



CL320201119.1 Rev. 0

19-11-2020

Informe Determinación de Mínimo
Técnico en Unidades Generadoras

Parque Eólico Cabo Leones III

Contenido

1	Introducción.....	3
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Alcance.....	3
2	Diseño e Información Técnica del Parque Eólico Cabo Leones III.....	4
2.2	Unifilar Subestación Parque Eólico.....	4
2.3	Unifilar red de Media Tensión.....	5
2.4	Servicios Auxiliares de la subestación.....	7
2.5	Transformador de Poder.....	8
2.6	Aerogenerador.....	8
2.6.1	Datos del Generador.....	11
2.6.2	Datos del Convertidor.....	12
2.6.3	Transformador de aerogenerador.....	12
2.6.4	Curva de potencia.....	13
2.6.5	Curva de Generación de Potencia Reactiva.....	14
2.6.1	Estados del aerogenerador.....	16
2.6.1	Control de Potencia Reactiva en Mínimo Técnico bajo presencia de recurso eólico. 17	
2.6.2	Control de Potencia Reactiva sin presencia de recurso eólico.....	17
3	Regulación de Potencia Activa y Reactiva del Parque Eólico Cabo Leones III.....	18
4	Determinación del Mínimo Técnico del Parque Eólico Cabo Leones III.....	20
4.2	Procedimiento de cálculo del Mínimo Técnico.....	22
4.3	Cálculo del Mínimo Técnico para el Parque Cabo Leones III.....	23
5	Justificaciones que describen fuentes de inestabilidad del Parque Eólico Cabo Leones III 24	
6	Conclusiones.....	25
7	Referencias.....	26

1 Introducción

El presente estudio esta realizado en función a lo indicado por el Coordinador Eléctrico Nacional y la normativa vigente para la entrada en operación del Parque Eólico Cabo Leones III al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

1.2 Objetivo

El presente documento tiene como propósito determinar el mínimo técnico del Parque Eólico Cabo Leones III y proporcionar la información técnica de los aerogeneradores SG-132 3.465/3.55 MW y de propio parque, en función de lo que establece el Anexo Técnico “Determinación de Mínimos Técnicos” y de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad del Servicio (NTSyCS) [1].

1.3 Alcance

La información y documentación proporcionada se limita únicamente a información técnica del Parque Eólico Cabo Leones I y el aerogenerador SG-132 3.465/3.55 de acuerdo con los apartados aplicables establecidos en el “Anexo Técnico Determinación de Mínimos Técnicos” [2] el cual solicita la siguiente información:

- a) *Antecedentes técnicos de diseño.*
- b) *Recomendaciones del fabricante y antecedentes nacionales o internacionales de unidades de similares características.*
- c) *Antecedentes de operación de la unidad generadora, incluyendo los registros y descripción de los análisis y pruebas efectuadas.*
- d) *Justificaciones que describan las eventuales fuentes de inestabilidad en la operación de la unidad generadora, que impidan que la unidad pueda operar en un valor menor de potencia activa.*
- e) *Antecedentes técnicos que respalden y expliquen el comportamiento esperado o desempeño registrado.*

Las restricciones operativas y consideraciones serán descritas y justificadas en los apartados correspondientes de este documento.

2 Diseño e Información Técnica del Parque Eólico Cabo Leones III

2.2 Unifilar Subestación Parque Eólico

A continuación, se presenta el unifilar de la subestación del Parque Eólico Cabo Leones III. En el mismo se pueden apreciar las protecciones a nivel de parque eólico y la potencia instalada por circuito. [4]

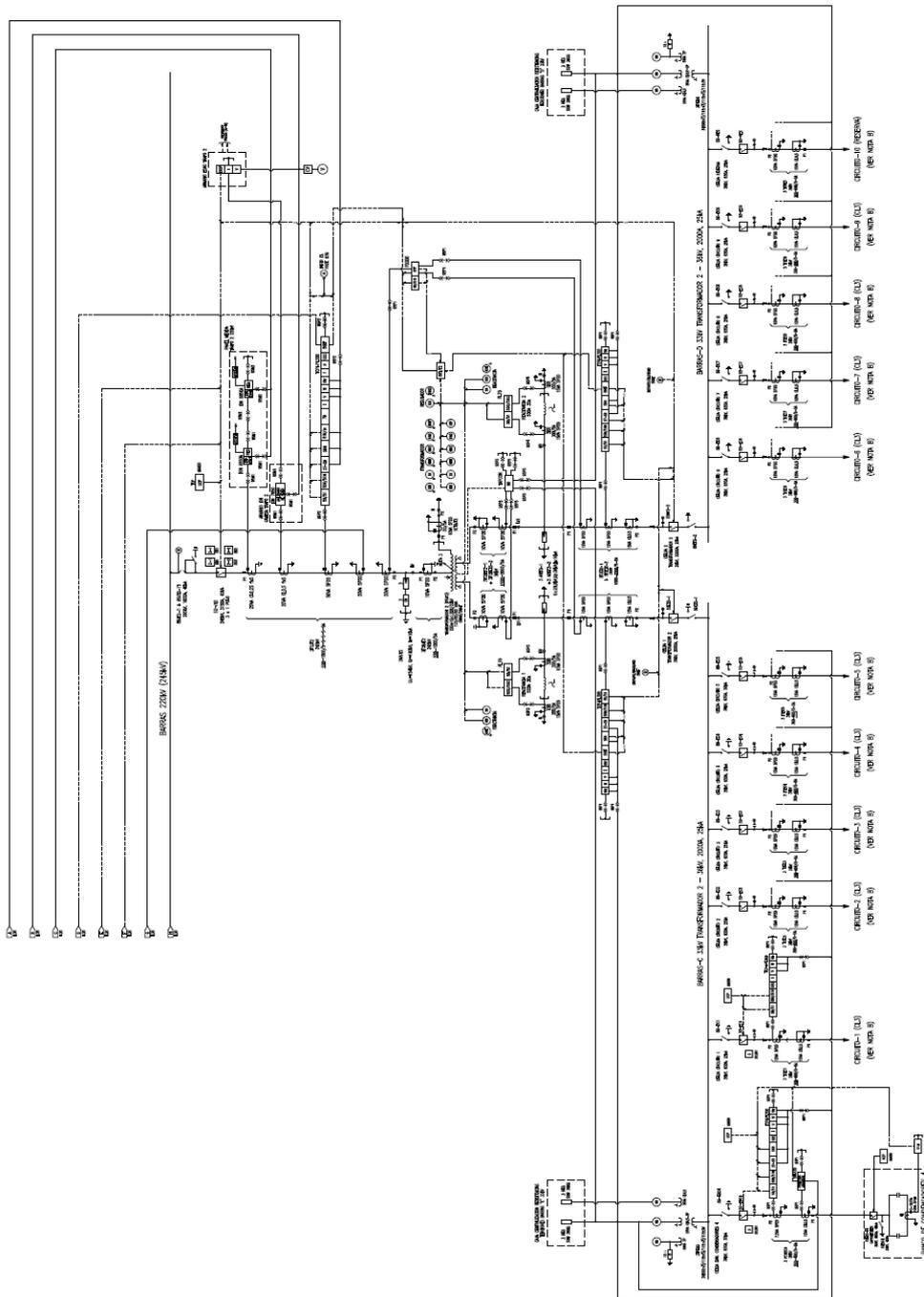


Figura 1. Esquema Unifilar Parque Eólico Cabo Leones III.

2.3 Unifilar red de Media Tensión

El Parque Eólico Cabo Leones III está compuesto por 22 aerogeneradores SG-132 3,465/3,55 MW sumando una potencia neta de 78,1 MW. Estos aerogeneradores están distribuidos en 4 circuitos como se muestra en el diagrama unifilar de la red de media tensión. Para la conexión a la red de media tensión los aerogeneradores utilizan un transformador que eleva el voltaje de los 690 V a nivel de generador a los 33 kV a nivel de la red de media tensión. El conjunto del parque esta interconectado al Sistema Eléctrico Nacional por medio del transformador del parque eólico instalado en la subestación elevadora. Este transformador tiene una potencia nominal de 170 MVA y sube el voltaje de 33 kV a 220 kV.

