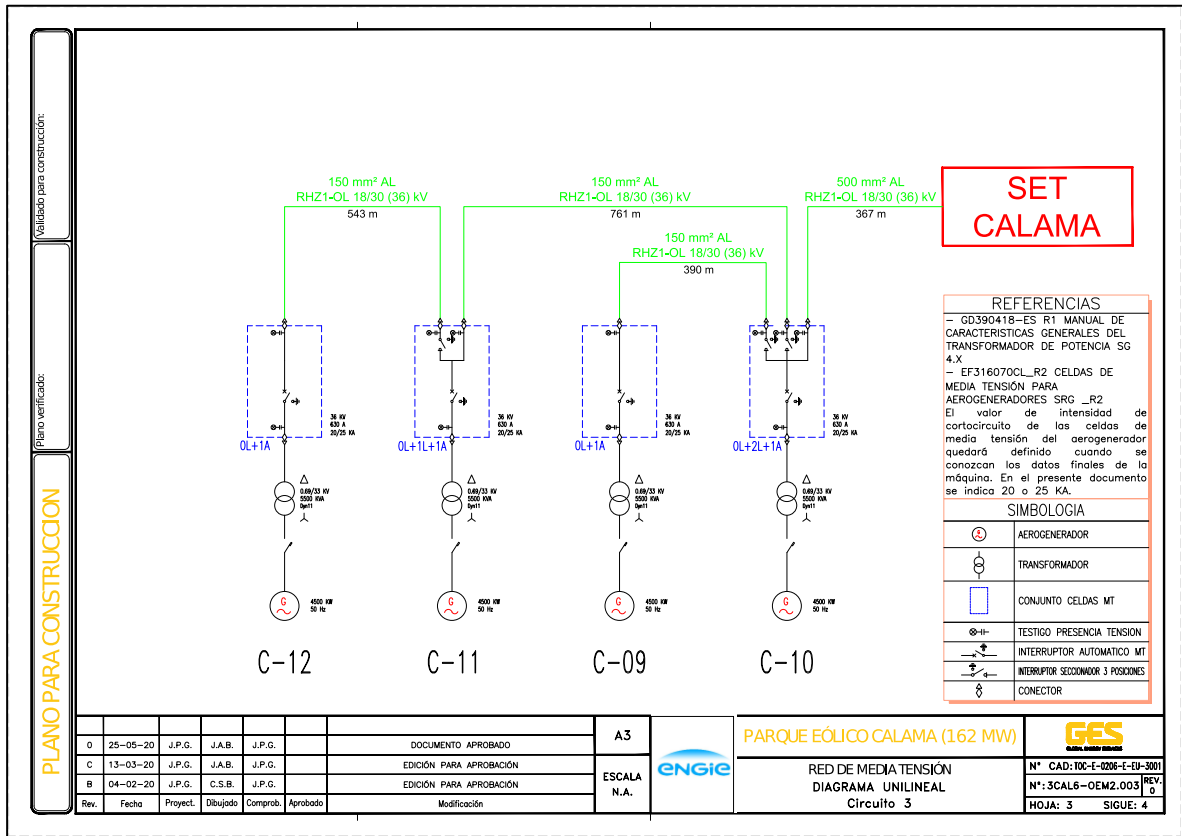


Figura 3.4 - Diagrama unilineal circuito colector 3

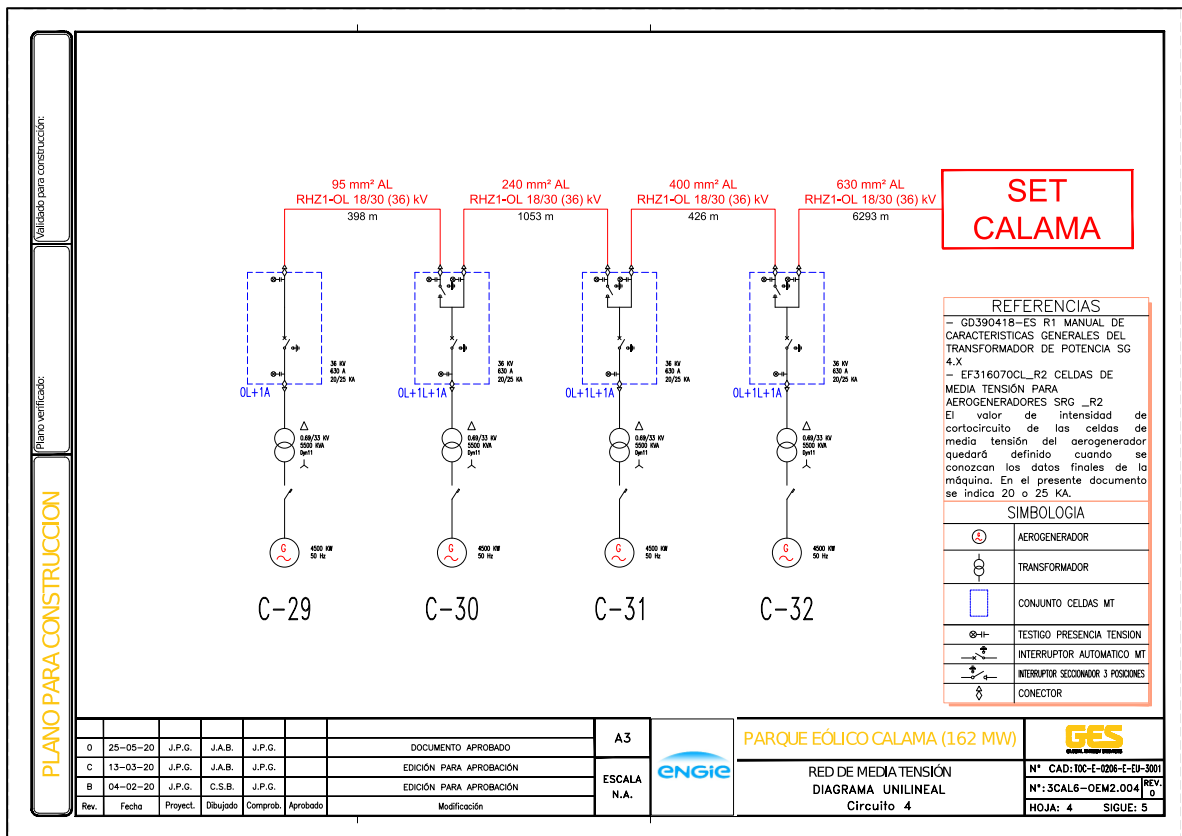


Figura 3.5 - Diagrama unilineal circuito colector 4

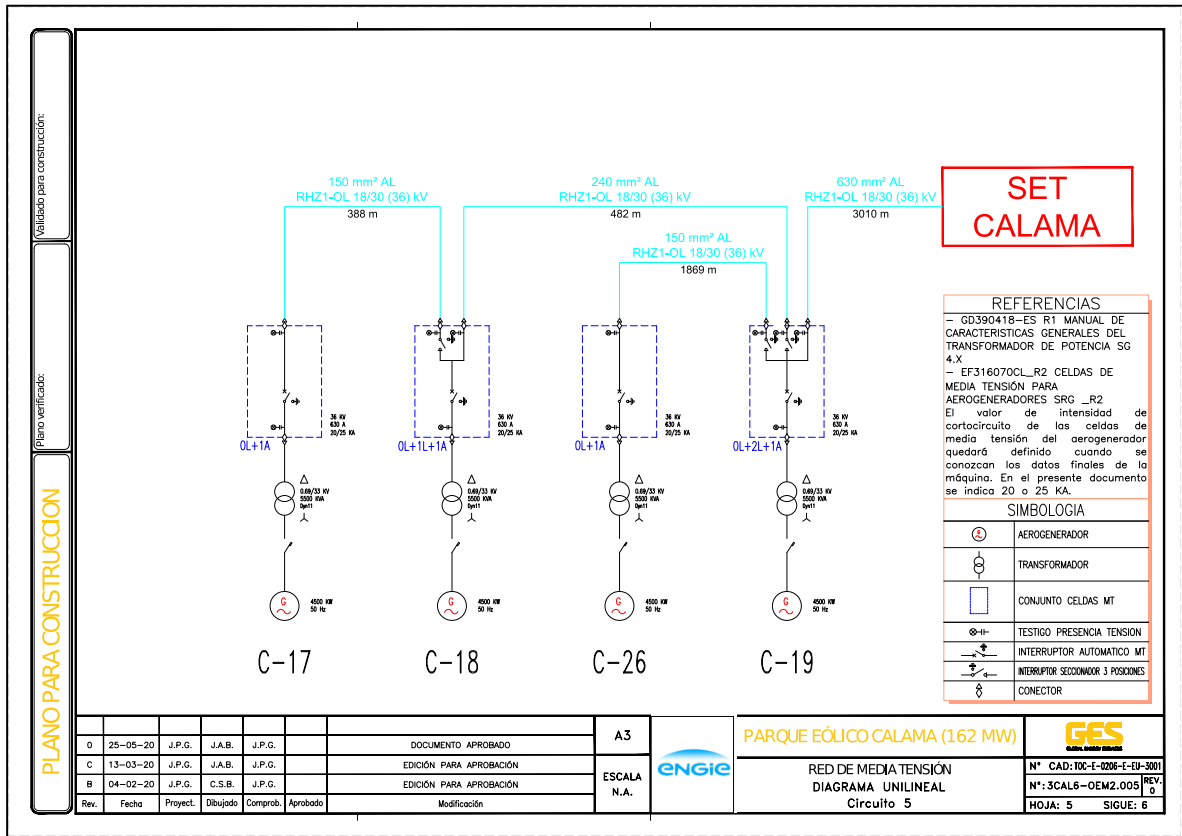


Figura 3.6 - Diagrama unilineal circuito colector 5

