

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Análisis de cargabilidad del sistema de potencia de
una compañía minera**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Electricista

Elaborado por

Fernando Igor Perez Cortez

 [0009-0007-1408-3993](https://orcid.org/0009-0007-1408-3993)

Asesor

MSc. Roberto Rubén Ramirez Arcelles

 [0000-0002-1725-7019](https://orcid.org/0000-0002-1725-7019)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Pérez Cortez [1]
Referencia/Reference	[1] F. Perez Cortez, “ <i>Análisis de cargabilidad del sistema de potencia de una compañía minera</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2022.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Perez, 2023)
Referencia/Reference	Perez, F. (2023). <i>Análisis de cargabilidad del sistema de potencia de una compañía minera</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mi esposa Diana y a mis hijas Lucía y Brissa
por ser mi fuente de inspiración y motivación.*

*A mis padres Reynaldo y Ana, por su apoyo
incondicional durante mis años de estudiante.*

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio del sistema eléctrico de una compañía minera que luego de 20 años de operación se ve en la necesidad de implementar un Sistema de Bombeo de Relaves para su Planta Concentradora, el cual representa un incremento de su demanda eléctrica.

Con el fin de evaluar el impacto de la ampliación de carga, se realiza un modelado del sistema eléctrico actual y proyectado en el software DIGSILENT Power Factory para analizar el perfil de tensiones, factor de potencia, cargabilidad y niveles de corrientes de cortocircuito en diferentes escenarios de operación. Todo ello para garantizar que los equipos y la red continúen trabajando dentro de los parámetros normales de operación.

Los resultados del presente trabajo indican que el sistema de potencia de la compañía minera cuenta con los márgenes de reserva suficientes para afrontar el incremento de carga del Sistema de Bombeo de Relaves. Los perfiles de tensión y el factor de potencia del sistema se mantienen dentro de los límites aceptables, al igual que el nivel de carga en las líneas de transmisión y en los transformadores de Potencia. La cargabilidad de las barras de 23 kV fue analizada desde diferentes escenarios a fin de conocer la máxima corriente circulante, comprobando que los márgenes de reserva son suficientes. En cuanto a los niveles de cortocircuito del sistema, se evidencia que los valores están muy cercanos a los límites de capacidad de los equipos, por lo que se realizan recomendaciones para mejorar esta condición.

Palabras claves: Estudio eléctrico, sistemas de potencia, cargabilidad, minería

Abstract

In the present work, a study of the electrical system of a mining company is carried out, which after 20 years of operation sees the need to implement a Tailings Pumping System for its Concentrator Plant, which represents an increase in its electrical demand.

In order to evaluate the impact of the load expansion, a modeling of the current and projected electrical system is carried out in the DigSILENT Power Factory software to analyze the voltage profile, power factor, chargeability and short-circuit current levels in different scenarios. of operation. All this to guarantee that the equipment and the network continue to work within normal operating parameters.

The results of this work indicate that the power system of the mining company has sufficient reserve margins to face the increase in the load of the Tailings Pumping System. The voltage profiles and the power factor of the system remain within the acceptable limits, as well as the level of load in the transmission lines and in the Power transformers. The chargeability of the 23 kV bars was analyzed from different scenarios in order to know the maximum circulating current, verifying that the reserve margins are sufficient. Regarding the short-circuit levels of the system, it is evident that the values are very close to the capacity limits of the equipment, for which reason recommendations are made to improve this condition.