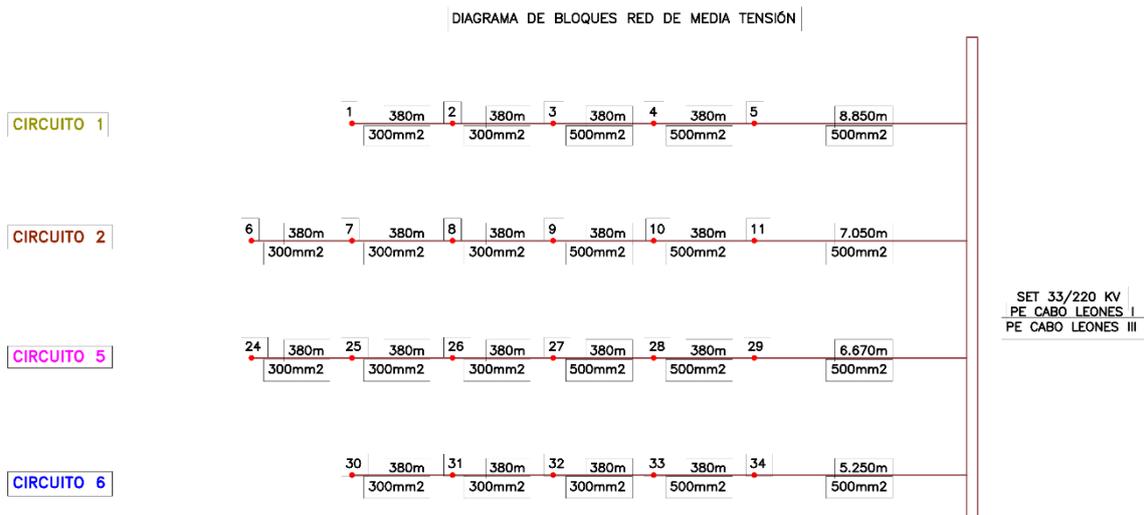


Figura 2. Esquema Sistema Colector Parque Eólico Cabo Leones III [5].

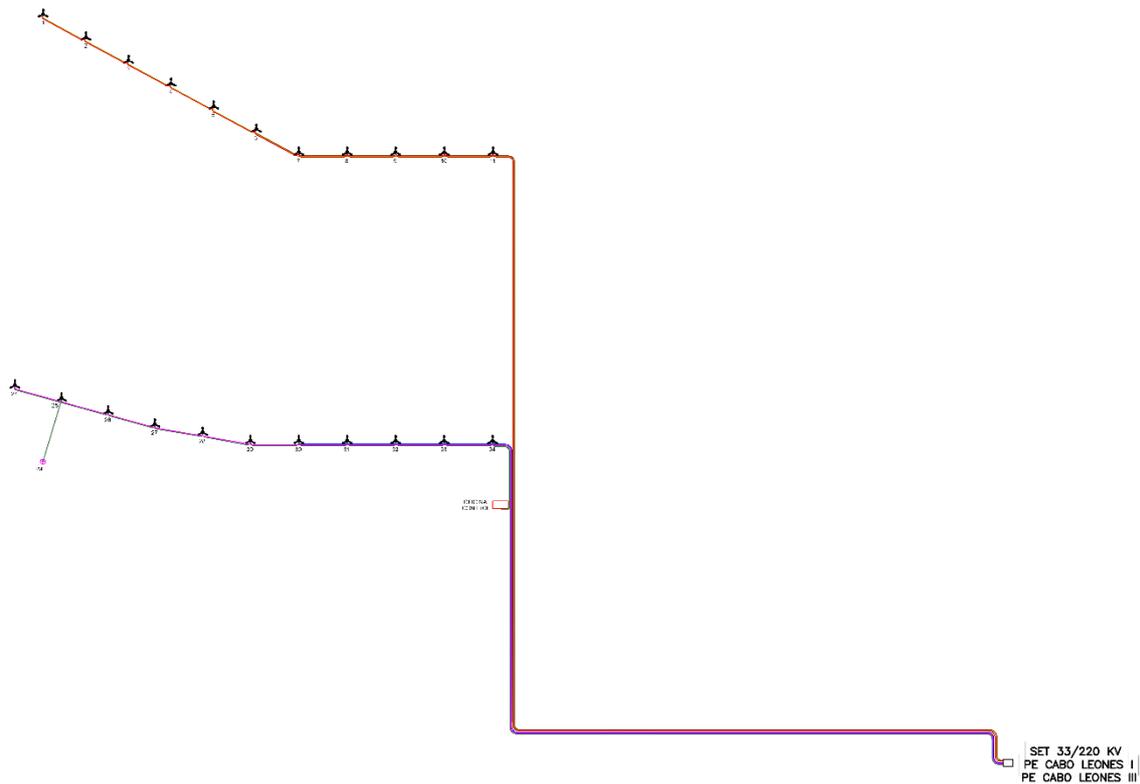


Figura 3. Implantación Sistema colector Parque Eólico Cabo Leones III.

El detalle de los conductores utilizados en cada circuito [6], el cual se resume a continuación:

Conductores por circuito	Distancia [m]	Resistencia [ohm/m]	R [ohm]
3x(1x300 mm ²) HEPRZ1 20/35 kV Al+H16	385	0,0001	0,0385
3x(1x300 mm ²) HEPRZ1 20/35 kV Al+H17	385	0,0001	0,0385
3x(1x500 mm ²) HEPRZ1 20/35 kV Al + H16 BR	385	0,0000605	0,0232925
3x(1x500 mm ²) HEPRZ1 20/35 kV Al + H16 BR	385	0,0000605	0,0232925
3x(1x500 mm ²) HEPRZ1 20/35 kV Al + H16 BR	8850	0,0000605	0,535425

Tabla 1: Parámetros del Sistema Colector

Las pérdidas en el sistema colector, en condiciones de máxima potencia de generación, se determinó en 143,5 [kW]

2.4 Servicios Auxiliares de la subestación

Los servicios auxiliares correspondientes a la barra de media tensión de la subestación Cabo Leones I se alimentan desde un transformador de 250 kVA 33000±2,5+5%kV/400-230 V.

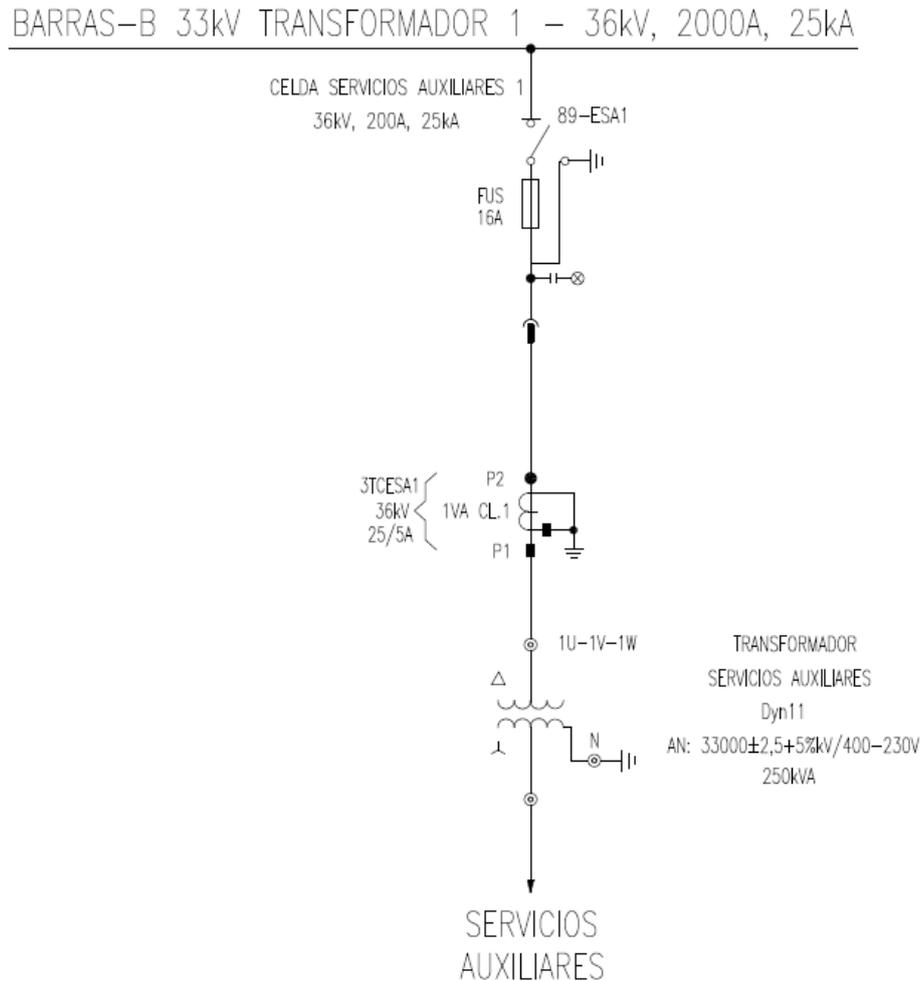


Figura 4. Transformador de SSAA de la subestación.[4]