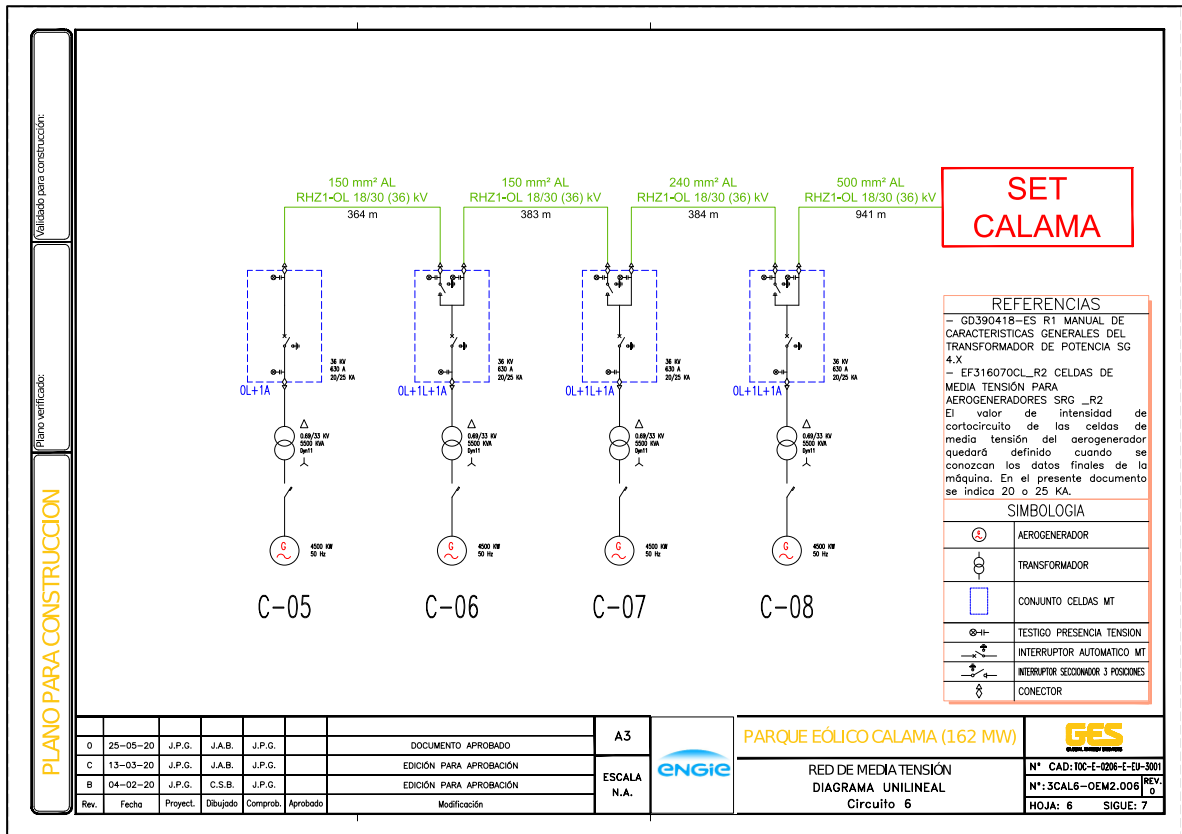


Figura 3.7 - Diagrama unilineal circuito colector 6

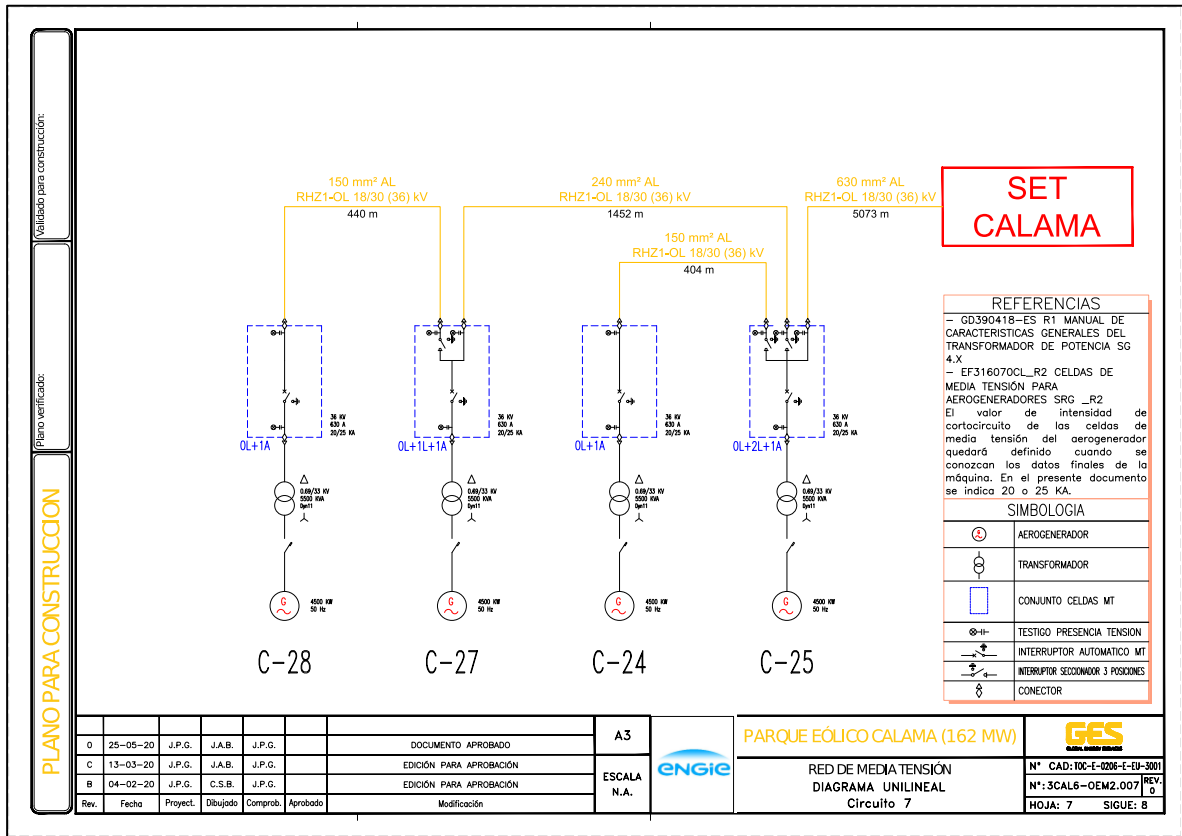


Figura 3.8 - Diagrama unilineal circuito colector 7

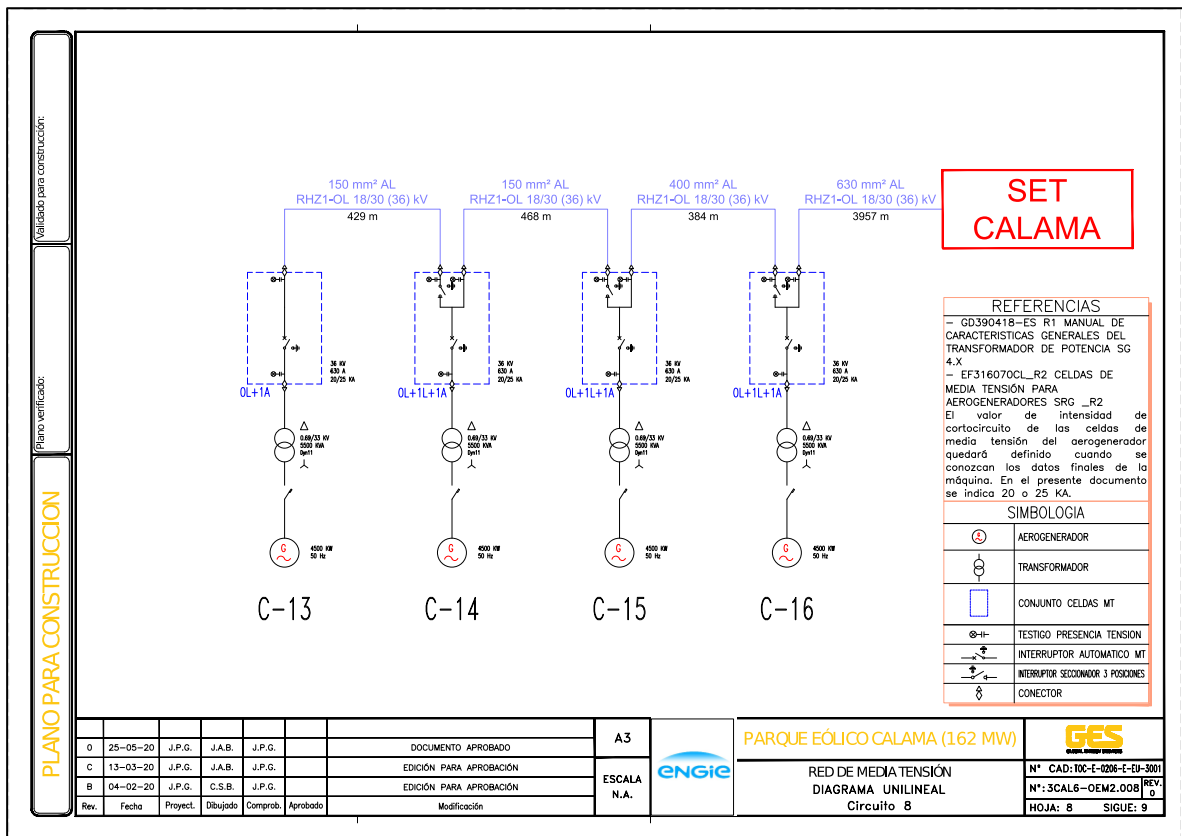


Figura 3.9 - Diagrama unilineal circuito colector 8