Keywords: Electrical study, power systems, chargeability, mining

Tabla de Contenido

Resumen	iv
Abstract	v
Introducción	xi
Capítulo I. Parte Introductoria del trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2.1 <i>Situación problemática</i>	1
1.2.2 <i>Problema principal</i>	1
1.2.3 <i>Problemas secundarios</i>	2
1.3 Objetivos del estudio.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.4 Antecedentes investigativos	3
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	4
2.1 Marco Teórico	4
2.1.1 <i>Representación de Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	4
2.1.2 <i>Valores por unidad</i>	8
2.1.3 <i>Flujo de potencia</i>	9
2.1.4 <i>Análisis de cortocircuito</i>	9
2.2 Marco Conceptual	10
2.2.1 <i>Descripción del proceso minero</i>	10
CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de investigación.....	17
3.1 Descripción del Sistema Eléctrico	17
3.1.1 <i>Subestación de Transmisión 220 kV</i>	17
3.1.2 <i>Subestación Principal Mina de 220 kV</i>	17
3.1.3 <i>Sistema de Distribución 23 kV</i>	18
3.2 Modelo del equipamiento eléctrico	20

3.2.1	<i>Líneas de Transmisión</i>	20
3.2.2	<i>Transformadores de Potencia</i>	20
3.2.3	<i>Sistema de Control del Factor de Potencia (PFC)</i>	21
3.2.4	<i>Demanda del sistema eléctrico</i>	24
3.3	Diagnóstico del Sistema de Potencia existente	28
3.3.1	<i>Definición de escenarios</i>	28
3.3.2	<i>Análisis de tensiones y factor de potencia</i>	32
3.3.3	<i>Análisis de cargabilidad</i>	33
3.3.4	<i>Análisis de cortocircuito</i>	35
3.4	Diagnóstico del Sistema de Potencia Proyectado	39
3.4.1	<i>Definición de escenarios</i>	41
3.4.2	<i>Análisis de tensiones y factor de potencia</i>	42
3.4.3	<i>Análisis de cargabilidad</i>	43
3.4.4	<i>Análisis de cortocircuito</i>	45
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	46
4.1	Comparación de resultados del sistema de potencia existente y proyectado	46
	Conclusiones	50
	Recomendaciones	52
	Referencias bibliográficas:	53
	Anexos	54
	Anexo 1: Configuración de los filtros de armónicos.....	1
	Anexo 2: Característica de los motores asíncronos	5
	Anexo 3: Resultados de simulaciones sin el proyecto.....	7
	Anexo 4: Resultados de simulaciones con el proyecto.....	21

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Características de las líneas de Transmisión.....</i>	20
Tabla 2	<i>Características de los transformadores de potencia.</i>	20
Tabla 3	<i>Características de los filtros de armónicos.....</i>	21
Tabla 4	<i>Potencia reactiva de los filtros de armónicos.</i>	22
Tabla 5	<i>Secuencia de ingreso y desconexión de los filtros de armónicos.....</i>	23
Tabla 6	<i>Tensiones de operación.</i>	24
Tabla 7	<i>Cuadro de demanda por secciones en 23 KV.....</i>	24
Tabla 8	<i>Escenarios para el análisis de tensión y factor de potencia.</i>	29
Tabla 9	<i>Carga por las barras de 23 kV.....</i>	30
Tabla 10	<i>Escenarios para análisis de cargabilidad en barra 23 kV.....</i>	31
Tabla 11	<i>Escenarios para análisis de cortocircuito.....</i>	32
Tabla 12	<i>Tensión en barras y factor de potencia.....</i>	33
Tabla 13	<i>Carga de líneas de 220 kV y Transformadores de Potencia.....</i>	34
Tabla 14	<i>Carga en barras de 23 kV.....</i>	34
Tabla 15	<i>Valores de la corriente de cortocircuito en barras de 23 kV.....</i>	37
Tabla 16	<i>Parámetros de los transformadores de la Planta SBR.....</i>	40
Tabla 17	<i>Parámetros de los motores de la Planta SBR.....</i>	41
Tabla 18	<i>Escenarios para el análisis de tensión y fdp con proyecto.....</i>	41
Tabla 19	<i>Escenarios para el análisis de cargabilidad en barra 23 kV con proyecto.....</i>	42
Tabla 20	<i>Escenarios para el análisis de cortocircuito con proyecto.....</i>	42
Tabla 21	<i>Tensión en barras y fdp con el proyecto.....</i>	43
Tabla 22	<i>Carga de líneas de 220 kV y transformadores de potencia con el proyecto.....</i>	43
Tabla 23	<i>Carga en barras de 23 kV con el proyecto.....</i>	44
Tabla 24	<i>Corriente de cortocircuito en barras de 23 kV con el proyecto.....</i>	45
Tabla 25	<i>Comparación de tensión en barras.....</i>	46

