

Empresa
País
Proyecto
Descripción

Enel Green Power
Chile
Parque Eólico Renaico II
Informe de Mínimo Técnico



CÓDIGO DE PROYECTO	EE-2020-129
CÓDIGO DE INFORME	EE-EN-2023-0661
REVISIÓN	C
VERSIÓN	2



5 jun. 23



Este documento **EE-EN-2023-0661-RC** fue preparado para Enel Green Power por el Grupo Estudios Eléctricos.

Para consultas técnicas respecto del contenido del presente comunicarse con:

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

Ing. Andrés Capalbo
Sub-Gerente Dpto. Estudios
andres.capalbo@estudios-electricos.com

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

Informe realizado en colaboración con todas las empresas del grupo: **Estudios Eléctricos S.A., Estudios Eléctricos Chile, Estudios Eléctricos Colombia y Electrical Studies Corp.**

Este documento contiene 32 páginas y ha sido guardado por última vez el 28/07/2023 por César Colignon; sus versiones y firmantes digitales se indican a continuación:

Revisión	Fecha	Comentarios	Realizó	Revisó	Aprobó
A	05.06.2023	Para presentar. <u>Nota:</u> La Revisión A corresponde a la Versión 0 según codificación de Enel Green Power	MV/CiC	AC	PR
B	07.07.2023	Correcciones a observaciones del CEN: "COR-GO-DCO-MT-PE_Renaico_II" (versión 1) <u>Nota:</u> La Revisión B corresponde a la Versión 1 según codificación de Enel Green Power	CiC	AC	PR
C	28.07.2023	Correcciones a observaciones del CEN: "COR-GO-DCO-MT-PE_Renaico_II" (versión 2) <u>Nota:</u> La Revisión C corresponde a la Versión 2 según codificación de Enel Green Power	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 Fecha ensayo y personal auditor	4
	1.2 Medidores utilizados	4
	1.3 Nomenclatura utilizada	5
2	ASPECTOS NORMATIVOS.....	7
3	DESCRIPCIÓN DEL PARQUE.....	8
	3.1 Datos de los aerogeneradores.....	9
	3.2 Datos de los transformadores de bloque.....	10
	3.3 Datos del transformador principal	11
	3.4 Datos del transformador de Servicios Auxiliares	12
	3.5 Banco de condensadores	13
	3.6 Determinación de consumos de SSAA de planta.....	14
	3.7 Diagramas unilineales.....	15
4	DETERMINACIÓN DEL MÍNIMO TÉCNICO	18
	4.1 Mínimo Técnico considerando sólo un aerogenerador en servicio	19
	4.1.1 Potencia Bruta	20
	4.1.2 Potencia de Servicios Auxiliares	20
	4.1.3 Potencia de Pérdidas en la Central	21
	4.1.4 Potencia Neta	22
	4.1.5 Resultados.....	22
	4.2 Mínimo Técnico Parque Completo	23
	4.2.1 Consideraciones para la estimación de la Potencia Bruta.....	24
	4.2.2 Pérdidas en el transformador principal	27
	4.2.3 Pérdidas en red colectora de media tensión	28
	4.2.4 Potencia de Servicios Auxiliares	29
	4.2.5 Determinación de la Potencia Bruta.....	30
	4.2.6 Resultados.....	30
5	CONCLUSIONES.....	31
6	ANEXOS	32
	6.1 Certificado de calibración de medidor de potencia neta	32



1 INTRODUCCIÓN

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

El Parque Eólico Renaico II cuenta con una potencia instalada de 144.0 MW y se encuentra ubicado en la región de La Araucanía, situado al sur de la localidad de Renaico, perteneciente a la provincia de Malleco. El parque se vincula al SEN mediante un transformador de poder de relación 33 kV/220 kV ($\pm 10 \times 1.5\%$) de 130/160 MVA (ONAN/ONAF) de potencia aparente nominal. El lado de 220 kV del transformador de poder corresponde al punto de interconexión (POI) del parque.

El parque se vincula al SEN mediante el paño JT2 de la S/E Elevadora Renaico 220 kV.

El parque está constituido por treinta y dos (32) aerogeneradores marca Goldwind modelo GW155-4.5 V40R02C100 de 4.5 MW y 690 V de tensión nominal. Cuenta con 32 transformadores de bloque de 5.0 MVA de capacidad nominal y de relación de transformación 0.69 kV / 33 kV ($\pm 2 \times 2.5\%$). La red colectora está constituida por 7 circuitos colectores, en cuatro de ellos se conectan 5 aerogeneradores, en los tres restantes se conectan 4 aerogeneradores.

1.1 Fecha ensayo y personal auditor

Personal	Fecha de ensayo
Ing. Jaime Prieto	19 de mayo de 2023

Tabla 1.1 – Personal auditor

1.2 Medidores utilizados

Denominación	Marca	Modelo	N° de serie
Adquisidor	EE	16CH	EEEQ2010244

Tabla 1.2 – Equipos utilizados

Además de lo mostrado en la Tabla 1.2, se cuenta con datos complementarios del sistema controlador de planta adquiridos mediante el SCADA del parque el cual cuenta con mediciones cada 6 segundos para la producción de potencia activada cada aerogenerador y la velocidad de viento respectiva.



1.3 Nomenclatura utilizada

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

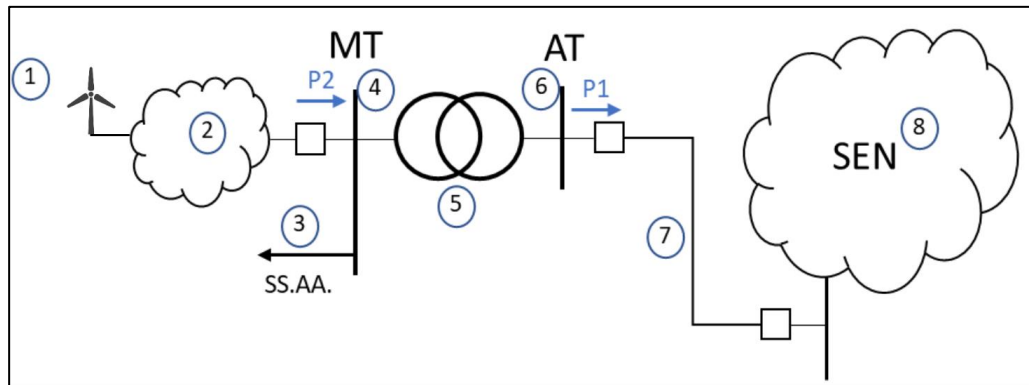


Figura 1.1 – Sistema equivalente parque eólico

- 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 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: Determinación de Mínimo Técnico en Unidades Generadoras” establece cómo determinar e informar la potencia activa bruta mínima con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al sistema. Este mínimo deberá obedecer sólo a restricciones técnicas de operación de la unidad

Se determinan valores de Mínimo Técnico, considerando distintas condiciones operativas del Parque Eólico Renaico II, entre las que se distinguen los siguientes escenarios:

- **Mínimo Técnico con el parque completamente operativo:** valor de potencia activa bruta mínima con la cual el parque puede operar considerando todos los aerogeneradores y elementos de la red colectora en servicio y en condiciones de operación estables.
- **Mínimo Técnico considerando sólo un aerogenerador en servicio:** valor de potencia activa bruta mínima entregada por un **único aerogenerador** que permite tener el menor valor posible de potencia activa neta según las condiciones técnicas de los equipos.