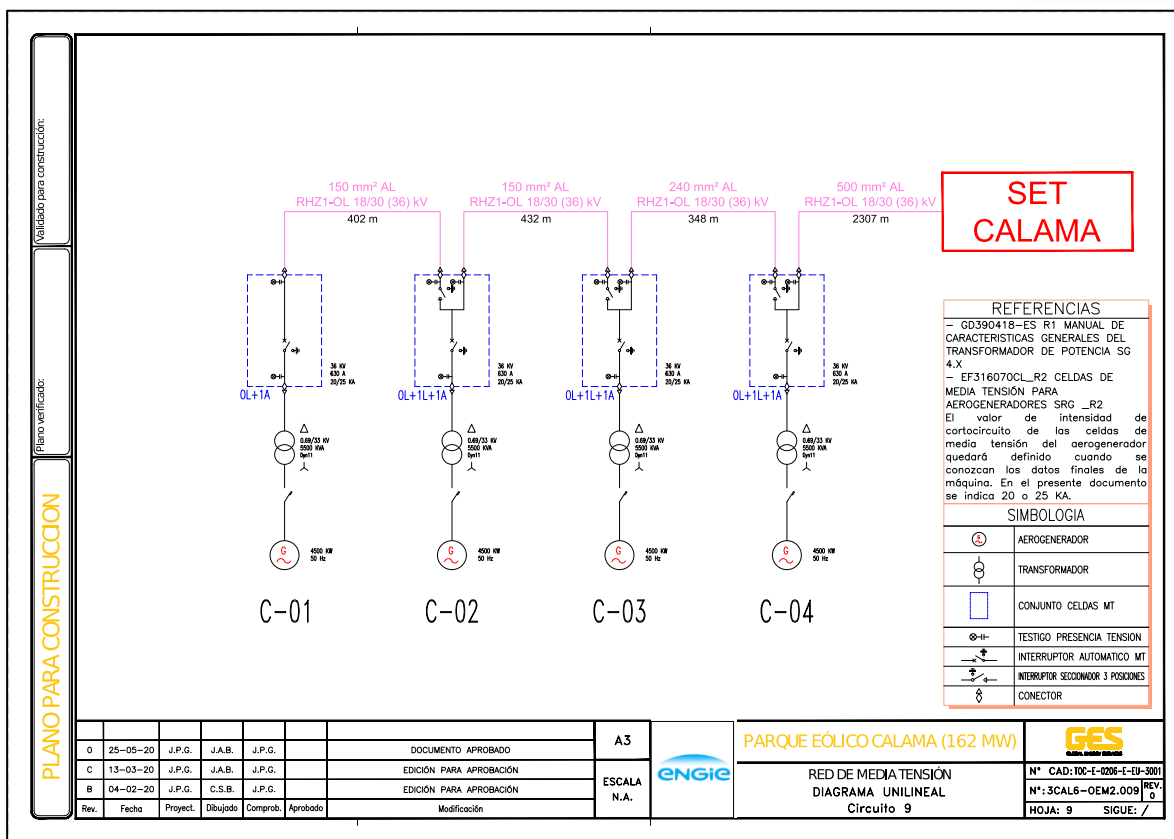


Figura 3.10 – Diagrama unilineal circuito colector 9



3.2 Datos de los aerogeneradores

El Parque Eólico Calama está constituido por 36 aerogeneradores SIEMENS GAMESA modelo CR45-6P de 4.5 MW de potencia aparente nominal y 690 V de tensión de