Respecto a los datos del consumo de SSAA de la central, distinguimos entre el consumo de los aerogeneradores en modo pausa o seguimiento y los consumos propios de la subestación, ya que hay una gran diferencia entre ambos valores. La subestación dispone de un transformador de servicios auxiliares alimentado de media tensión de 250 kW, sin medición, como se puede ver en la siguiente imagen. Pero disponemos de una indicación visual en el cuadro de Baja tensión y sin posibilidad de extracción de datos, cuyo valor es de 4 [kW] [16]

2.5 Transformador de Poder

Según los datos presentados por el fabricante y garantizados mediante ensayos directos al equipo [7][8] y [9], el Transformador de Poder presenta los parámetros siguientes:

Ítem	Parámetro
Potencia nominal [MVA]	128/170
Clase de refrigeración	ONAN/ONAF
Voltaje Nominal [kV]	33/220
Cambiador de Derivación (lado AT)	21x1,25%
Grupo Vectorial	YNd11d11
Perdidas en carga [kW]	333
Corriente en Vacío [%]	89,6
Perdidas en Vacío [kW]	53
Perdidas Garantizadas Totales [kW]	386

Tabla 2: Parámetros del Transformador de Poder

2.6 Aerogenerador

La Máquina de Inducción Doblemente Alimentada (DFIM) es el sistema de conversión de energía mecánica en energía eléctrica, encargado de regular la potencia entregada a la red eléctrica y proporcionar funciones de protección y vigilancia.

El sistema DFIM está formado por un generador asíncrono trifásico con rotor bobinado accesible a través de anillos rozantes y de un convertidor de potencia (AC/DC/AC). El estator se conecta directamente a la red y el rotor a uno de los lados del convertidor (MSC), estando el otro lado conectado a la red (GSC). Este sistema consigue que el comportamiento del aerogenerador ante la red de distribución eléctrica sea similar al de un generador síncrono, más favorable para la red que un generador asíncrono convencional debido a que:

No existe pico de corriente en el momento de conexión a la red, a diferencia de los generadores asíncronos convencionales.

Existe un control de potencia reactiva continuo y regulable, a diferencia de los generadores asíncronos convencionales que consumen potencia reactiva lo que hace necesario el uso de bancos de condensadores para compensar. El controlador del convertidor de potencia (CCU) controla la potencia activa y reactiva permitiendo al usuario elegir el factor de potencia deseado de forma fija o dinámica a través de un controlador externo.

El rango de velocidad de funcionamiento es mucho mayor que en los generadores asíncronos convencionales, lo cual permite un mejor comportamiento tanto eléctrico como mecánico.

El sistema DFIM es capaz de trabajar con una velocidad de giro del rotor del generador superior a la velocidad de sincronismo. Asimismo, para optimizar la producción de energía con bajos vientos, el sistema es capaz de producir energía con una velocidad de giro del rotor por debajo de la velocidad de sincronismo. Este amplio rango dinámico de velocidad permite reducir las

cargas que soporta el aerogenerador, así como mejorar la calidad de la energía inyectada a la red.

En la configuración de conexión utilizada en el aerogenerador SG-132 3,465/3,55, el estator se conecta al secundario del transformador (690Vac) por medio de un interruptor de estator. Se instala un estator principal automático del circuito como elemento de protección contra episodios de sobrecorriente. La conexión de los bobinados del estator del generador se conecta en triángulo. El rotor se conecta al inversor del convertidor, mientras que el rectificador del convertidor se conecta al secundario del transformador de potencia (690Vac) mediante un contactor protegido por un interruptor principal.

Pese a que la tecnología del generador es de tipo asíncrono, el acoplamiento o conexión del aerogenerador a la red se realiza de forma suave, sin intercambio de energía activa o reactiva entre la instalación y la red.

Esto se debe a que el circuito magnético del generador ha sido previamente energizado, de forma controlada, desde el rotor por medio del convertidor. La perturbación de la tensión de la línea provocada por el acoplamiento a la red del aerogenerador es nula.

El convertidor electrónico de potencia garantiza un modo de funcionamiento síncrono con respecto a la red. La tensión y la frecuencia inducidas en el estator coinciden, en todo momento, con las mismas variables de la red. Si la tensión o frecuencia de línea varían, las del estator del generador lo hacen en el mismo sentido y proporción.

El comportamiento del convertidor en su conexión con la red es idéntico, ajustando la frecuencia de conmutación para que la forma de onda de la tensión resultante coincida en todo instante con la de la línea.

El esquema hardware del sistema es:

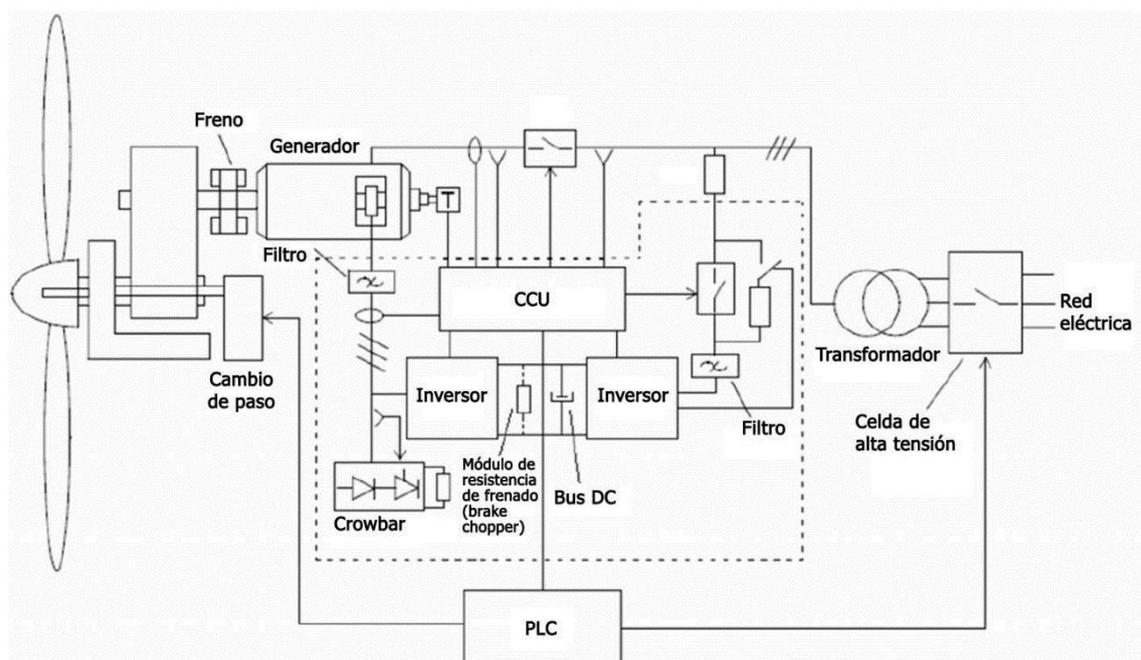


Figura 4. Esquema de hardware del aerogenerador SG-132 3,465/3,55

El convertidor de potencia se compone de unos componentes principales y una serie de protecciones que se describen brevemente a continuación:

Principales particiones:

- **Inversor (conectado al rotor).** Este convertidor DC/AC inyecta o extrae corriente en el rotor con frecuencia variable. Esta frecuencia es la necesaria para que en el estator se obtenga una tensión generada a 50 o 60Hz. Independiente de la velocidad de giro del rotor. Las consignas de corriente están gobernadas por la CCU, comunicándose vía bus de campo con el controlador PLC.
- **Rectificador (conectado a la red).** Este convertidor AC/DC regula la tensión del bus de continua para alimentar al inversor, además de transferir la potencia necesaria entre la red y el rotor del generador.
- **Bus de continua.** Estos son los condensadores que filtran la tensión obtenida por el rectificador para obtener una tensión continua sin fluctuaciones que alimente el inversor.
- **CCU.** Unidad de control del convertidor. Monitoriza los parámetros de la red y es la responsable de las alarmas.

Protección del convertidor ante fallos del aerogenerador:

Ante fallos que provoquen el paso a emergencia, la CCU abre todas las protecciones que conectan el convertidor con la red. Si el aerogenerador estaba vertiendo energía a la red, este corte provocaría que la energía que se encuentra en el rotor del generador cause una brusca subida de la tensión que llevaría a la destrucción de los condensadores e IGBTs del convertidor.

Para evitar este problema el sistema dispone de un equipo denominado crowbar. Este sistema, ante una brusca subida de tensión en el bus de continua, cortocircuita los devanados del rotor para que la energía sobrante se disipe en ellos.