3 DESCRIPCIÓN DEL PARQUE

El Parque Eólico Renaico II se ubica en la región de La Araucanía, situado al sur de la localidad de Renaico, perteneciente a la provincia de Malleco.

Está constituido por treinta y dos (32) aerogeneradores marca Goldwind, modelo GW155-4.5 V40R02C100 de 4.5 MW de capacidad nominal y 690 V de tensión de operación nominal. La red colectora está compuesta por siete (7) circuitos colectores en MT, donde la disposición de los aerogeneradores dentro de dichos circuitos es la siguiente:

- Circuito N°1: Aerogeneradores WTG50, WTG51, WTG52, WTG53 y WTG54.
- Circuito N°2: Aerogeneradores WTG45, WTG46, WTG47, WTG48 y WTG49.
- Circuito N°3: Aerogeneradores WTG55, WTG56, WTG57, WTG58 y WTG59.
- Circuito N°4: Aerogeneradores WTG60, WTG61, WTG62, WTG63 y WTG64.
- Circuito N°5: Aerogeneradores WTG65, WTG66, WTG67 y WTG68.
- Circuito N°6: Aerogeneradores WTG69, WTG70, WTG71 y WTG72.
- Circuito N°7: Aerogeneradores WTG73, WTG74, WTG75 y WTG76.

Los diagramas unilineales del parque se presentan en la sección 3.7.



3.1 Datos de los aerogeneradores

El Parque Eólico Renaico II está constituido por treinta y dos (32) aerogeneradores Goldwind modelo GW155-4.5 V40R02C100 de 4.5 MW de potencia nominal y 690 V de tensión de operación nominal. Los parámetros nominales del aerogenerador se presentan en la Figura 3.1.

Los aerogeneradores son del tipo 4, es decir, son generadores de imanes permanentes y son controlados por dos convertidores back-to-back de potencia 5155 kVA cada uno.

Parameters		Value	Unit
Number of Phases		3	-
Rated Active Power(Pn)		4500	kW
Rated Voltage (phase to phase)		690	V
Nominal Frequency		50 / 60	Hz
Power Factor Range @ V,0.9~1.1pu	Default	-0.95(ind) ~ +0.95(cap)	-
	Optional	-0.9(ind) ~ +0.9(cap)	
Short-circuit Current (Maximum)		4649	A

Wind speed	Estimated measured result of own consumption power kW
0~cut-in speed	10.5
rated speed~cut-out speed	41

Figura 3.1 – Datos nominales de aerogenerador y conversor



3.2 Datos de los transformadores de bloque

El Parque Eólico Renaico II cuenta con treinta y dos (32) transformadores de bloque de 5 MVA de potencia aparente nominal cada uno. El devanado de baja tensión permite la interconexión de los aerogeneradores en 690 V y los devanados de media tensión permiten la inyección de potencia en la red de 33 kV. Los transformadores cuentan con cambiador de tomas el cual no puede ser operado bajo carga.

A continuación, se presentan en la Tabla 3.1 los parámetros más relevantes para el modelado de los transformadores.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	5000 kVA
Tensión nominal lado HV	33000 V
Tensión nominal lado LV	690 V
Grupo de conexión	Dyn11
Impedancia	7.5 %
Pérdidas en carga	35.1 kW
Pérdidas en vacío	7 kW
Posiciones de TAP	$\pm 2 \times 2.5\%$

Tabla 3.1 – Datos de los transformadores de bloque



3.3 Datos del transformador principal

El Parque Eólico Renaico II se interconecta al SEN por medio de uno de los devanados de 33 kV del transformador de poder de relación 33 kV / (220 kV $\pm$ 10 $\times$ 1.5%) y de capacidad 130/160 MVA (ONAN/ONAF) de potencia aparente nominal. Este equipo posee cambiador de tomas bajo carga.

A continuación, se presentan en la Tabla 3.2 los parámetros más relevantes para el modelado del transformador.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	130/160 MVA
Refrigeración	ONAN/ONAF
Tensión nominal lado HV	220 kV
Tensión nominal lado LV	33 kV
Grupo de conexión	YNd11
Impedancia	16.37 %
Pérdidas en carga	379.56 kW
Pérdidas en vacío	55.4 kW
Posiciones de TAP	$\pm$ 10 $\times$ 1.5%

Tabla 3.2 – Datos del transformador principal



3.4 Datos del transformador de Servicios Auxiliares

El Parque Eólico Renaico II cuenta con un transformador para consumos auxiliares de potencia nominal 100 kVA. Este transformador cuenta con un devanado de baja tensión de 0.4 kV y un arrollamiento de alta tensión de 33 kV. Este equipo posee un cambiador de tomas de carga manual que debe ser operado en vacío.

Los datos característicos del transformador se muestra en la Tabla 3.3.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	100 kVA
Refrigeración	ONAN
Tensión nominal lado HV	33 kV
Tensión nominal lado LV	0.4 kV
Grupo de conexión	DYn1
Impedancia	4.0 %
Pérdidas en carga	2.0 kW
Pérdidas en vacío	0.4 kW
Posiciones de TAP	$\pm 2 \times 2.5\%$

Tabla 3.3 – Datos del transformador de SSAA



3.5 Banco de condensadores

El Parque Eólico Renaico II dispone de dos bancos de condensadores que contribuyen a la inyección de potencia reactiva en el circuito de media tensión en 33kV de la planta. La capacidad nominal de cada uno de estos equipos es de 13.5 MVar.

A continuación, se presentan en la Tabla 3.4 los parámetros más relevantes para el modelado de cada banco de condensadores.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	13.5 MVar
Tensión nominal	33 kV
Frecuencia nominal	50 Hz

Tabla 3.4 – Datos del banco de condensadores



3.6 Determinación de consumos de SSAA de planta

En el documento "GRE.EEC.C.99.CL.W.07542.16.033.00" se detalla el dimensionamiento de las cargas de corriente alterna y corriente continua de los servicios auxiliares del parque. Un resumen de estos puede verse en las Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Para las pruebas realizadas, se ha considerado los servicios esenciales de corriente alterna (ver Tabla 3.5) y cargas permanentes de corriente continua (ver Tabla 3.6). Estos consumos corresponden a

Consumo de cargas esenciales de corriente alterna:

$$P_{SSAA,CA} = 25.035 \text{ kVA} * 0.85 = 21.2798 \text{ kW}$$

Consumo de cargas esenciales de corriente continua:

$$P_{SSAA,CC} = 2.605 \text{ kW}$$

Consumo total SSAA:

$$P_{tr,SSAA} = 21.2798 \text{ kW} + 2.605 \text{ kW} = 23.88 \text{ kW}$$

Cuadro Resumen de cargas CA	Total [kVA]
Cargas esenciales	25.035

Tabla 3.5 - Consumo de cargas esenciales de corriente alterna del Parque Eólico Renaico II

Cuadro Resumen de cargas CC	Total [kW]
Cargas permanentes	2.605

Tabla 3.6 - Consumo de cargas permanentes de corriente continua del Parque Eólico Renaico II



3.7 Diagramas unilineales

A continuación, se presenta en la Figura 3.2 el diagrama unilineal de la S/E Renaico. El recuadro azul muestra el transformador principal del parque.