operación nominal. Los parámetros nominales se presenta en la Figura 3.11.

Potencia nominal	4,5 MW
Frecuencia	50Hz / 60Hz
Diámetro del rotor	145 m
Ángulo de la punta de la pala	Regulación del control del paso
Referencia de la densidad del aire	1,225 kg/m ³

Figura 3.11 – Datos nominales de aerogeneradores

La curva de capacidad de los aerogeneradores se presenta en la Figura 3.12.

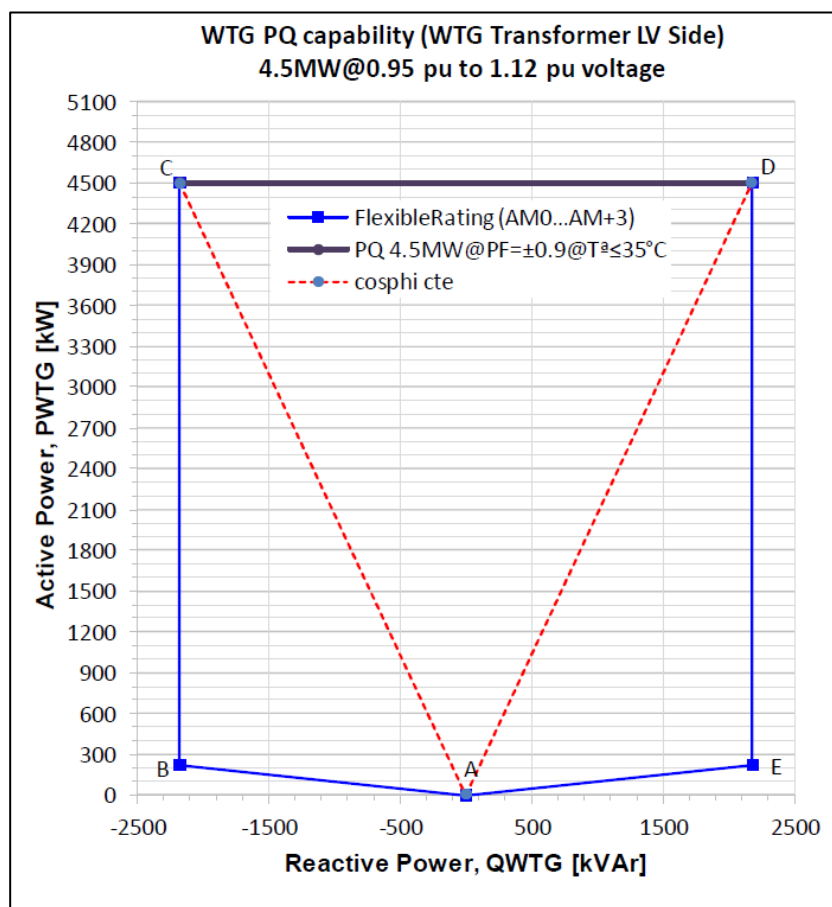


Figura 3.12 – Curva de capacidad del aerogenerador



Finalmente se presenta en la Figura 3.13 la curva de potencia según viento del aerogenerador.