Tabla 26	<i>Comparación del factor de potencia.</i>	47
Tabla 27	<i>Comparación de carga de líneas 220 kV.</i>	47
Tabla 28	<i>Comparación de carga de transformadores de potencia.</i>	47
Tabla 29	<i>Comparación de la máxima corriente en barras de 23 kV.</i>	48
Tabla 30	<i>Comparación de corrientes de cortocircuito en barras de 23 kV.</i>	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Circuito equivalente por fase del generador síncrono.....	5
Figura 2 : Circuito equivalente por fase del transformador monofásico.....	5
Figura 3 : Circuito equivalente por fase de una línea de transmisión corta.....	6
Figura 4 : Circuito equivalente por fase de una línea de longitud media.....	7
Figura 5 : Malla de voladura en perforación.....	11
Figura 6 : Carguío de camión de acarreo.....	11
Figura 7 : Chancadora giratoria.....	12
Figura 8 : Dinámica de molienda al interior del molino.....	13
Figura 9 : Molino Gearless Mill Drive (GMD).....	14
Figura 10 : Molino de bolas.....	15
Figura 11 : Celdas de Flotación.....	16
Figura 12 : Diagrama de la Subestación de Transmisión que alimenta a la mina.....	18
Figura 13 : Diagrama unifilar de la Subestación Principal Mina.....	19
Figura 14 : Sistema eléctrico modelado en DIgSILENT.....	27
Figura 15 : Distribución de cargas en barras 23 kV.....	29
Figura 16 : Escenario equilibrado de distribución de cargas (T1T3S4PC).....	30
Figura 17 : Escenario equilibrado de distribución de cargas (T1T3S4PC).....	31
Figura 18 : Gráfica de la corriente circulante por las barras de 23 kV.....	35
Figura 19 : Motores asíncronos en media tensión modelados en el DIgSILENT.....	38
Figura 20: Diagrama unifilar del Sistema de Bombeo de Relaves.....	40
Figura 21 : Gráfica de la corriente circulante por las barras 23 kV con el proyecto.....	44

Introducción

El presente trabajo tiene como finalidad realizar un estudio eléctrico para verificar que la ampliación de carga de una compañía minera no impacte de forma negativa en su sistema eléctrico, principalmente en el sistema de barras de 23 KV de la Subestación Principal. Esta ampliación de carga esta referida a la construcción de un sistema de bombeo de relaves para su Planta Concentradora, el cual es necesario debido al incremento de nivel de la presa de relaves.

Con este fin se realizan estudios eléctricos para el análisis del perfil de tensiones, factor de potencia, cargabilidad y cortocircuito del sistema eléctrico existente y proyectado.

Para el modelado del sistema eléctrico se hace uso del software de simulación DlgSILENT Power Factory, así como de información de datos de placa de los equipos y registros de demanda histórica obtenidos del sistema SCADA.

El desarrollo de este trabajo se divide en 4 capítulos, que son:

- Capítulo I. Parte introductoria del trabajo
- Capítulo II. Marcos teórico y conceptual
- Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación
- Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.