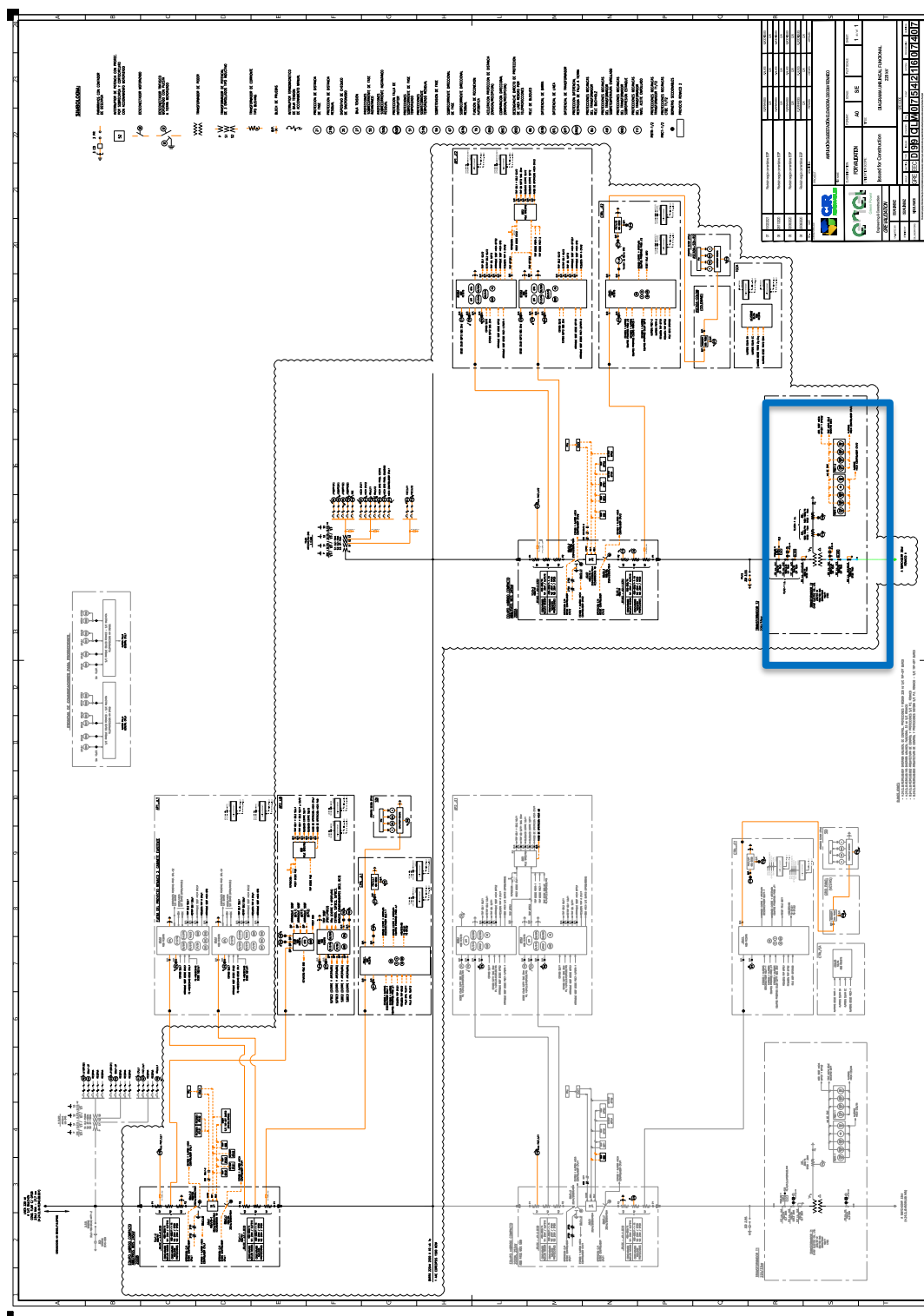


Figura 3.2 – Diagrama unilineal de S/E Renaico



En la Figura 3.3 se muestra la barra principal de 33 kV del Parque Eólico Renaico II, se observa la acometida de los siete alimentadores del parque.

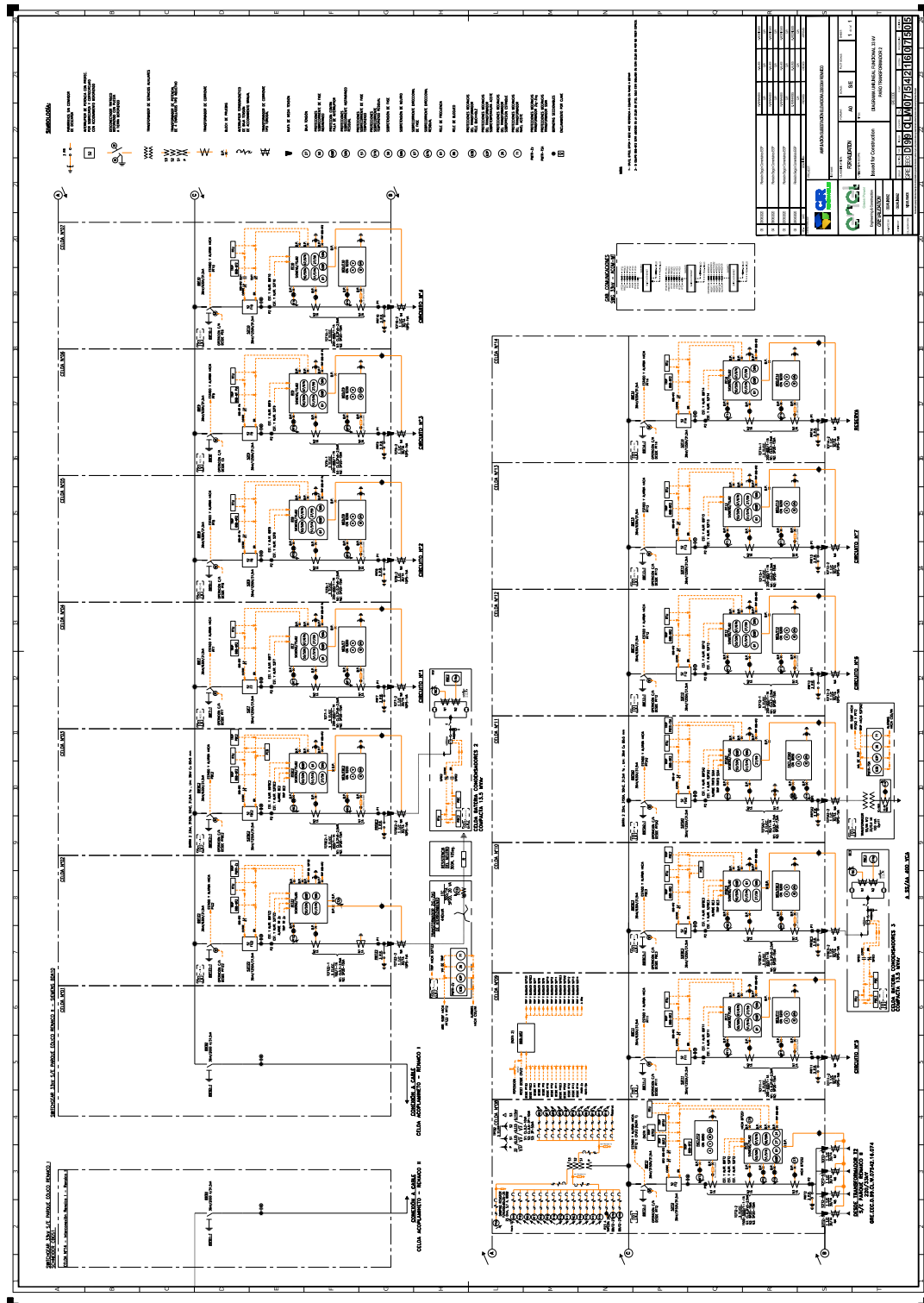


Figura 3.3: Diagrama unifilar barra principal de 33 kV Parque Eólico Renaico II



En la Figura 3.4 se muestra el detalle de cada uno de los circuitos colectores.