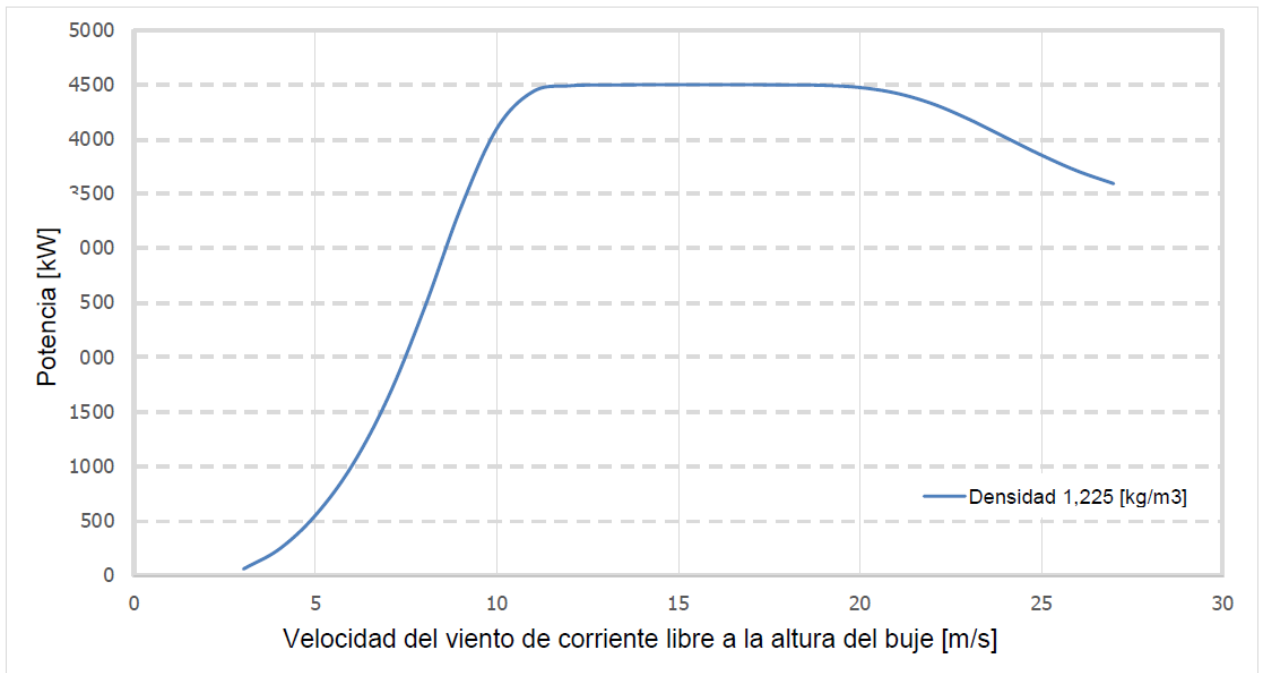


Figura 3.13 – Curva Viento/potencia para los grupos de aerogeneradores



3.3 Datos de los transformadores de bloque

Cada aerogenerador se vincula a la red colectora de 33 kV mediante un transformador de 5.5 MVA de capacidad nominal, y de relación de transformación de 0.69/33 kV.

Los datos característicos de los transformadores de bloque se muestran en la Tabla 3.1.

Parámetro	Valor
Potencia Nominal	5.5 MVA
Refrigeración	AF
Tensión nominal lado HV	33 kV
Tensión nominal lado LV	0.69 kV
Grupo de conexión	Dyn11
Impedancia (HV-LV1 y HV-LV2)	8.89 %
Pérdidas en carga	38.77 kW
Pérdidas en vacío	7.8 kW
Posiciones de TAP	$\pm 2 \times 2.5 \%$

Tabla 3.1 – Datos de los transformadores de bloque



3.4 Datos del transformador de poder

El Parque Eólico Calama cuenta con un transformador de poder, de potencia nominal 106/146/175 MVA según método de enfriamiento ONAN/ONAF1/ONAF2. Este transformador cuenta con un devanado de baja tensión de 33kV y un arrollamiento de alta tensión de 220kV. Este equipo posee cambiador de tomas bajo carga.

Los datos característicos del transformador principal se muestran en la Tabla 3.2.

Parámetro	Valor
Potencia Nominal	106/146/175 MVA
Refrigeración	ONAN/ONAF1/ONAF2
Tensión nominal lado HV	220.0 kV
Tensión nominal lado LV	33.0 kV
Grupo de conexión	YNd1
Impedancia	19.88 %
Pérdidas en carga	555.61 kW
Pérdidas en vacío	57.75 kW
Posiciones de TAP	$\pm 11 \times 1.25$ %

Tabla 3.2 - Datos del transformador principal



4 DETERMINACIÓN DE POTENCIA MÁXIMA

La Potencia Máxima corresponde al máximo valor de potencia activa bruta que puede sostener un sistema de generación y deberá ser obtenido a partir de registros de operación y mediciones de los recursos naturales que inciden en la operación de estas tecnologías.

Para el caso del Parque Eólico Calama se cuenta con mediciones de la Potencia Bruta proveniente de los aerogeneradores, de la Potencia Neta registrada en el POI, de los consumos de SSAA tanto a nivel aerogenerador y mediciones de velocidad del viento.

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.

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

Tabla 4.1 – Tabla resumen de valores a presentar

- (1) **Potencia Bruta del Parque:** Corresponde a la suma de los aportes distribuidos de potencia activa alterna de cada aerogenerador del parque Parque Eólico Calama.
- (2) **Potencia de SS.AA.:** Corresponde a la suma de los consumos propios promedio de cada aerogenerador estimados en kW x Cantidad de aerogenerador (considerando todos los aerogeneradores en servicio), más los SS.AA. de la central
- (3) **Pérdidas en la central:** Corresponde a la suma de las pérdidas en el transformador de poder de la central (kW) y de las pérdidas en el sistema colector de media tensión (circuitos colectores y transformadores de bloque).
- (4) **Potencia Neta del parque:** Potencia inyectada en 220 kV en paño JT1 de la S/E Elevadora PE Calama.



4.1 Ensayo de Potencia Máxima

El día 14 de septiembre de 2021 se realizó el ensayo de Potencia Máxima registrando la evolución de las principales variables durante el día completo y con 35 aerogeneradores en servicio.

Se presentan a continuación los registros correspondientes.

En la Figura 4.1 se muestra la potencia bruta sumada de todos los aerogeneradores, la potencia neta en el punto de interconexión y la velocidad del viento para el día completo. Los valores de máxima potencia se logran desde las 15:30hs cuando el viento alcanza los 14.0 m/s necesarios para que los aerogeneradores alcancen aproximadamente su potencia máxima individual según se observa en Figura 3.13.

En la Figura 4.2 se muestra el registro de las variables eléctricas (potencias bruta, neta, sumatoria de SSAA de aerogeneradores y transformador de SSAA) para un período seleccionado de una hora entre las 15:30 y 16:30 hs. Además, se marca el valor medio obtenido en el mismo período para cada variable.