Protección del convertidor ante incrementos de temperatura:

Durante el funcionamiento se producen aumentos de temperatura en los distintos componentes. El sistema mide las temperaturas en los devanados y anillos rozantes del generador, en los disipadores de calor de los IGBTs del convertidor, en el embarrado, en el transformador y en la tarjeta de control de los convertidores. Cuando la temperatura supera los parámetros preestablecidos, el aerogenerador pasará a un estado de operación que salvaguarde la integridad de este.

Protección ante cortocircuitos:

El convertidor está protegido ante cortocircuitos, fallos de red y otros con interruptores automáticos y térmicos, tanto en el circuito de estator como en el del rotor.

Emisión de armónicos:

El convertidor utiliza IGBTs que conmutan a una frecuencia muy superior a la de la red (50/60Hz), lo que, unido a los filtros empleados, consigue que la potencia que se vierte a la red eléctrica tenga un contenido armónico que cumple con la normativa vigente de Calidad de Energía. [10][11]

La información técnica más relevantes del aerogenerador se muestra en las siguientes tablas:

2.6.1 Datos del Generador

Los datos que se presentan a continuación para el Generador Eléctrico de 6 polos son obtenidos de la información entregada por el fabricante:

ítem	Valor
Potencia Nominal [kW]	3465
Tipo Generador	Generador Asíncrono Doblemente Alimentado
Conexión Estator	Triángulo
Conexión Rotor	Estrella
Número de Polos	6
Sentido de Giro	En sentido agujas del reloj visto desde el eje del lado acoplamiento
Sondas Pt100	6 en devanados del estator
	1 en el rodamiento del lado acoplamiento
	1 en el rodamiento del lado sin acoplamiento
	1 en el cuerpo de anillos
Temperatura Ambiente [°C]	-20 a +45
Altitud sobre Nivel del Mar [m]	0 a 1000
Frecuencia Nominal [Hz]	50 / 60
Velocidad Nominal [rpm]	1120
Rango de Velocidad [rpm]	700/1332
Tensión Nominal [V]	690
Tensión Máxima del Rotor [V]	775
Factor de Potencia	0,95 cap – 1 – 0,95 ind
Grado de Protección (IEC 60034)	IP54 Máquina – IP23**** Cuerpo de anillos
Aislamiento Estator / Rotor	F ó H / F ó H
Peso [kg]	≤ 10450
Pre-instalación Acelerómetros del Sistema Mantenimiento Predictivo	Incluido
Posibilidad Instalación Engrasador Automático	Sí

Tabla 3: Parámetros del Generador Eléctrico [10][11]

2.6.2 Datos del Convertidor

Los datos que se presentan a continuación para la unidad convertidora son obtenidos de la información entregada por el fabricante [12]:

ítem	Valor
Tecnología	Back to Back basado en IGBTs
Temperatura funcionamiento [°C]	-25 a 50
Altitud sobre Nivel del Mar [m]**	0 a 1000
Nivel de Protección Atmosférica (IEC 61439-1)	≥3
Tipo de Refrigeración	Aire - Agua/Glicol
Temperatura Máxima Aire Refrigeración [°C]	50
Temperatura Máxima Líquido Refrigerante [°C]	60
Frecuencia Nominal [Hz]	50Hz (±6%)
Tensión Nominal [V]	690 (±10%)
Potencia nominal [kW]	3000/3465
Nivel de Armónicos (IEC 61400-21)	THC ≤ 2

Tabla 4: Parámetros del Convertidor

2.6.3 Transformador de aerogenerador

Los datos que se presentan a continuación para la unidad convertidora son obtenidos de la información entregada por el fabricante [13]:

Ítem	Valor
Potencia [kVA]	3900
Tipo Transformador	Transformador Trifásico, devanado encapsulado seco
Condición de Servicio	Interior
Tipo de Ventilación*	AF (Forzada)
Clase Ambiental (IEC 60076-11)	E2
Clase Climática (IEC 60076-11)	C2
Comportamiento frente al Fuego (IEC 60076-11)	F1
Altitud sobre Nivel del Mar [m]**	0 a 1000
Clase de Aislamiento/Térmico	F o H
Tensión Devanados de Baja Tensión [V]	3x690
Conexión Devanados de Baja Tensión	Estrella, neutro conectado directamente a tierra
Tensión Devanados de Media Tensión [kV]	Dependiente de la tensión de la red o subestación (por ejemplo, 3x20-3x30-3x33-3x34.5-3x35kV)
Conexión Devanados de Media Tensión	Triángulo
Tomas intermedias Media Tensión	+/-2,5% +/-5%

Grupo de Conexión	Dyn11
Frecuencia de Red [Hz]	50/60
Tensión más Elevada para el Material, Um, en Devanado MT (IEC 60076-3) [kV]	Dependiente de la tensión de la red o subestación (por ejemplo, 3x33kV ⇒ 36kV valor eficaz)
Nivel de Aislamiento Asignado de Corta Duración a Frecuencia Industrial en Devanado MT (IEC 60076-3) [kV]	Dependiente de la tensión más elevada del material (por ejemplo, 36kV ⇒ 70kV valor eficaz)
Nivel de Aislamiento Asignado a Impulsos Tipo Rayo en Devanado MT (IEC 60076-3) [kV]	Dependiente de la tensión más elevada del material. Columna 2 (por ejemplo, 36kV ⇒ 170kV valor cresta)
Sondas Pt-100	2 por fase en cada devanado de baja, en puntos calientes
Dimensiones Máximas (L*W*H) [mm]	2400*1200*2400 (valores aproximados)
Peso [kg]	< 7500

Tabla 5: Parámetros del Transformador del aerogenerador

2.6.4 Curva de potencia

La siguiente tabla muestra la potencia eléctrica [kW] como función de la velocidad del viento [m/s] horizontal referida a la altura del buje, ponderada en diez minutos, para diferentes densidades de aire [kg/m³]. La curva de potencia no incluye las pérdidas del transformador ni de los cables de alta tensión. La curva de potencia corresponde a la clase S del aerogenerador.

P [kW]	Densidad [kg/m ³]										
	0,95	1,165	1,18	1,195	1,21	1,225	1,24	1,255	1,27	1,285	1,3
Ws [m/s]	23	34	35	36	36	37	38	39	39	40	41
3	120	158	161	164	167	169	172	175	178	181	184
4	316	409	415	422	428	434	441	447	454	460	467
5	617	773	784	794	805	816	826	837	848	859	869
6	1018	1260	1277	1294	1311	1327	1344	1361	1378	1395	1412
7	1541	1897	1922	1946	1971	1996	2019	2043	2068	2092	2116
8	2171	2622	2650	2678	2705	2734	2757	2782	2807	2831	2854
9	2804	3187	3205	3223	3240	3258	3271	3285	3299	3312	3324
10	3252	3448	3456	3462	3468	3475	3480	3484	3489	3493	3497
11	3459	3527	3529	3531	3533	3534	3536	3537	3538	3539	3540
12	3527	3546	3546	3546	3547	3547	3547	3548	3548	3548	3548
13	3545	3549	3549	3549	3549	3550	3550	3550	3550	3550	3550
14	3549	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550
15	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550	3550
16	3548	3548	3548	3548	3548	3548	3548	3548	3548	3548	3548
17	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538
18	3501	3501	3501	3501	3501	3502	3501	3501	3501	3501	3501
19	3418	3418	3418	3418	3418	3418	3418	3418	3418	3418	3418
20											

21	3278	3278	3278	3278	3278	3278	3278	3278	3278	3278	3278
22	3095	3095	3095	3095	3095	3095	3095	3095	3095	3095	3095
23	2896	2896	2896	2896	2896	2896	2896	2896	2896	2896	2896
24	2711	2711	2711	2711	2711	2711	2711	2711	2711	2711	2711
25	2562	2562	2562	2562	2562	2562	2562	2562	2562	2562	2562

Tabla 6: Potencia calculada en función de la velocidad del viento a la altura del eje Ws del aerogenerador SG-132 3.465-3.55 MW, para diferentes densidades