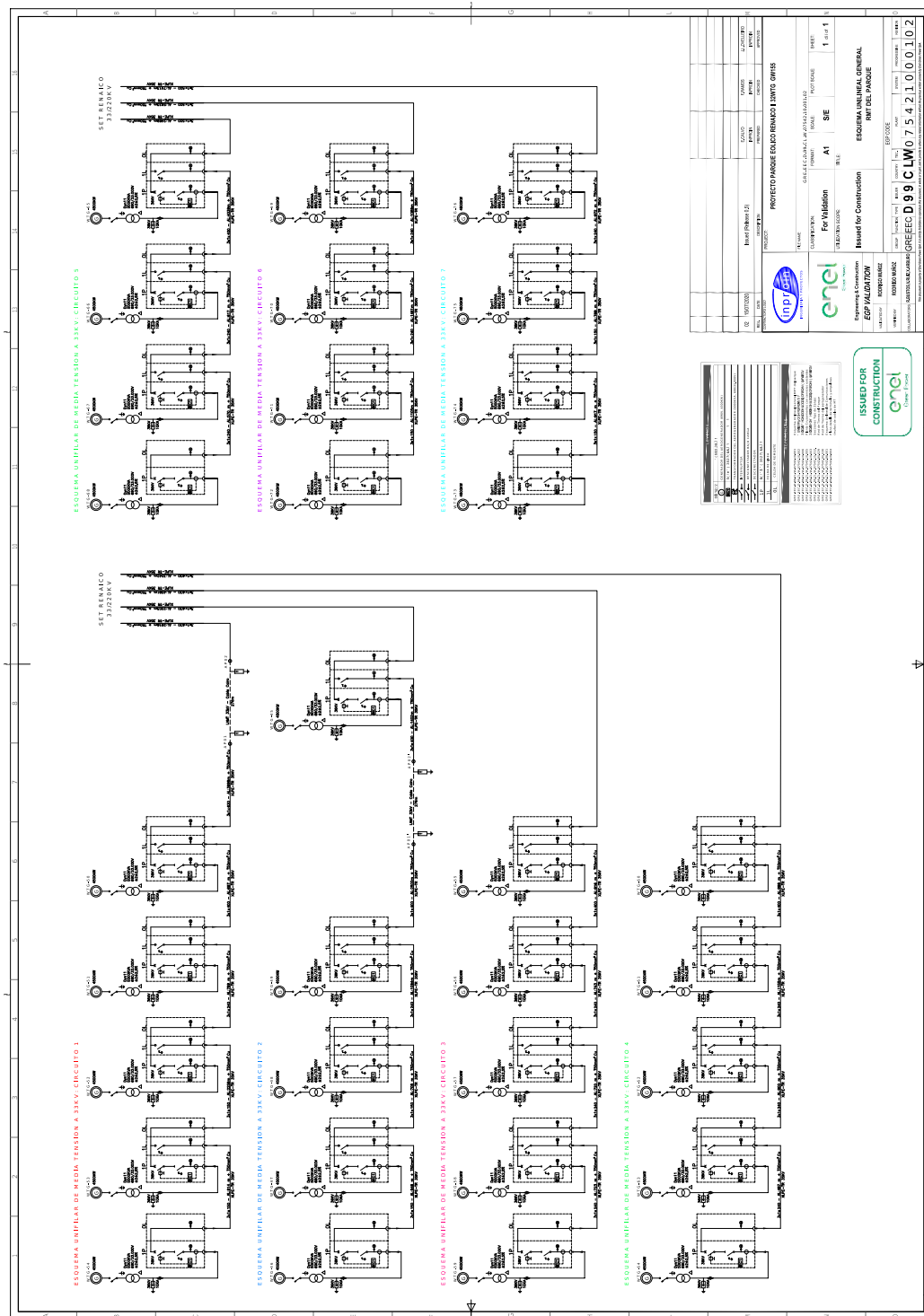


Figura 3.4 – Diagrama unilineal circuitos colectores



4 DETERMINACIÓN DEL MÍNIMO TÉCNICO

El Mínimo Técnico corresponde al menor valor de potencia activa bruta que el parque es capaz de mantener de manera estable.

Tal como se ha mencionado en el capítulo 2 se determina el **Mínimo Técnico con el parque completamente operativo** y el **Mínimo Técnico considerando sólo un aerogenerador en servicio**.

Para cada una de las pruebas de Mínimo Técnico realizadas, 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 [kW]	SS.AA. [kW]	Pérdidas en la central [kW]	Potencia Neta [kW]
Renaico 2	(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 Renaico II.
- (2) **Potencia de SS.AA.:** Corresponde a la suma de los consumos propios promedio de cada aerogenerador estimados en kW x Cantidad de aerogeneradores (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 lado de 220 kV del transformador principal del parque.



4.1 Mínimo Técnico considerando sólo un aerogenerador en servicio

El día 29 de mayo de 2023 se realizó el ensayo de Mínimo Técnico considerando sólo un aerogenerador en servicio. Para lograr esta condición se da orden de detención a todos los aerogeneradores del parque a excepción del aerogenerador 48. En esta condición todos los circuitos colectores y transformadores de bloque se mantienen energizados.

En la Figura 4.1 se muestra el ensayo de Mínimo Técnico considerando únicamente el aerogenerador 48 en servicio con una consigna de 1000 kW ya que se ha verificado que se alcanza un valor de potencia cercana 0 kW en el POI. En la gráfica se presenta la medición efectiva de potencia en los bornes del aerogenerador y la potencia neta en el POI.

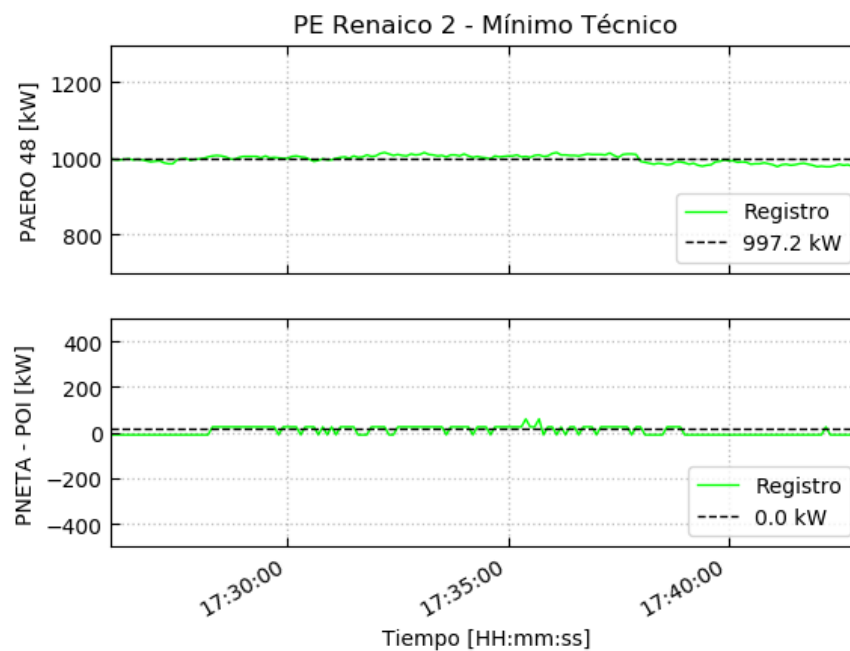


Figura 4.1 – Mínimo Técnico – Aerogenerador 48

A continuación, se realiza el cálculo de los valores de potencia según se desglosan en la Tabla 4.1.