Capítulo I. Parte Introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La compañía minera del estudio en cuestión se encuentra ubicada en la región de Ancash – Perú. Inició su operación comercial en el año 2001 con la producción de concentrado polimetálico. En la actualidad es uno de los mayores productores de cobre del mundo, con una producción anual aproximada de 450 mil TMF. Asimismo, tiene una demanda eléctrica de 125 MW y es considerado un gran consumidor de energía en el Perú. De acuerdo con sus planes de desarrollo, la compañía ha visto necesario instalar un sistema de bombeo de relaves para soportar el proceso productivo. Estas nuevas instalaciones representan un incremento de la demanda de energía y cambios topológicos en la red eléctrica, lo cual motiva en el corto plazo a realizar una evaluación del sistema eléctrico, especialmente del sistema barras de distribución de la Subestación Principal para garantizar que no se genere un impacto negativo.

1.2 Descripción del problema de investigación

1.2.1 *Situación problemática*

Luego de 20 años de operación, y debido al incremento de la cota de su presa de relaves, esta compañía minera se ve en la necesidad de realizar diversos proyectos de sostenimiento enfocados en garantizar un adecuado manejo de los relaves de la Planta Concentradora. Estas nuevas instalaciones comprenden un Sistema de Bombeo de Relaves que inicia en la planta concentradora, transportándolos a una cota superior, de aproximadamente 40 metros, para luego hacer una descarga por gravedad hacia la presa de relave. Esta nueva instalación representa un incremento de la demanda energía, así como nuevas conexiones de alimentadores al sistema de barras 23 kV de la Subestación Principal de esta mina.

1.2.2 *Problema principal*

¿El ingreso de la nueva carga del sistema de bombeo de relaves impactará negativamente en el sistema eléctrico de potencia de la compañía minera?

1.2.3 Problemas secundarios

¿Se cuenta con un modelo del sistema eléctrico de potencia existente de la compañía minera donde se pueda analizar el impacto que genera el ingreso de la nueva carga?

¿El perfil de tensiones y el factor de potencia del sistema eléctrico se mantendrán dentro de los parámetros normales de operación con el ingreso de la nueva carga?

¿La cargabilidad de las líneas de 220 kV, transformadores de potencia 220/23 kV y sistema de barras de 23 kV de la Subestación Principal se mantendrá dentro de límites recomendados de operación con el ingreso de la nueva carga??

¿Con el ingreso de la nueva carga los niveles de corriente de cortocircuito en barras de 23 kV sobrepasarán la capacidad de los equipos?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Verificar que el ingreso de la nueva carga del sistema de bombeo de relaves no impacte negativamente en el sistema eléctrico de potencia de la compañía minera.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el modelado del sistema eléctrico de potencia existente de la compañía minera para analizar el impacto que genera el ingreso de la nueva carga.
- Realizar un análisis del perfil de tensiones y del factor de potencia del sistema eléctrico para verificar que se mantendrán dentro de límites recomendados de operación con el ingreso de la nueva carga.
- Realizar un análisis de cargabilidad de las líneas de 220 kV, transformadores de potencia 220/23 kV y sistema de barras de 23 kV de la Subestación Principal para verificar que se mantendrá dentro de límites recomendados de operación con el ingreso de la nueva carga.
- Realizar un análisis de cortocircuito en barras de 23 kV para verificar que con el ingreso de la nueva carga los niveles de corriente de cortocircuito no sobrepasen la capacidad de los equipos.

1.4 Antecedentes investigativos

En el año 2011 la compañía minera del presente trabajo desarrolló un proyecto de expansión de sus operaciones. En la planta concentradora se realizó la instalación adicional de un molino SAG y de un molino de bolas, con lo cual se incrementó su capacidad de producción. También se realizó el reforzamiento de las redes eléctricas para soportar este incremento de demanda. Se instaló una línea de transmisión de 220 kV, adicional a la existente y un tercer transformador de potencia de 220/23 kV, el cual alimenta una tercera barra de distribución de 23 kV, denominada barra C.