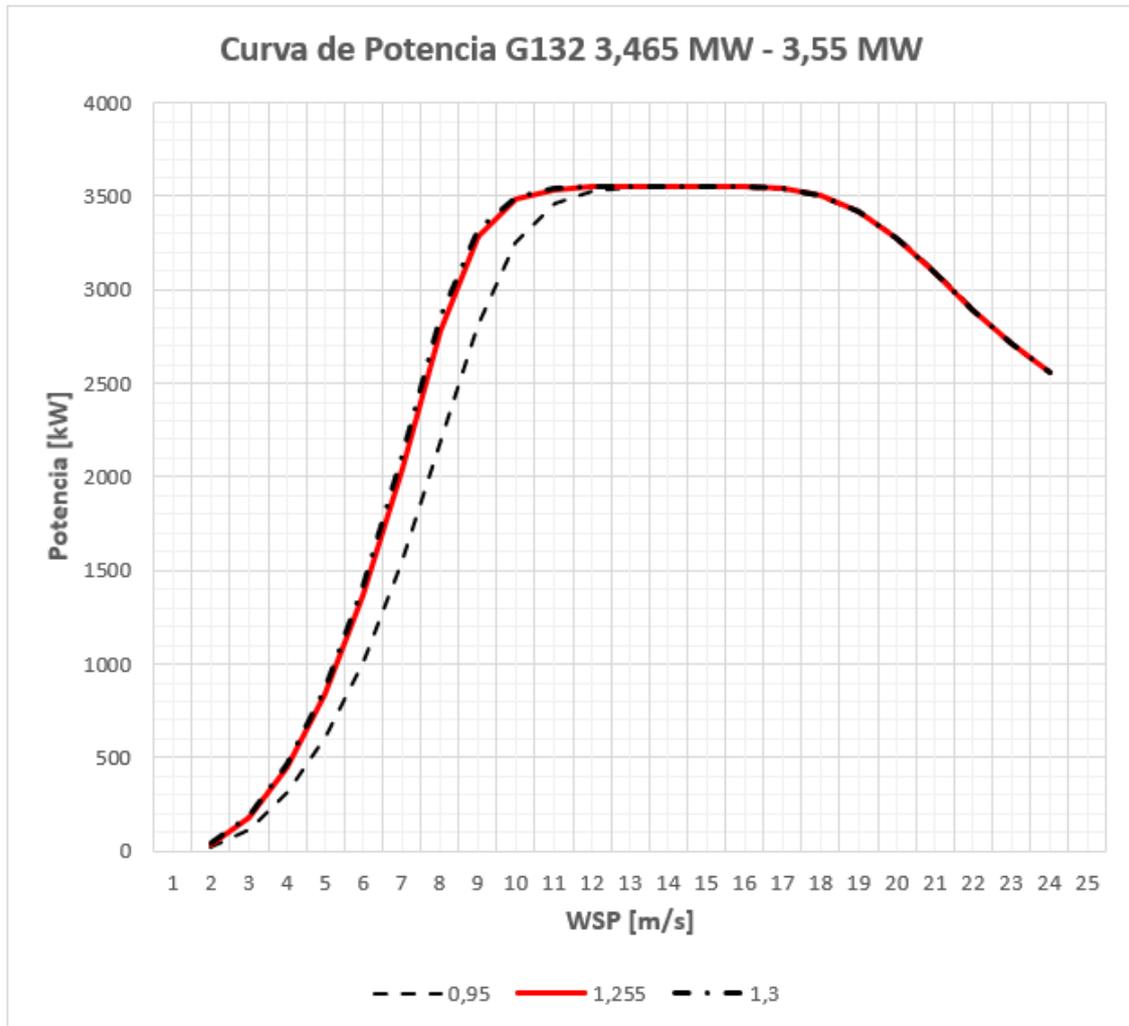
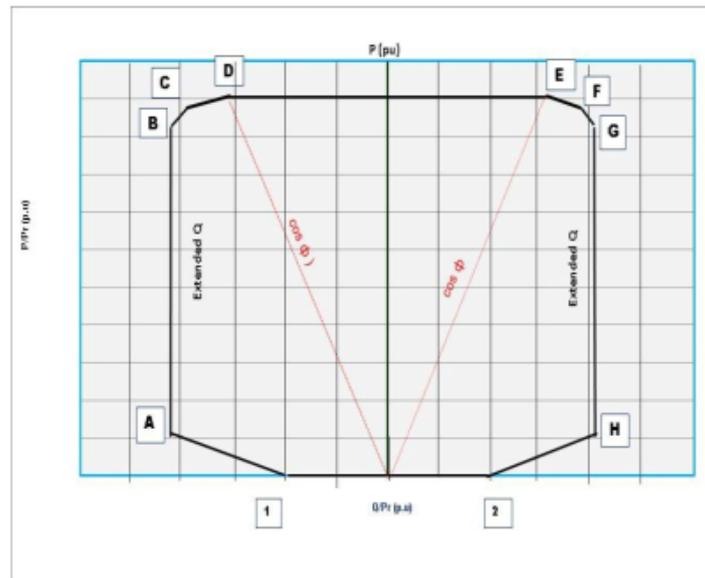


Figura 5. Curva de Potencia del aerogenerador SG-132 3.465-3.55 MW

2.6.5 Curva de Generación de Potencia Reactiva

Los límites de la producción de potencia reactiva son 690 kVAr, considerando siempre como referencia el lado de BT del transformador principal. En la envolvente siguiente se muestra la curva de reactiva del aerogenerador SG-132. Estos aerogeneradores son capaces de generar o consumir hasta 690 kVAr de potencia reactiva respectivamente. Estas capacidades de producción/consumo de reactiva se pueden mantener en un rango de 5 a 100% de la producción de potencia activa en las terminales de bajo voltaje del aerogenerador como se muestra en la

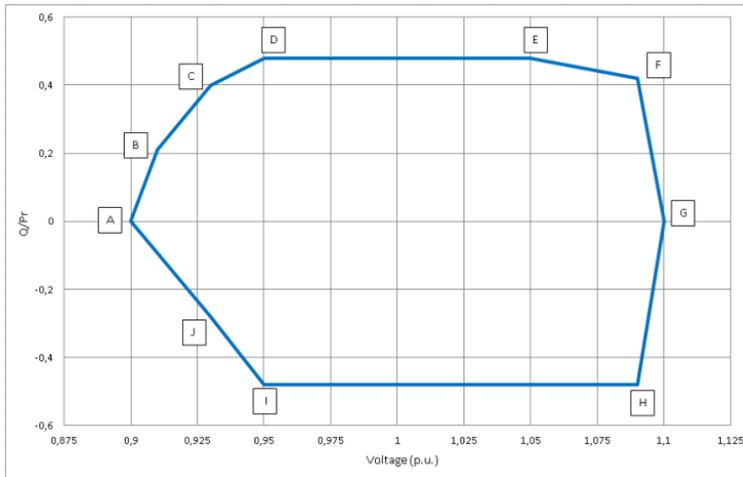
Figura 6. Al llegar a la potencia activa de 5% hasta llegar al 0% la capacidad de potencia reactiva disminuye linealmente hasta llegar a cero.



	Q/Pr(pu) / kVAr	P/Pr (pu)/ kW
1	-0.197pu/-700 kVAr	0
A	-0.45pu/-1600kVAr	0.05 pu/ 177 kW
B	-0.45pu/-1600kVAr	0.93pu/3300kW
C	-0.4pu / -1423kVAr	0.976pu/3465 kW
D	-0.326 pu/ -1160 kVAr	1pu/3550 kW
E	0.326 pu/ 1160 kVAr	1pu/3550 kW
F	0.4pu / 1423kVAr	0.976pu/3465 kW
G	0.45pu/1600kVAr	0.93pu/3300kW
H	0.45pu/1600kVAr	0.05 pu/ 177 kW
2	0.197pu/700 kVAr	0

Figura 6. Curva generación de potencia reactiva aerogenerador SG-132 para Power Boost 3.55 MW; $\cos(\phi)=0.95$, a T° -20°C a 25°C

Fuera del rango de tensión de -5 % / +10 % la potencia reactiva está limitada conforme a la tensión de la red eléctrica en el lado de BT del transformador. El límite viene impuesto por la máxima clasificación de intensidad y tensión del aerogenerador. Por tanto, el límite de potencia reactiva, en función de la tensión de la red, se define en la siguiente figura.[14][15]



Q-V	Standard 3.465Mw cos φ @Pr =±0,925		Power Boost 3.55Mw cos φ @Pr =±0,95	
	Q/Pr pu	Voltaqe pu	Q/Pr pu	Voltaqe pu
A	0	0,9	0	0,9
B	0,19	0,91	0,17	0,91
C	0,3	0,93	0,25	0,93
D	0,41	0,95	0,32	0,95
E	0,41	1,05	0,32	1,05
F	0,35	1,09	0,27	1,09
G	0	1,1	0	1,1
H	-0,41	1,09	-0,32	1,09
I	-0,41	0,95	-0,32	0,95
J	-0,24	0,93	-0,19	0,93

Figura 7. Curva Generación de potencia reactiva aerogenerador SG-132 en función de la tensión.