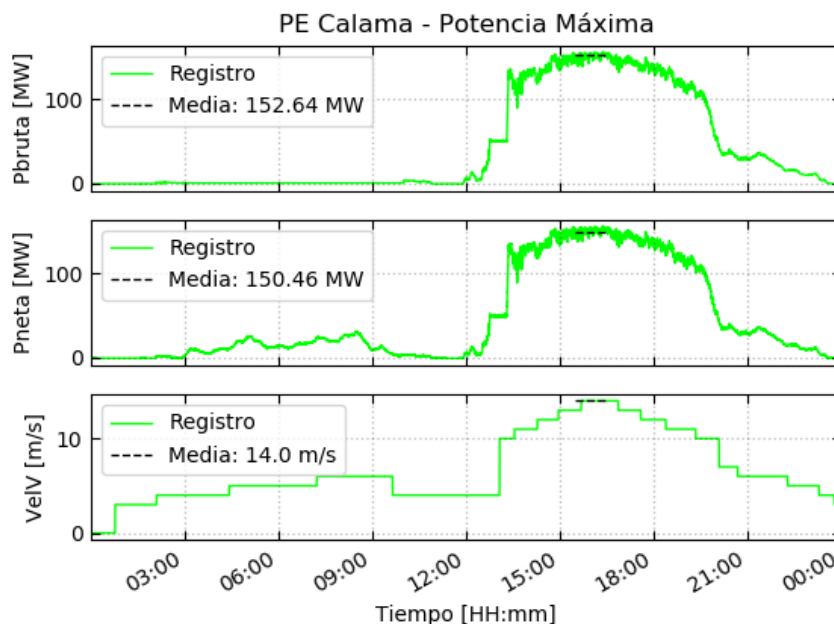


Figura 4.1 – Día completo – Principales variables

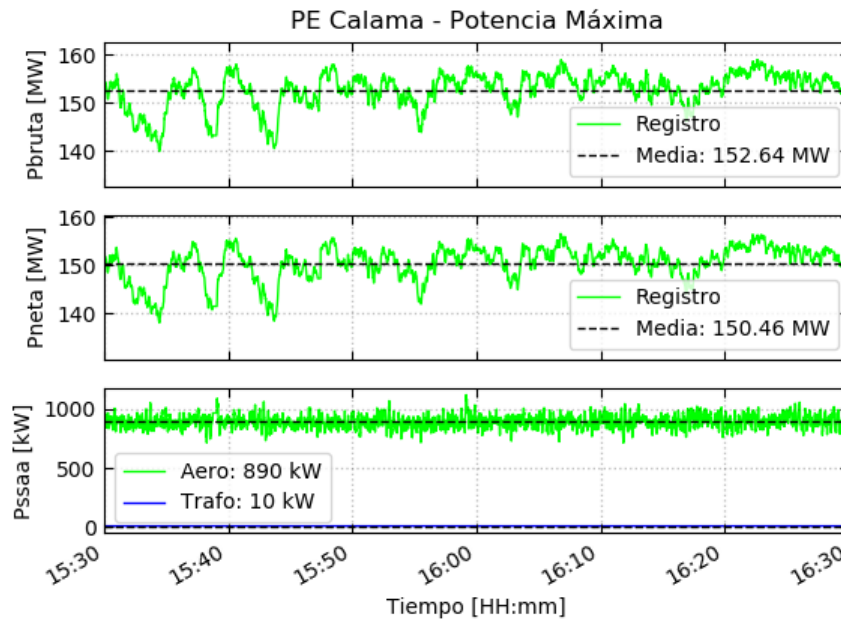


Figura 4.2 – Detalle – Variables eléctricas

Finalmente, en la Figura 4.3 se muestra la potencia individual de cada aerogenerador (en verde), la potencia promedio considerando los 35 aerogeneradores en servicio (azul) y al valor medio para el período de tiempo antes indicado. Se observa además que cada aerogenerador alcanza (y supera) su potencia nominal en algún instante del período mostrado.

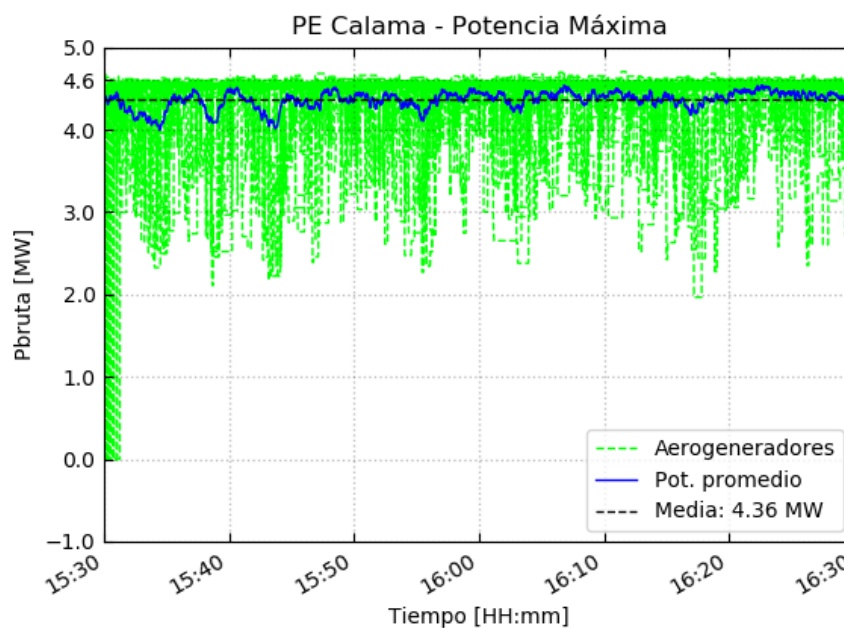


Figura 4.3 – Detalle – Potencia individual



4.2 Cálculos y resultados

En la presente sección se realizará el cálculo de los valores de potencia según se desglosan en la Tabla 4.1. Para el desarrollo de los cálculos se han considerado las mediciones realizadas y presentadas en las Figura 4.1 y Figura 4.2.