En el año 2012 se desarrollaron estudios eléctricos, los cuales advirtieron de una futura limitación de la capacidad de cortocircuito de las celdas de las barras de 23 kV, como consecuencia del incremento de la potencia de cortocircuito del sistema eléctrico de la zona Centro-Norte del SEIN. De acuerdo con el estudio realizado, el escenario más crítico se presenta cuando se operan los 3 transformadores de potencia en paralelo con los 2 compensadores síncronos conectados a la barra de 23 kV. A raíz de las conclusiones del estudio, la compañía minera opta por mantener siempre un transformador y un compensador síncrono fuera de servicio para limitar así la corriente de cortocircuito.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Representación de Sistemas Eléctricos de Potencia

El análisis cuantitativo de los sistemas eléctricos de potencia hace necesario la utilización de una representación simplificada del sistema eléctrico, mediante símbolos normalizados que cuenten con la información de los elementos y estructuras que componen el sistema de potencia. Los sistemas eléctricos de potencia normalmente están constituidos por circuitos trifásicos que operan de forma balanceada. Esta representación puede ser simplificada a un circuito monofásico equivalente, conocido como diagrama unifilar (Grainger & Stevenson, 1996.).

La importancia de un diagrama unifilar es la representación clara y concisa de los datos significativos del sistema de potencia. El tipo de información contenida varía según el tipo de estudio a desarrollar, como por ejemplo flujo de potencia, cortocircuito, estabilidad, transitorios electromagnéticos.

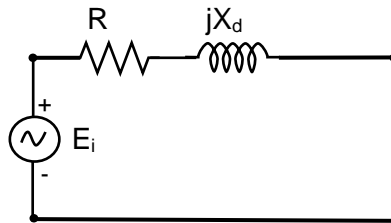
2.1.1.1 El Generador Síncrono. El generador síncrono produce energía eléctrica de corriente alterna a partir de energía mecánica de movimiento. Es el elemento clave del sistema eléctrico de potencia pues produce las energías solicitadas por las cargas, manteniendo la frecuencia y voltaje de la red en niveles estables para garantizar la continuidad de suministro (Grainger & Stevenson, 1996.)

Las dos partes principales del generador síncrono son estructuras ferromagnéticas que se encuentran en rotación relativa uno respecto a la otra. La parte estacionaria se denomina estator o armadura y tiene un devanado que transporta la corriente suministrada a las cargas. La parte que rota dentro del estator hueco, se denomina rotor, y a su devanado se le denomina devanado de campo, el cual se alimenta en corriente continua. El flujo resultante en el entrehierro, o espacio de aire que hay entre el estator y rotor, genera voltajes en las bobinas del devanado del estator y el par electromagnético entre el estator y rotor (Grainger & Stevenson, 1996.)

Para fines de análisis de flujo de potencia es necesario considerar los límites de potencia del generador dados en su curva de capacidad. En estado estacionario, se utiliza el circuito equivalente mostrado en la figura 1.

Figura 1

Circuito equivalente por fase del generador síncrono.

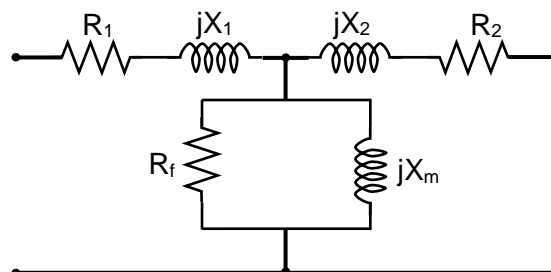


2.1.1.2 El Transformador. Los transformadores son los elementos de enlace entre las partes de la red eléctrica que se encuentran a diferentes voltajes (*Grainger & Stevenson, 1996.*). Estos elevan el voltaje producido en las plantas de generación, usualmente en el rango de los 18 – 24 kV, para su conexión con las líneas eléctricas del sistema de transmisión, que operan con voltajes de hasta 500 kV en el Perú. Así mismo disminuyen los voltajes de las redes de transmisión para su conexión con las redes de distribución y a los requeridos por las cargas industriales o residenciales, usualmente en baja tensión.