2.6.1 Estados del aerogenerador

Para propósito de este documento el aerogenerador para su operación puede estar dentro de cualquiera de los siguientes estados de operación:

RUN CONNECTED (5)

Una vez que la velocidad del generador excede la velocidad de referencia del acoplamiento, el generador puede conectarse y comenzar a funcionar. Después de esto, la referencia de velocidad del generador se incrementa de nuevo para obtener el valor de referencia nominal. Al mismo tiempo, la producción máxima permisible de energía total aumenta de 0 al valor nominal si no se aplica ninguna limitación.

RUN (4)

El control de velocidad del generador está habilitado y su referencia aumenta de 0 a un valor ligeramente superior a la velocidad de referencia del acoplamiento. Al mismo tiempo, el valor de paso mínimo se reduce dinámicamente a medida que aumenta la velocidad del rotor.

PAUSE (3)

La posición de pitch de todas las cuchillas se incrementa con una tasa fija al valor de referencia de pitch de pausa. De esta forma, el par aerodinámico, la producción de potencia y la velocidad del generador disminuyen lentamente. Al final, el generador se desconecta de la red y la velocidad del rotor disminuye a un valor mínimo.

STOP (2)

El grupo hidráulico de emergencia incrementa la posición de pitch de todas las cuchillas con una velocidad constante hasta el valor de posición de pitch máximo.

Al mismo tiempo, la producción de potencia total máxima permitida se incrementa desde el valor actual a cero a una velocidad constante.

EMERGENCY (1)

El grupo hidráulico de emergencia incrementa la posición de paso de todas las cuchillas con una velocidad constante hasta el valor de posición de pitch máximo. El generador se desconecta inmediatamente desde el momento en que se solicita el estado operativo de emergencia.

La acción del freno hidráulico solo se nota a baja velocidad del generador.

2.6.1 Control de Potencia Reactiva en Mínimo Técnico bajo presencia de recurso eólico.

Según lo indicado por el fabricante en la [14] y que se resume en la Figura 6, bajo mínimo técnico, es decir en 10% de la Potencia Nominal, cada aerogenerador puede responder bajo los siguientes parámetros de diseño:

Para cada aerogenerador	Potencia Reactiva
Capacidad Máxima de Absorber reactivos	- 1600 [kVAR]
Capacidad Máxima de inyectar reactivos	1600 [kVAR]

Tabla 7: Potencia reactiva máxima por cada aerogenerador funcionando en mínimo técnico, según fabricante.

Para el caso del parque y bajo condiciones de mínimo técnico a 10% de la Potencia Nominal, los parámetros de diseño son los siguientes:

Para el parque	Potencia Reactiva
Capacidad Máxima de Absorber reactivos	-35200 [kVAR]
Capacidad Máxima de inyectar reactivos	35200 [kVAR]

Tabla 8: Potencia reactiva máxima por el parque funcionando en mínimo técnico, según criterio de diseño.

En ambos casos, el mínimo capaz de absorber o inyectar, tanto para los aerogeneradores como el parque es 0 [kVAR].

Cabe mencionar que el parque no posee ninguna limitación a la hora de funcionar a Mínimo Técnico.

Tal como se indicó con anterioridad, el consumo de los servicios auxiliares es de 4 [kW]

2.6.2 Control de Potencia Reactiva sin presencia de recurso eólico.

Tal como indica la tabla de la Figura 6, se indica que los aerogeneradores están diseñados por fabricante para responder de la siguiente forma:

Para cada aerogenerador	Potencia Reactiva
Capacidad Máxima de Absorber reactivos	- 700 [kVAR]
Capacidad Máxima de inyectar reactivos	700 [kVAR]

Tabla 9 Potencia reactiva máxima por cada aerogenerador en ausencia de recurso, según fabricante.

Para el caso del parque y bajo condiciones de mínimo técnico a 10% de la Potencia Nominal, los parámetros de diseño son los siguientes:

Para el parque	Potencia Reactiva
Capacidad Máxima de Absorber reactivos	-15400 [kVAR]
Capacidad Máxima de inyectar reactivos	15400 [kVAR]

Tabla 10 Potencia reactiva máxima por el parque en ausencia de recurso, según criterio de diseño.

En ambos casos, el mínimo capaz de absorber o inyectar, tanto para los aerogeneradores como el parque es 0 [kVAR].

Al igual que en el caso anterior, el consumo de los servicios auxiliares es de 4 [kW]

3 Regulación de Potencia Activa y Reactiva del Parque Eólico Cabo Leones III.

El control del parque eólico es hecho por medio de la interfaz WindNet® PRO de Gamesa. En esta interfaz se encuentra el Gamesa Power Manager (PM) que es una herramienta que sirve para controlar la salida de potencia del parque eólico en el punto de conexión a la red.

Como norma general, PM permite la regulación de la potencia activa teniendo en cuenta una consigna externa (modo de equilibrio), una limitación administrativa fija (límite de potencia), un requisito de frecuencia (activa/frecuencia) y una función de rampa de viento (índice de rampa). Además, PM permite la regulación de la potencia reactiva.



Figura 10. Pantalla WindNet Pro.

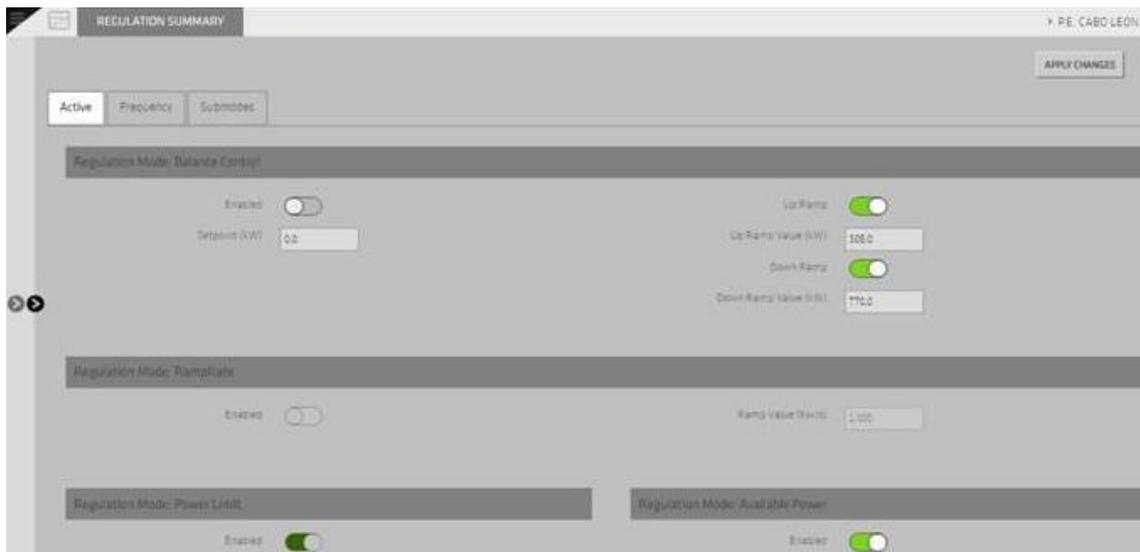


Figura 11. Pantalla WindNet Pro – Regulador de Activa.

Los aerogeneradores de Gamesa reciben comandos de potencia activa o de marcha/pausa y usan su propia capacidad de modulación de potencia activa a fin de ejecutar las órdenes, respetando sus límites técnicos para garantizar la integridad de los componentes del aerogenerador. Los aerogeneradores de Gamesa pueden modular su producción de potencia activa en un amplio rango de generación, desde el 100 % de su capacidad total hasta su límite de regulación.