4.1.1 Potencia Bruta

La medición de potencia del aerogenerador presentada en la Figura 4.1 se realiza en bornes del equipo y ya se encuentran descontados los consumos propios del aerogenerador. Estos consumos se estiman en 41 kW, según se observa en la sección 3.1. El valor de **Potencia Bruta** se obtiene según la siguiente expresión.

$$P_{bruta} = P_{AERO} + Consumos\ propios$$

$$P_{bruta} = 997.2\ kW + 41\ kW = 1038.2\ kW$$

4.1.2 Potencia de Servicios Auxiliares

La Potencia de Servicios Auxiliares corresponde a la suma de los consumos propios de cada aerogenerador estimados en kW x Cantidad de aerogeneradores más los Servicios Auxiliares de la central.

En primer lugar, se han estimado los consumos del transformador de servicios auxiliares ($P_{tr,SSAA}$) en 23.88 kW, según se presenta en la sección 3.6. Para el aerogenerador en servicio se estima un consumo de 41.0 kW, según se presenta en la sección 3.1.

En tanto, para determinar el valor de consumos propios de los aerogeneradores que se encuentran detenidos, se han replicado las condiciones de ensayo en el modelo de red desarrollado de DigSilent.

Cabe mencionar que se ha ajustado un despacho de 997.2 kW para el aerogenerador 48 y un valor de carga en el resto de los aerogeneradores con tal de obtener un valor de potencia 0.0 MW a la salida del parque (esto puede verse en el escenario de operación “Aerogenerador Individual” de la base de datos adjunta, documento: “EE-EN-2023-0661-RC_PE_Renaico_II_MT.pfd”).

El valor resultante de consumos propios de los aerogeneradores en servicio se presenta a continuación.

$$P_{aerosStandBy} = N^{\circ}\ AEROS\ StandBy\ x\ Cons\ StandBy$$

$$P_{aerosStandBy} = 31\ x\ 22.2\ kW = 688.2$$



En base a estos datos se procede a calcular la **Potencia de Servicios Auxiliares**.

$$P_{SSAA} = N^{\circ} \text{ AEROS activos } \times \text{ Cons Propios } + P_{aerosStandBy} + P_{tr,SSAA}$$

$$P_{SSAA} = 1 \times 41 \text{ kW} + 688.2 \text{ kW} + 23.88 \text{ kW} = 753.08 \text{ kW}$$

4.1.3 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 (kW) y de las pérdidas en el sistema colector de media tensión.

En base a las mediciones realizadas durante el ensayo de Mínimo Técnico, el cálculo de la Potencia de Pérdidas en la central se realiza considerando la diferencia entre la potencia bruta fornecida por el aerogenerador 48 y la **Potencia Neta Medida** ($P_{neta,med}$ ver Figura 4.1).

Además, se debe considerar el valor de potencia de servicios auxiliares, calculados en 390.38 kW.

La expresión para el cálculo de **Potencia de Pérdidas en la central** se presenta a continuación.

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

$$P_{perd,central} = 1038.2 \text{ kW} - 753.08 \text{ kW} - 0.0 \text{ kW} = 285.12 \text{ kW}$$

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

- Pérdidas en el 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 particular de carga particular del ensayo. La expresión de pérdidas del transformador principal es la siguiente.

$$P_{Perd,tr_{ppal}} = \text{Pérdidas}_{carga} + \text{Pérdidas}_{vacío}$$



Las pérdidas en carga en este escenario se pueden aproximar a 0.0 kW, ya que el nivel de carga del transformador principal es menor a 1%. Por lo tanto, las pérdidas en el transformador principal quedan dadas por la siguiente expresión.

$$P_{Perd,tr_{ppal}} = 0.0 \text{ kW} + 55.4 \text{ kW} = 55.4 \text{ kW}$$

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

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

$$P_{Perd,redMT} = 285.12 \text{ kW} - 55.4 \text{ kW} = 229.72 \text{ kW}$$

4.1.4 Potencia Neta

La Potencia Neta corresponde a la potencia inyectada en el lado de 220 kV del transformador principal. En este caso se obtiene un valor de **Potencia Neta** de 0.0 kW, considerando la operación de un único aerogenerador.

$$P_{neta} = 0.0 \text{ kW}$$

4.1.5 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. [MW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
Renaico 2	1.0382	0.75308	0.28512	0.0

Tabla 4.2 – Mínimo Técnico – Aerogenerador 48 – Parque Eólico Renaico II



4.2 Mínimo Técnico Parque Completo

El día 19 de mayo de 2023 se realizó el ensayo de Mínimo Técnico considerando el parque completamente operativo, es decir, con los 32 aerogeneradores en funcionamiento. Para lograr esta condición se debe buscar el valor mínimo de potencia que permite la operación estable y segura del parque con la totalidad de aerogeneradores en servicio.

En la Figura 4.2 se muestra el ensayo de Mínimo Técnico considerando todos los aerogeneradores del parque en servicio. Se presentan las mediciones de potencia neta, inyectada en el lado de 220 kV del transformador principal del Parque Eólico Renaico II, la cual posee un valor promedio de **13.22 MW**.

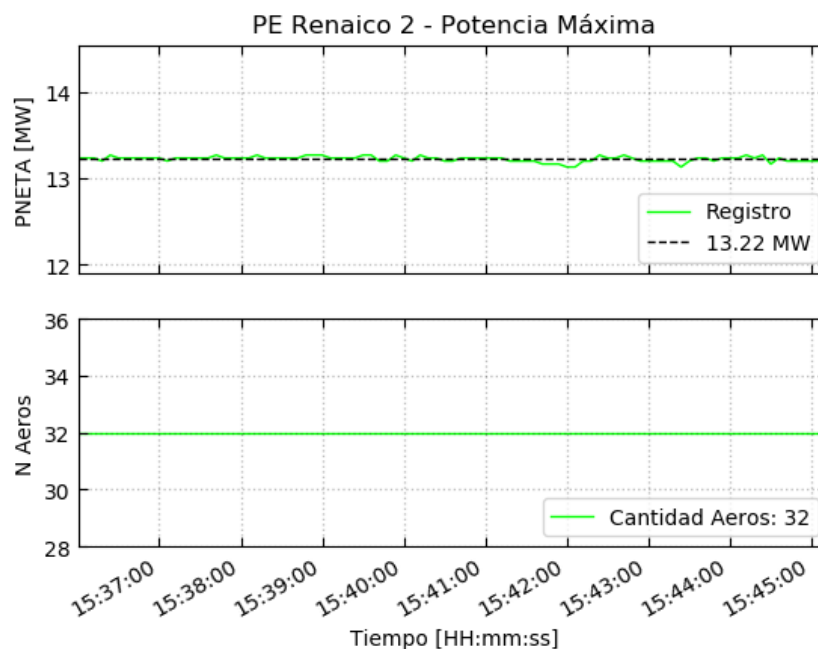


Figura 4.2 – Mínimo Técnico – Todos los aerogeneradores en servicio

A continuación, se realiza el cálculo de los valores de potencia según se desglosan en la Tabla 4.1.