4.2.1 Potencia Bruta

La potencia bruta máxima del Parque Eólico Calama se calculó a partir de la medida de potencia bruta de cada aerogenerador. Se realizó la sumatoria de las potencias individuales para obtener la potencia bruta equivalente del parque:

$$P_{bruta} = \sum P_{WTG_i}$$

Dónde se consideraron las potencias de los aerogeneradores en servicio durante la prueba. En base a lo presentado en la Figura 4.2 se presenta el valor medio de la potencia bruta medida ($P_{bruta,med}$).

$$P_{bruta,med} = 152.64 \text{ MW}$$

4.2.2 Potencia de Servicios Auxiliares

La Potencia de Servicios Auxiliares corresponde a la suma de los consumos propios de cada aerogenerador, más los Servicios Auxiliares de la central.

En este caso, tanto los servicios auxiliares de cada aerogenerador como los de planta se encuentran medidos.

En forma análoga al caso de la potencia bruta, se realiza la sumatoria de la potencia de consumos propios de cada aerogenerador para obtener la potencia total en ese concepto y luego se calcula el valor medio en el período de pruebas.

En la Figura 4.2 se presenta el valor medio de los consumos propios de la totalidad de los aerogeneradores ($P_{SSAA,aero}$) y del transformador de servicios auxiliares de la planta ($P_{tr.SSAA}$).



$$P_{SSAA,aero} = \sum_i P_{SSAA_{WTG_i}} = 890.0 \text{ kW}$$

$$P_{tr,SSAA} = 10.0 \text{ kW}$$

En base a estos datos se procede a calcular la **Potencia de Servicios Auxiliares** (P_{SSAA}).

$$P_{SSAA} = P_{tr,SSAA} + P_{SSAA,aero} = 890.0 \text{ kW} + 10.0 \text{ kW} = 900.0 \text{ kW}$$

4.2.3 Potencia Neta medida

La **Potencia Neta** del Parque Eólico Calama se obtuvo a partir de la medida en el punto de interconexión y el cálculo del valor medio para el período de una hora seleccionado obteniéndose el siguiente resultado.

$$P_{neta,med} = 150.46 \text{ MW}$$

4.2.4 Potencia de Pérdidas en la central

La Potencia de Pérdidas en la central corresponde a la suma de las pérdidas en el transformador de poder de la central, en los transformadores de bloque y de las pérdidas en el sistema colector de media tensión.

En base a las mediciones realizadas durante el ensayo de Potencia Máxima, el cálculo de la Potencia de Pérdidas en la central se realiza considerando la diferencia entre la potencia medida en los aerogeneradores, la Potencia Neta Medida y el total de SSAA.

La expresión para el cálculo de **Potencia de Pérdidas en la central medida** ($P_{perd,central,med}$) se presenta a continuación.

$$P_{perd,central,med} = P_{bruta,med} - P_{SSAA} - P_{neta,med}$$

$$P_{perd,central,med} = 152.64 \text{ MW} - 900.0 \text{ kW} - 150.46 \text{ MW} = 1.28 \text{ MW}$$



El valor de **Potencia de Pérdidas en la central** debe ser desglosado en los siguientes elementos:

- Pérdidas en transformador principal ($P_{perd,tr_{ppal}}$)
- Pérdidas en red colectora de media tensión ($P_{perd,redMT}$)

En la Tabla 3.2 se presentan los valores de pérdida en vacío y carga del transformador principal, cabe mencionar que el valor de pérdidas en carga está referido a la condición de potencia nominal del equipo y deben ser determinadas en la condición de carga particular del ensayo. La expresión de pérdidas del transformador principal es la siguiente.

$$P_{perd,tr_{ppal}} = Pérdidas_{carga} + Pérdidas_{vacío}$$

Las pérdidas en carga en este escenario se consideran en el valor nominal presentado en la Tabla 3.2. Por lo tanto, las pérdidas en el transformador principal quedan dadas por la siguiente expresión.

$$P_{perd,tr_{ppal}} = 555.61 \text{ kW} + 57.75 \text{ kW} = 613.36 \text{ kW}$$

En tanto, el valor de pérdidas en la red colectora queda determinado por la siguiente ecuación.

$$P_{perd,redMT} = P_{perd,central} - P_{perd,tr_{ppal}}$$

$$P_{perd,redMT} = 1.28 \text{ kW} - 613.36 \text{ kW} = 666.64 \text{ kW}$$



4.2.5 Resultados

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

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
Calama	152.64	900.0	1280.0	150.46

Tabla 4.2 – Potencia Máxima – Parque Eólico Calama

Según se observa en la Tabla 4.2 la **Potencia Bruta Máxima** calculada está dentro de lo esperado en base a los antecedentes disponibles de los aerogeneradores.



5 CONCLUSIONES

Se demuestra que la máxima potencia bruta que puede entregar el Parque Eólico Calama en condiciones de recurso primario adecuadas es 152.69 MW, resultando en una potencia neta de 150.46 MW en el POI.

La Tabla 5.1 resume los resultados.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [MW]
Calama	152.64	900.0	1280.0 ¹	150.46

Tabla 5.1 – Potencia Máxima – Parque Eólico Calama

¹ Desglosado en 613.36 kW de pérdidas en el transformador principal y 666.64 kW de pérdidas en la red colectora de media tensión.



6 ANEXOS

Se entregan adjuntos los registros de ensayos.



Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.