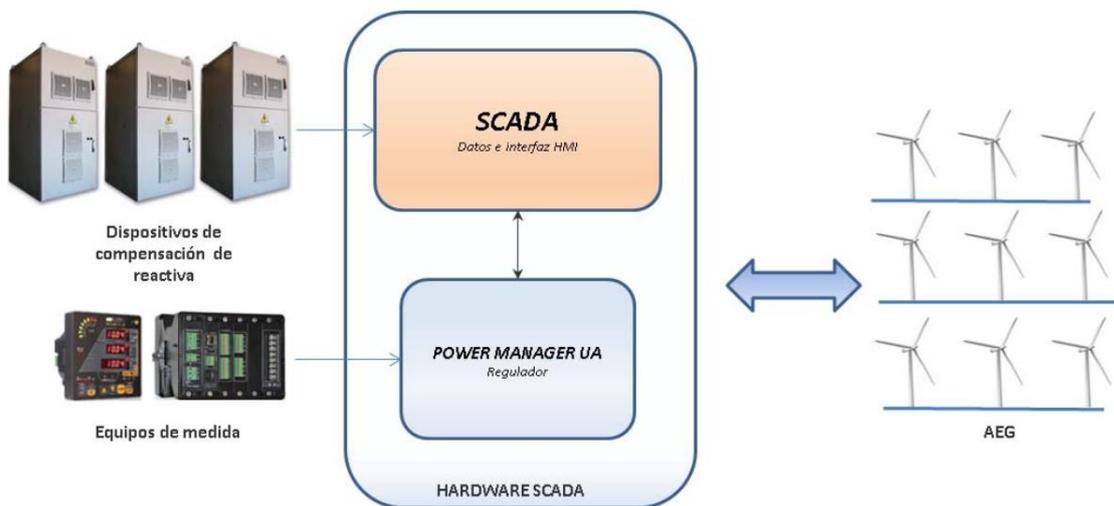


Figura 12. Esquema Funcional Parque Eólico Cabo Leones I.

4 Determinación del Mínimo Técnico del Parque Eólico Cabo Leones III

Para la determinación del mínimo técnico de operación del Parque Eólico Cabo Leones III se hicieron pruebas en campo en base al procedimiento de pruebas presentado al Coordinador Eléctrico Nacional con código P16007, así como a la información técnica descrita en este documento, la NTSyCS, las condiciones ambientales y los aerogeneradores disponibles.

Para la realización de las mediciones hemos utilizado el SCADA del parque eólico, con el objeto de registrar las variables durante las pruebas realizadas, que permitan analizar el comportamiento de los aerogeneradores y del parque eólico en su conjunto. Por otra parte, para la realización de las mediciones de parámetros eléctricos se ha utilizado el analizador de redes modelo SATEC PM180, instalado de forma permanente en el paño de transformador de 220 kV, en la subestación del parque eólico Cabo Leones I, siendo este el punto de conexión y medida fiscal del parque eólico.

Primero se esperó a que el parque estuviera operando con suficiente recurso y constante. Luego se programó la consigna del set-point a Mínimo Técnico como muestra la gráfica a continuación.

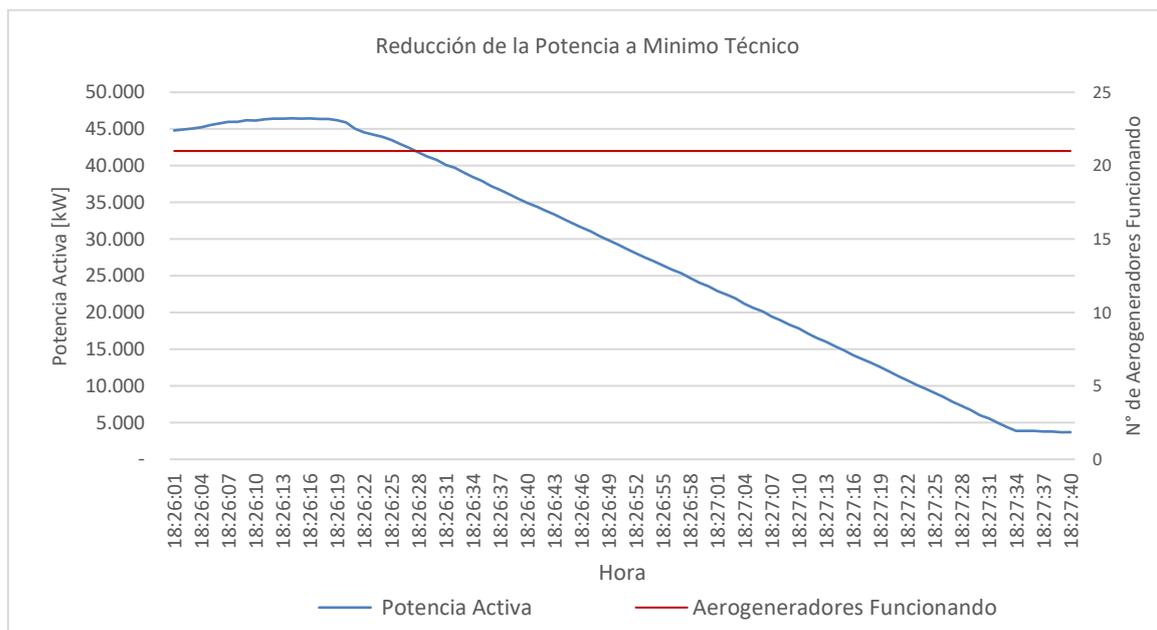


Figura 13. Gráfica reducción de potencia activa a mínimo técnico.

Para potencias inferiores al 5% de la potencia activa nominal, los aerogeneradores cambian de estado a “Pausa”, tanto por límites operativos como por protección de los componentes de los propios aerogeneradores. Esto se debe a los esfuerzos presentes en la máquina y a las limitantes de control del torque, lo cual es especialmente notorio cuando se fija una consigna de potencia activa mucho menor a la potencia generable por los aerogeneradores por el recurso eólico disponible en ese instante. En el momento que la consigna aumente lo suficiente las máquinas desconectadas se volverán a conectar (estado “READY”) a disponibilidad del recurso eólico.

De acuerdo con información provista por el fabricante, considerando alto recurso eólico y consignas de generación externas al PPC, por medidas de protección del aerogenerador, la potencia activa no puede ser controlada para valores de potencia bajo el 5% de la potencia nominal del aerogenerador, esto es 177,5 [kW] por aerogenerador, lo que a nivel de parque significa un valor mínimo de 3905 kW.

Considerando lo anterior, durante las pruebas realizadas se registró la operación del parque a potencias inferiores al 5% de la potencia nominal, con el objetivo de observar cómo influye la operación a mínimo técnico sobre la cantidad de aerogeneradores que permanecen conectados y generando. Una vez que la potencia del parque eólico quedó por debajo del 5% de la potencia nominal, los aerogeneradores automáticamente se empezaron a cambiar al estado de “Pausa”.

Para valores cercanos al 5% de la potencia nominal, la mayoría de los aerogeneradores se mantuvieron en marcha y no fue hasta aproximadamente 2.300 kW que se notó un incremento significativo en la cantidad de aerogeneradores que cambiaron a modo “Pausa”. Esto continuó hasta que todos los aerogeneradores se desconectaron y el parque eólico empezó a consumir potencia activa (462 kW en promedio para un aerogenerador una vez que todos los aerogeneradores se pusieron en modo “Pausa”):



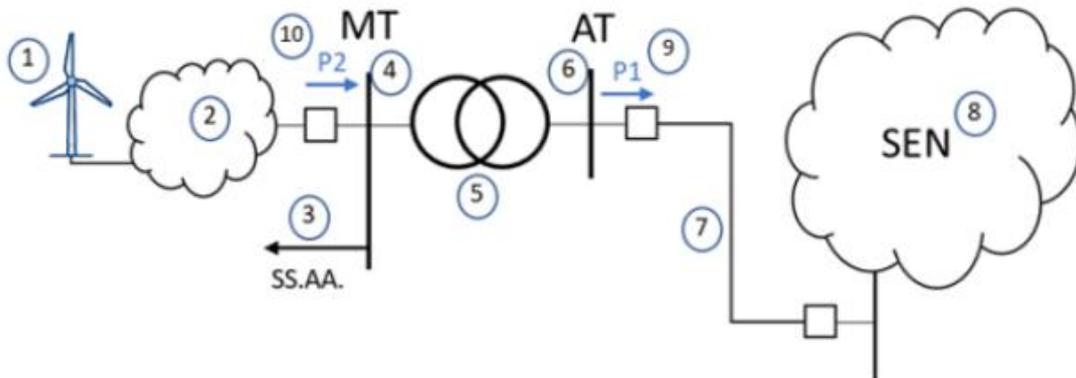
Figura 14. Gráfica aerogeneradores en servicio al reducir la potencia activa por debajo del mínimo técnico.

Como se puede observar en la gráfica, una consigna de generación menor al 5% para régimen de vientos elevados, implica la pausa de aerogeneradores por razones de seguridad de la turbina como se explica a continuación.

Hay que tener en cuenta que la regulación de potencia del parque eólico se realiza con un sistema de control, por lo que en el caso que el valor de consigna del parque eólico sea igual o inferior a cero, hace que todos los generadores del parque eólico se detengan, como se puede ver en la gráfica se llega a potencia cero con 19 aerogeneradores funcionando, por lo que para asegurar el funcionamiento permanente de una unidad, es necesario al menos el funcionamiento de 20 unidades de generación al mínimo técnico para asegurar el funcionamiento solicitado.