4.2.1 Consideraciones para la estimación de la Potencia Bruta

Para poder determinar la potencia bruta es necesario calcular el valor de potencia de pérdidas totales del parque. La potencia de pérdidas totales considera las pérdidas en carga del transformador principal del parque, las pérdidas en red colectora de media tensión en la condición de ensayo y la potencia asociadas a consumos de servicios auxiliares.

$$P_{bruta} = P_{neta,med} + L_{Totales}$$

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

- P_{SSAA} : Potencia de servicios Auxiliares
- $P_{Perd,tr_{ppal}}$: Pérdidas en el transformador principal
- $P_{Perd,redMT}$: Pérdidas en red colectora de media tensión

$$L_{Totales} = P_{SSAA} + P_{Perd,tr_{ppal}} + P_{Perd,redMT}$$

Para determinar el valor de pérdidas asociada a cada elemento (P_{SSAA} , $P_{Perd,tr_{ppal}}$ y $P_{Perd,redMT}$), y de esta manera obtener el valor de potencia bruta del parque, se realizan simulaciones de flujos de potencias sobre el modelo completo del Parque Eólico Renaico II desarrollado en DigSilent. El modelo fue desarrollado y validado por Estudios Eléctricos y se presenta en la Figura 4.3. El mismo contempla las pérdidas en la red, se le agrega las pérdidas en los transformadores de cada aerogenerador y el consumo registrado de los servicios auxiliares de panta.

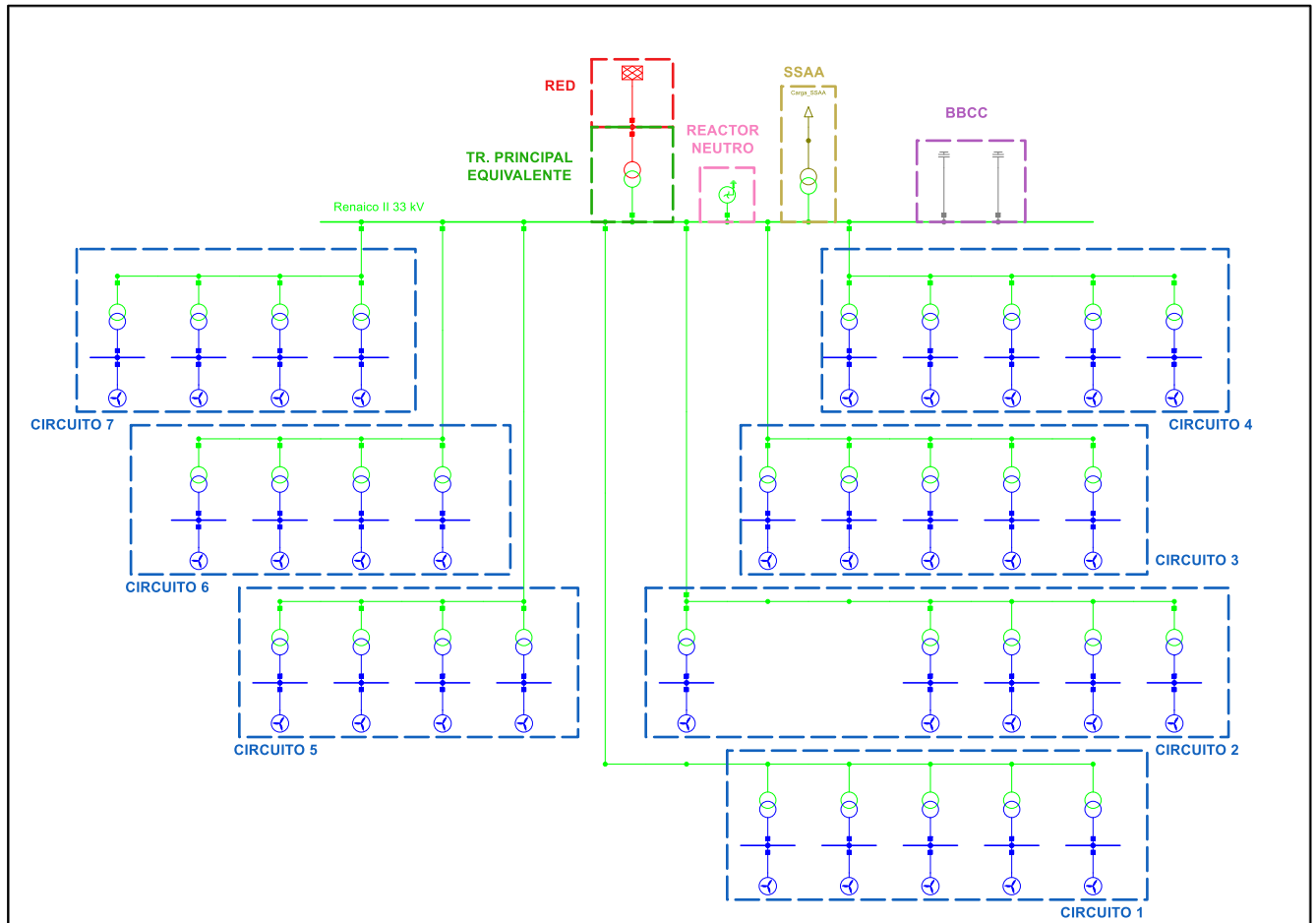


Figura 4.3 – Modelo desarrollado en DigSilent

En base a lo presentado en el capítulo 3.6, se ha estimado en 23.88 kW el consumo de servicios auxiliares, por lo que para las simulaciones se consideró que el parque alimenta una carga de SSAA de este valor.

Para realizar esta simulación se debe hallar la potencia generada por cada aerogenerador, y para esto se procede a despacharlos a todos por igual de modo de conseguir la potencia neta registrada en el punto de interconexión.