El circuito equivalente por fase en Y del transformador se muestra en la figura 2.

Figura 2

Circuito equivalente por fase del transformador monofásico.



Donde:

R1, R2: Resistencia de los devanados primario y secundario

X1, X2: Reactancia equivalente de los flujos de dispersión de las bobinas del transformador.

X_m : Reactancia equivalente de excitación, representa el flujo resultante en el núcleo.

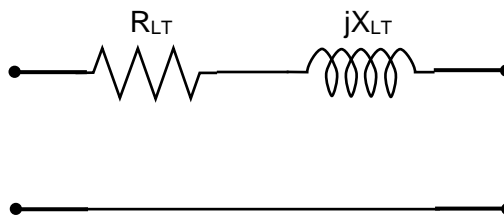
R_f : Resistencia equivalente de las pérdidas en el núcleo.

2.1.1.3 Línea de Transmisión. Las líneas de transmisión transportan la energía desde las plantas de generación hasta las redes de distribución o zonas de consumo. Para disminuir las pérdidas de transmisión se utilizan altos voltajes, siendo los más estándares en el Perú 138 kV, 220 kV y 550 kV. Las líneas de transmisión tienen longitudes diversas dependiendo de la distancia de los centros de carga y de la topología de red, por este motivo para su representación se utilizan modelos distintos en base a su longitud.

2.1.1.3.1 Líneas de transmisión cortas. Se consideran como líneas de transmisión cortas las líneas aéreas de 60 Hz que tienen una longitud menor a 80 km. En las líneas cortas el efecto de la capacitancia en derivación es tan pequeño que puede despreciarse, considerando solo la resistencia e inductancia en serie para obtener resultados con buena exactitud (Kindermann, 2010). En la figura 3 se muestra el modelo de impedancia serie para líneas cortas.

Figura 3

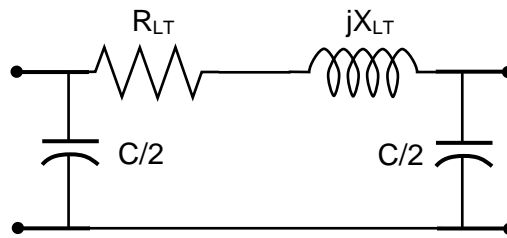
Circuito equivalente por fase de una línea de transmisión corta.



2.1.1.3.2 Líneas de transmisión medianas. Se consideran líneas de longitud media a las líneas con longitud entre los 80 km y 240 km. Para su representación se consideran los parámetros concentrados de la impedancia serie R y L, con la mitad de la capacitancia al neutro de la línea concentrada en cada terminal del circuito equivalente (Kindermann, 2010). En la figura 4 se muestra el circuito equivalente de una línea de longitud media.

Figura 4

Circuito equivalente por fase de una línea de longitud media.



2.1.1.3.3 Líneas de transmisión largas. La representación de líneas largas es más compleja, debido a que, para tener una representación exacta, es necesario considerar el hecho de que los parámetros de la línea están distribuidos uniformemente a lo largo de la línea (Kindermann, 2010). Sin embargo, es posible representar una línea larga con precisión mediante una red de parámetros concentrados, corregidos por las expresiones:

$$Z' = Z_c \frac{\sinh(\gamma \cdot l)}{\gamma \cdot l} \quad (1)$$

$$Y' = Y \frac{\tanh(\frac{\gamma \cdot l}{2})}{\frac{\gamma \cdot l}{2}} \quad (2)$$

Donde:

l : Longitud de la línea de transmisión.

γ : Constante de propagación.