4.2 Procedimiento de cálculo del Mínimo Técnico

Dentro de este punto mostraremos los valores de acuerdo con lo solicitado en el Anexo Técnico “Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras”. Para ello primero se obtendrán las pérdidas de M.T. del parque, que se adjunta como anexo, obteniendo los siguientes resultados:



En donde los componentes se identifican como:

1. Parque Eólico equivalente: Corresponde a la suma de los aportes distribuidos de potencia activa alterna de cada inversor del parque ERNC.
2. Pérdidas en sistema colector del parque: Corresponde a las pérdidas del sistema colector del parque eólico principalmente en cables de baja y media tensión.
3. Servicios Auxiliares (SS.AA.) de la central.
4. Barra de media tensión (MT): Corresponde a la tensión en el lado de baja tensión del transformador de poder.
5. Transformador de Poder: Equipo elevador presente en la subestación de salida del parque ERNC.
6. Barra de alta tensión (AT): Corresponde a la tensión en el lado de alta tensión del transformador de poder.
7. Línea dedicada de la central: Línea de alta tensión que vincula el parque ERNC con el Sistema Eléctrico.
8. Sistema Eléctrico Nacional (SEN).
9. Potencia inyectada por el parque ERNC en la barra de 33kV de tensión.
10. Potencia inyectada por el parque ERNC en la barra de media tensión de su subestación de salida 220kV.

Posteriormente se definen las siguientes variables:

- a) P_1 : Potencia activa inyectada en la barra de alta tensión (AT) de la central [kW].
- b) P_{trafo} : Pérdidas activas en el transformador de poder [kW].
- c) $SS. AA$: Servicios Auxiliares de la central [kW].

d) $P_{colector}$: Pérdidas en el sistema colector del parque ERNC [kW]

Las Pérdidas del transformador de acuerdo con la hoja de datos garantizados es de 386 [kW] [9]

4.3 Cálculo del Mínimo Técnico para el Parque Cabo Leones III

Las pérdidas en el sistema colector, en condiciones de máxima potencia de generación, se determinó en 143,5 [kW]

Por lo tanto, si el mínimo técnico fuese un único aerogenerador, que como se solicita, la potencia generada sería de es de 177,5 [kW] y el resto de las máquinas estuviesen paradas, las pérdidas del parque eólico hacen como resultado se consuma energía en la barra de 220 [kV]. Pero si a eso se le debe añadir el consumo del resto de las maquinas en pausa, mientras realizan el seguimiento de la orientación del recurso, hace como resultante se consuma hasta 388 kW energía en la barra de 220 [kV].

Hay que tener en cuenta que la regulación de potencia del parque eólico se realiza con un sistema de control, por lo que en el caso que el valor de consigna del parque eólico sea igual o inferior a cero, hace que todos los generadores del parque eólico se detengan, como se puede ver en la gráfica 14 se llega a potencia cero con 19 aerogeneradores funcionando, por lo que para asegurar el funcionamiento permanente de una unidad, es necesario al menos el funcionamiento de 20 unidades de generación al mínimo técnico para asegurar el funcionamiento solicitado, $20 \times 177,5 = 2.350$ [kW].

En resumen, el Mínimo Técnico (P_{MT}) en 220 kV de la central quedará definido por:

$$P_{MT-Parque}(220\text{ kV}) = P_1 + P_{trafo} + SS.AA + P_{colector}$$

1.	Mínimo Técnico Aerogeneradores	2.350 [kW]
2.	Pérdidas en el sistema colector ($P_{colector}$)	143,5 [kW]
3.	Servicios Auxiliares de la central (SS. AA)	4 [kW]
5.	Pérdidas activas en Trans. de Poder (P_{trafo})	386 [kW]
6.	Potencia Activa inyectada en la barra AT 220 kV (P_1)	1.817 [kW]
Mínimo Técnico de la Central (MT)		1,82 [MW]

Tabla 11 Resultados de Mínimo Técnico para el Parque

Para el caso de un aerogenerador es el siguiente calculo:

$$P_{MT-Aero}(220\text{ kV}) = P_1 + P_{trafo} + SS.AA + P_{colector}$$

1.	Mínimo Técnico Aerogeneradores	710 [kW]
2.	Pérdidas en el sistema colector ($P_{colector}$)	143,5 [kW]
3.	Servicios Auxiliares de la central (SS. AA)	4 [kW]
5.	Pérdidas activas en Trans. de Poder (P_{trafo})	386 [kW]
6.	Potencia Activa inyectada en la barra AT 220 kV (P_1)	177 [kW]
Mínimo Técnico de la Central (MT)		0,2 [MW]

Tabla 12 Resultados de Mínimo Técnico para el aerogenerador

5 Justificaciones que describen fuentes de inestabilidad del Parque Eólico Cabo Leones III

Durante la realización de las pruebas no se registró ninguna inestabilidad en la operación del Parque Eólico Cabo Leones III en ninguno de los niveles de generación, de acuerdo con lo descrito en los puntos anteriores las maquinas cambiaron el modo de operación. Basado en lo anterior se confirma que los aerogeneradores SG-132 3.465/3.55 MW son capaces de operar dentro de los rangos descritos en este documento.

6 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas correspondientes al “**ANEXO TÉCNICO: Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras**” y las características operativas de los aerogeneradores SG-132 3.465/3.55 se hacen las siguientes conclusiones al respecto de los mínimos técnicos del Parque Eólico Cabo Leones III:

- El Parque Eólico Cabo Leones III es capaz de operar hasta el 5% de su potencia activa nominal (3.905 MW), sin mandar a estado de “Pausa” a ningún aerogenerador.
- Por debajo del 5% de la Potencia activa nominal los aerogeneradores se empiezan a poner en modo “Pausa” hasta llegar a 0 MW.
- La potencia activa bruta mínima que es capaz de inyectar el Parque Eólico Cabo Leones III de forma permanente es de 2.350 [MW].
- La potencia activa neta mínima que es capaz de inyectar el Parque Eólico Cabo Leones III de forma permanente es de 1,817 [MW].
- La potencia activa neta mínima que es capaz de inyectar una unidad del Parque Eólico Cabo Leones III de forma permanente es de 0,2 [MW].

7 Referencias

- [1] Comisión Nacional de Energía (2020). Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/09/NTSyCS-Sept20.pdf>
- [2] Comisión Nacional de Energía (2019). Anexo Técnico: Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/DETERMINACI%C3%93N-DE-M%C3%8DNIMOS-T%C3%89CNICOS-EN-UNIDADES-GENERADORAS.pdf>
- [3] Coordinador Eléctrico Nacional (2019). Puesta en Servicio de Unidades Generadoras– Aplicación de Anexos Técnicos- Recuperado de <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2019/03/PES-de-UUGG-Aplicaci%C3%B3n-de-Anexos-T%C3%A9cnicos.pdf>
- [4] SIEMSA, Grupo Ibereólica Renovables (2019). SET PE CABO LEONES I/III 33/220 kV. Cod.: 16009-12UNX0-R2
- [5] Ibereólica Cabo Leones III SpA (2019). Recorrido de Líneas del Sistema Colector de 33 kV. Diagrama de Bloques, Secciones y Longitudes. Cod.: PECLIII-5
- [6] Prysmian. Cables tipo EPROTENAX COMPACT (aislamiento de HEPR).
- [7] ABB (2017). Protocolo de Ensayos Placa de Características. Cod.: 1ZBR61691
- [8] ABB (2018). Protocolo de Ensayos. Cod.: 1ZBR61952
- [9] ABB (2019). Hoja de Características Garantizadas Transformador de Poder 128/64/64 MVA; 170/85/85 MVA
- [10] Siemens Gamesa (2019). Technical data generator. Cod.: GD280007-en
- [11] Siemens Gamesa (2019). Soluciones de conexión a red. Cod.: GD314947-ES R3
- [12] Siemens Gamesa (2016). AA2401 y AA2408 – Características Eléctricas del Convertidor. Cod.: GD278677-ES R1
- [13] Siemens Gamesa (2017). Características Generales del Transformador. Cod.: GD313752-ES R3
- [14] Siemens Gamesa (2018). Power Curve G132 IIA 3.465 MW – 3.55 MW Power Upgrade. Cod.: GD337068 R5
- [15] Siemens Gamesa (2018). Grid Interconnection Performance Description. Cod.: GD357927-en R1
- [16] Cabo Leones III. Analizador instalado en el cuadro principal de Baja tensión.



Ilustración 1 Dato empírico de los Consumos Auxiliares

El valor promedio de los consumos de auxiliares es de **4,02KW**. Sin consumo de ventiladores transformador.