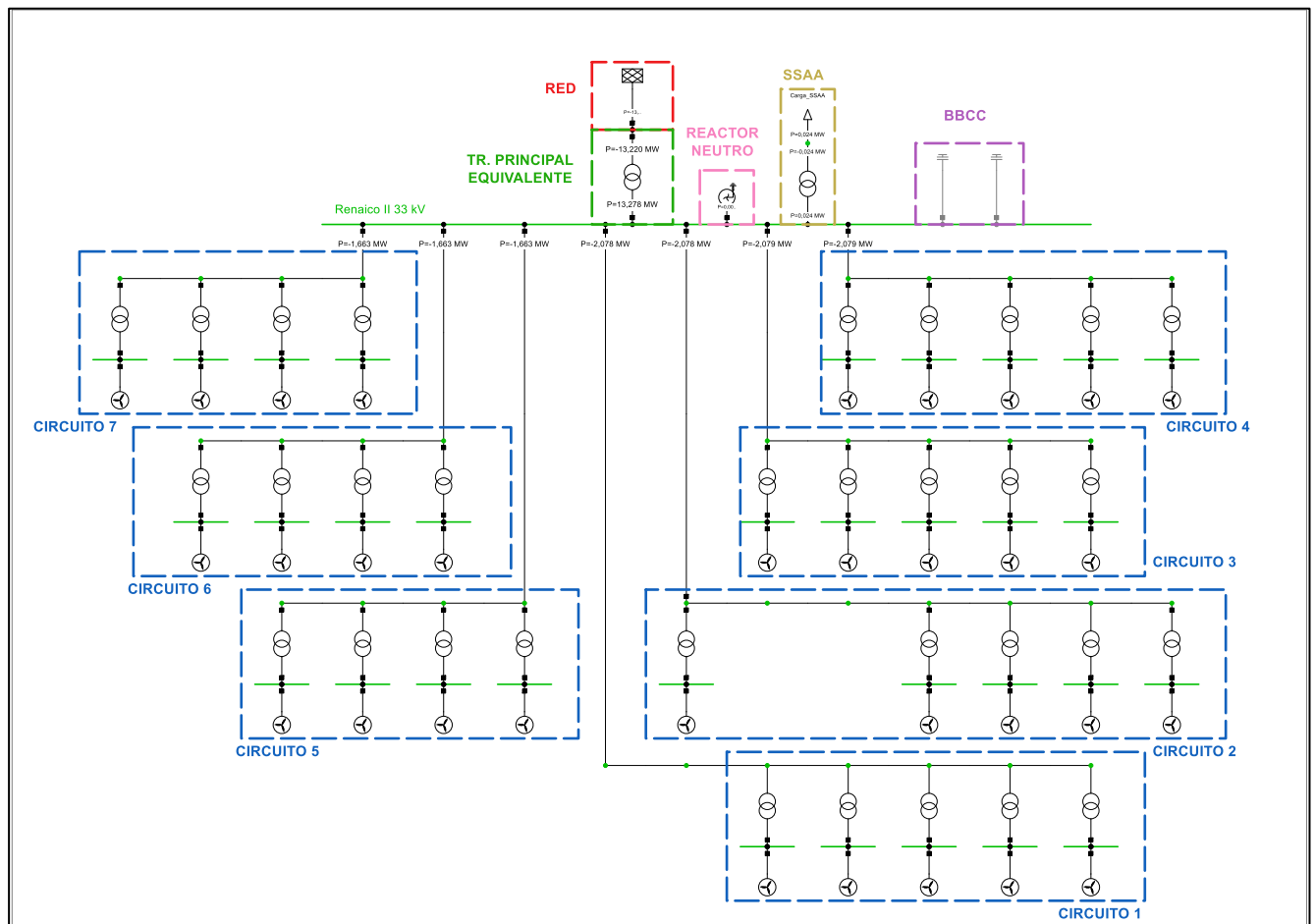


Figura 4.4 – Modelo desarrollado en DigSilent (flujo de potencia)

De acuerdo con los resultados de la simulación, se obtiene que la potencia de despacho para cada aerogenerador es de 0.42326 MW. Considerando que el parque tiene los 32 aerogeneradores en servicio, se puede determinar la potencia total de despacho de los aerogeneradores:

$$P_{Total,AERO} = 32 \times 0.42326 \text{ MW} = 13.544 \text{ MW}$$



4.2.2 Pérdidas en el transformador principal

A partir de los resultados del flujo de potencia presentados en la Figura 4.5 se pueden determinar las pérdidas asociadas al transformador principal de 220/33 kV. La potencia de pérdidas se calcula como la diferencia entre la potencia inyectada por la barra colectora en el lado de baja tensión (33 kV) del transformador principal y la potencia a la salida del lado de alta tensión (220 kV) del transformador principal.

$$P_{Perd,tr_{ppal}} = P_{iny,tr_{33kV}} - P_{sal,tr_{220kV}}$$

Considerando que el lado de alta tensión (220 kV) del transformador principal se corresponde con el punto de medición de la potencia neta, la expresión anterior también se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{Perd,tr_{ppal}} = P_{iny,tr_{33kV}} - P_{neta,med}$$

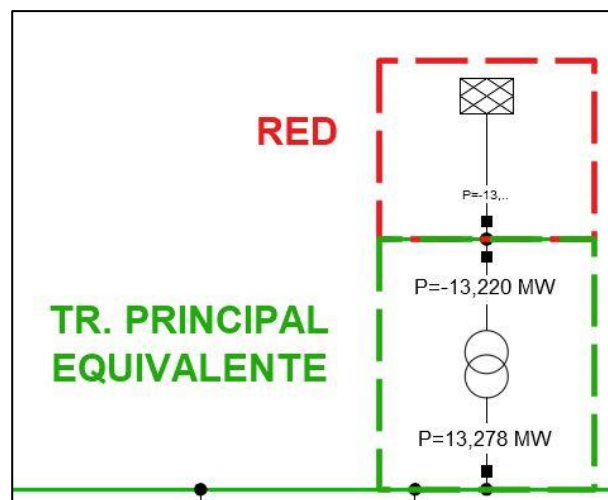


Figura 4.5 – Cálculo de flujos de potencia en transformador principal 220/33 kV

Considerando los datos presentados en la figura anterior, se calculan las pérdidas en el transformador principal:

$$P_{Perd,tr_{ppal}} = 13.278 \text{ MW} - 13.220 \text{ MW} = 58.0 \text{ kW}$$



4.2.3 Pérdidas en red colectora de media tensión

A partir de los resultados del flujo de potencia presentados en la Figura 4.4, se pueden determinar las pérdidas asociadas a la red colectora de media tensión. Este valor se determina como la diferencia entre la potencia total del despacho de los aerogeneradores de los aerogeneradores ($P_{Total,AERO}$) y la potencia inyectada en la barra colectora del parque de 33 kV.

$$P_{Perd,redMT} = P_{Total,AERO} - P_{iny,barra_{33kV}} \quad (1)$$

El valor de potencia total de despacho de los aerogeneradores ($P_{Total,AERO}$) es igual a 13.544 MW (ver capítulo 4.2.1).

Como puede observarse en el unifilar de la Figura 4.6, la potencia inyectada en la barra colectora “Renaico II 33 kV” se puede calcular a partir de la potencia aportada por los 7 alimentadores, es decir:

$$P_{iny,barra_{33kV}} = P_{A1} + P_{A2} + P_{A3} + P_{A4} + P_{A5} + P_{A6} + P_{A7}$$