A su vez la constante de propagación se indica por la expresión: $\gamma = \sqrt{(y \cdot z)}$

y : admitancia shunt por unidad de longitud

z : impedancia serie por unidad de longitud

2.1.1.4 Compensación reactiva. Son los elementos con los cuales se puede regular la tensión de red en un determinado punto del sistema. Pueden ser del tipo pasivo, si trabaja con valores constantes de Q (reactores o capacitores), o del tipo activo, si su valor de Q varía bajo algún esquema de control (FACTS).

2.1.1.5 Cargas. Existen distintos tipos de modelo de carga en el Sistema de Potencia.

Según el análisis a desarrollar estas pueden ser (Agüinsaca, 2019):

- Potencia constante.
- Admitancia constante.
- Corriente constante.

- Dependencia de la frecuencia.
- Combinación de ellas.

Para el análisis en estado estacionario usaremos el modelo de carga de potencia constante.

2.1.2 Valores por unidad

Dado que en el análisis de redes eléctricas existen elementos con distintos niveles de tensión, potencias nominales y valores de sus parámetros, se hace necesario normalizar sus ecuaciones en torno a la unidad. De este modo se define el valor por unidad como la relación entre el valor de la magnitud y el valor base de la misma magnitud escogida como referencia.

$$\text{Valor pu} = \frac{\text{Valor real de la magnitud}}{\text{Valor base de la magnitud}} \quad (3)$$

De este modo las magnitudes eléctricas quedarían de la siguiente manera:

$$V_{PU} = \frac{V}{V_B}, \quad Z_{PU} = \frac{Z}{Z_B}$$

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}, \quad Z_{PU} = \frac{Z \times S_B}{V_B^2}$$

Es común que los valores de impedancia en p.u. de los generadores y transformadores estén especificados en base los valores nominales de potencia y tensión de sus placas de características. En ese caso, para el análisis del sistema de potencia donde se encuentran conectados será necesario realizar un ajuste de los valores en por unidad de cada elemento para referirlos a los valores base de potencia y tensión del sistema analizar. Para ello se realiza el cambio de base de los valores de impedancia de cada elemento de acuerdo con la siguiente fórmula (Gonzales, 2015).:

$$Z_{elemento_{SISTEMA}}[pu] = \frac{Z_{elemento}[\Omega]}{Z_{B_{SISTEMA}}[\Omega]} \quad (4)$$

$$Z_{elemento_{SISTEMA}}[pu] = Z_{elemento_{PLACA}}[pu] \left(\frac{U_{B-elemento_{PLACA}}[KV]}{U_{B_{SISTEMA}}[KV]} \right)^2 \frac{S_{B_{SISTEMA}}[MVA]}{S_{B-elemento_{PLACA}}[MVA]} \quad (5)$$

2.1.3 Flujo de potencia

Se denomina flujo de potencia a la solución de estado estacionero de un sistema eléctrico de potencia que opera bajo ciertas condiciones preestablecidas en topología de la red, generación y demanda. Es decir, mediante el análisis de flujo de potencia se obtienen los datos de operación en estado estacionario de las tensiones en barra, potencia de generadores y flujo de potencia en líneas y transformadores que componen el sistema eléctrico en estudio. Los análisis de flujo de potencia son de gran importancia porque permiten (Gomez A. , 2002).:

- Realizar análisis de seguridad del sistema para identificar problemas de sobrecargas o de tensión, cuando ocurren cambios en la demanda o en la topología de la red.
- Establecer las características de operación de equipos de regulación automática de tensión, equipos de compensación reactiva, límites de transferencia de potencia en líneas de transmisión y límites de carga de transformadores, válidos para diferentes escenarios de operación de generación y demanda.
- Realizar la planificación y diseño de los proyectos de expansión de la red eléctrica, así como analizar el impacto del ingreso de nuevas instalaciones y/o cargas sobre el comportamiento en estado estacionario del sistema de potencia.