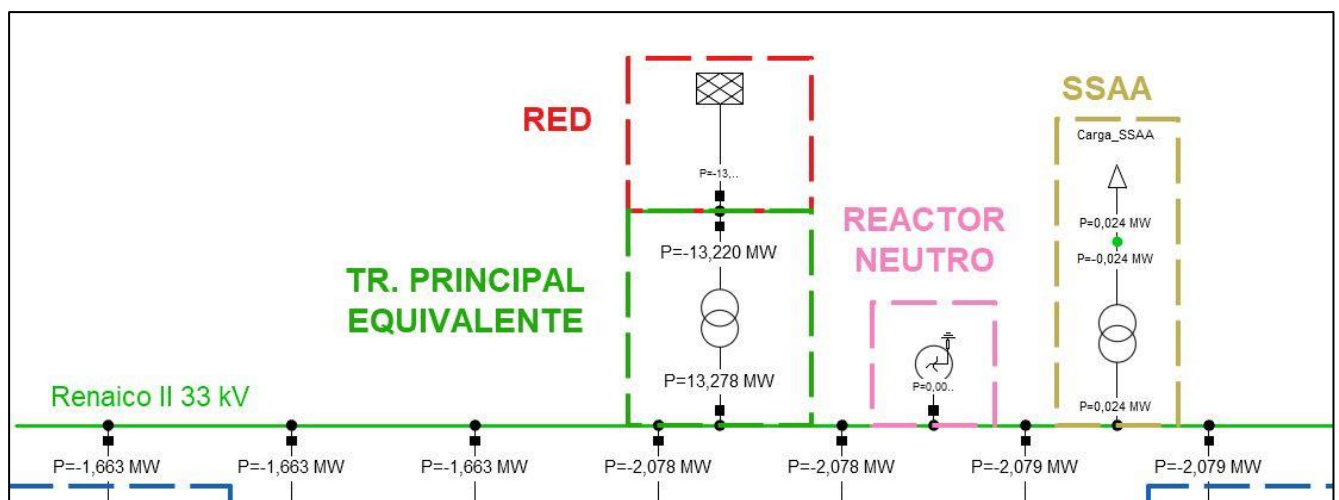


Figura 4.6 – Cálculo de flujos de potencia en barra de 33 kV

A partir de los resultados del flujo de potencia, se calcular el valor de potencia inyectada en la barra colectora de 33 kV:

$$P_{iny,barra_{33kV}} = 1.663MW + 1.663MW + 1.663MW + 2.078MW + 2.078MW + 2.079MW + 2.079MW$$

$$P_{iny,barra_{33kV}} = 13.303 MW$$



Utilizando la ecuación (1), con los valores de potencia total de despacho de los aerogeneradores ($P_{Total,AERO}$) y la potencia inyectada en la barra colectora del parque de 33 kV se determina el valor de potencia de pérdidas asociadas a la red colectora de media tensión:

$$P_{Perd,redMT} = 13.544 \text{ MW} + 13.303 \text{ MW} = 241 \text{ kW}$$

4.2.4 Potencia de Servicios Auxiliares

La Potencia de Servicios Auxiliares corresponde a la suma de los consumos propios de cada aerogenerador estimados en kW x Cantidad de aerogeneradores (considerando todos los aerogeneradores en servicio), más los Servicios Auxiliares del parque.

Según se observa en la Figura 3.1, el consumo interno de cada aerogenerador se estima en 41 kW. Adicionalmente, en base a lo presentado en el capítulo 3.6, se ha estimado en 23.88 kW el consumo de servicios auxiliares, por lo que para las simulaciones se consideró que el parque alimenta una carga de SSAA de este valor.

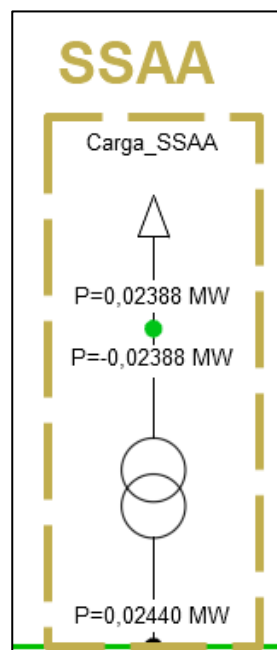


Figura 4.7 – Cálculo de flujos de potencia en transformador de SSAA

Como puede observarse en la Figura 4.7, los servicios auxiliares de la central ($P_{tr,SSAA}$) consumen una potencia de 24.4 kW (carga de 23.88 kW + pérdidas en el transformador de SSAA).



En base a estos datos se procede a calcular la **Potencia de Servicios Auxiliares**.

$$P_{SSAA} = N^{\circ} \text{ AEROS} \times \text{Consumos Propios} + P_{tr,SSAA}$$

$$P_{SSAA} = 32 \times 41 \text{ kW} + 24.4 \text{ kW} = 1336.4 \text{ kW}$$

4.2.5 Determinación de la Potencia Bruta

A partir de los valores de pérdidas determinados en los capítulos anteriores se puede determinar la potencia de pérdidas totales con la siguiente ecuación:

$$L_{Totales} = P_{SSAA} + P_{Perd,trppal} + P_{Perd,redMT}$$

$$L_{Totales} = 1336.4 \text{ kW} + 58.0 \text{ kW} + 241.0 \text{ kW} = 1635.4 \text{ kW}$$

Con este valor de pérdidas totales y la **Potencia Neta Medida** ($P_{neta,med}$, ver Figura 4.2), se puede determinar la potencia bruta del parque.

$$P_{bruta} = P_{neta,med} + L_{TOTALES}$$

$$P_{bruta} = 13.22 \text{ MW} + 1635.4 \text{ kW} = 14.85 \text{ MW}$$

Cabe mencionar que el valor de 14.85 MW de potencia bruta implica un despacho aproximado de 464 kW por cada aerogenerador, lo que se condice con la información del fabricante que garantiza un mínimo técnico estable del 10% de potencia para cada unidad (450 kW aproximadamente).

4.2.6 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. [MW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
Renaico 2	14.85	1.3364	0.299	13.22

Tabla 4.3 – Mínimo Técnico – Todos los aerogeneradores en servicio – Parque Eólico Renaico II



5 CONCLUSIONES

Se determinó mediante ensayos el **Mínimo Técnico con el parque completamente operativo** y el **Mínimo Técnico considerando sólo un inversor en servicio**. Los resultados se resumen a continuación.

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [MW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
Renaico 2	1.0382	0.75308	0.28512 ¹	0.0

Figura 5.1 – Mínimo Técnico – aerogenerador 48 – Parque Eólico Renaico II

Parque Eólico	Potencia Bruta [MW]	SS.AA. [MW]	Pérdidas en la central [MW]	Potencia Neta [MW]
Renaico 2	14.85	1.3364	0.299 ²	13.22

Figura 5.2 – Mínimo Técnico – Todos los aerogeneradores en servicio – Parque Eólico Renaico II

¹ Desglosado en 55.4 kW de pérdidas en el transformador principal y 229.72 kW de pérdidas en la red colectora de media tensión.

² Desglosado en 58.0 kW de pérdidas en el transformador principal y 241 kW de pérdidas en la red colectora de media tensión.



6 ANEXOS

6.1 Certificado de calibración de medidor de potencia neta

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
		
ESTUDIOS ELECTRICOS		
Estudios Electricos declara que el instrumento:		
Instrumento	Número de serie	Última calibración
Adquisidor Cirion 16CH	EE-EQ-2010-0244	22/07/2022
Fue calibrado siguiendo los lineamientos establecidos en el procedimiento EE-MP-2009-156_05 Control de Equipos habiéndose encontrado conforme y quedando habilitado para su uso.		
Para la calibración se emplearon los siguientes instrumentos patrón:		
Instrumento	Número de Serie	Última Calibración
Valija de Inyección OMICRON CMC 256-6	JG677S	29/11/2021
Fecha de evaluación: 22/07/22 Certificado número: EE-CI-2022-1120		
Nombre Inspector: Leiss, Jorge Firma: 		
Power System Studies & Power Plant Field Testing and Electrical Commissioning		

Figura 6.1 – Certificado de calibración de medidor de potencia neta