2.1.4 Análisis de cortocircuito

El análisis de cortocircuito consiste en determinar las magnitudes de las corrientes de falla en un determinado punto del sistema eléctrico con el fin de especificar las características de los elementos de protección que deberán instalarse para despejar la falla. Entre los equipos que son considerados como fuente de corriente de cortocircuito tenemos a los generadores y compensadores síncronos, aunque también los motores de inducción, que generalmente son cargas, se comportan como fuentes de corriente durante un corto tiempo de iniciada la falla. La magnitud de la corriente de cortocircuito dependerá de las características y cantidad de fuentes que alimentan la falla, así como de la resistencia que presente el propio circuito eléctrico. Esta oposición se denomina

impedancia de falla y depende de la configuración del sistema eléctrico y se calcula a partir de las impedancias de los componentes del sistema (Gomez D. , 2010).

Mediante los análisis de cortocircuito podemos determinar:

- Las características técnicas de los interruptores de potencia, que interrumpirán las corrientes de falla.
- Las características físicas de los componentes que conforman la aparamenta de la subestación.
- Los ajustes de los relés de protección.
- Los niveles de protección de implementos de seguridad para arcos eléctricos.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Descripción del proceso minero

La unidad minera en mención es una operación a tajo abierto, ubicada a una altura promedio de 4,300 msnm, en la Región de Ancash. La mina produce concentrados de cobre, zinc, molibdeno, plata y plomo, y en la actualidad es una de las 10 operaciones más grandes del mundo.

Esta compañía minera cuenta también con un puerto para la exportación de concentrados, el cual se encuentra ubicado en la provincia de Huarmey y está conectado a la mina a través de un mineroducto de 304 km de longitud.

2.2.1.1 Operaciones Mina. El ciclo de minado se lleva a cabo en el tajo de la mina y está conformado por las actividades de perforación, voladura, carguío y acarreo. En la actualidad el tajo de la mina tiene una profundidad aproximada de 800 m, con 3.2 km de largo y 2.8 km de ancho.

La perforación y voladura son las actividades que dan inicio al proceso de extracción de los minerales. Con el uso de máquinas perforadoras eléctricas, se realizan agujeros en el terreno, los cuales son luego rellenos con explosivos conectados electrónicamente a un dispositivo de detonación. La malla de explosivos es activada mediante una voladura controlada, la cual produce la fragmentación de la roca a un tamaño óptimo para su carguío y traslado.

Figura 5

Malla de voladura en perforación.



La roca fragmentada es cargada por medio de palas eléctricas gigantes, con capacidad de hasta 120 Tn, a camiones de acarreo con capacidad de carga de hasta 400 Tn, los cuales transportan el mineral hasta la Chancadora Primaria. Toda la flota de camiones y equipos auxiliares de mina son comandados desde un centro de control denominado como Dispatch.

Figura 6

Carguío de camión de acarreo.



Nota: fuente <https://www.mineria-pa.com/>

2.2.1.2 Chancado y Apilamiento. La roca fragmentada trasladada por los camiones de acarreo es depositada sobre la tolva de alimentación de la Chancadora primaria, donde se produce el chancado del material para reducir su tamaño. La planta está conformada por una chancadora giratoria, compuesta por un largo eje vertical oscilante que tiene un elemento de molienda de acero de forma cónica, el cual se asienta en un mango excéntrico. El giró excéntrico de la chancadora es impulsado por un motor eléctrico de 800 HP por medio de un contraeje. El ajuste de la excéntrica permite reducir la roca en fragmentos de hasta 5".

Figura 7

Chancadora giratoria.



Nota: fuente <https://www.flsmidth.com/>

El material chancado es transportado por una faja de aproximadamente 3 km de longitud hasta la planta Concentradora donde es depositado en pilas de almacenamiento de mineral conocidas como stockpiles.

2.2.1.3 Molienda. El subproceso de molienda consiste en la reducción del tamaño del mineral en partículas que permitan realizar la separación del mineral valioso de la ganga en el circuito de flotación, a donde llega en forma de pulpa (Roman, 2018)

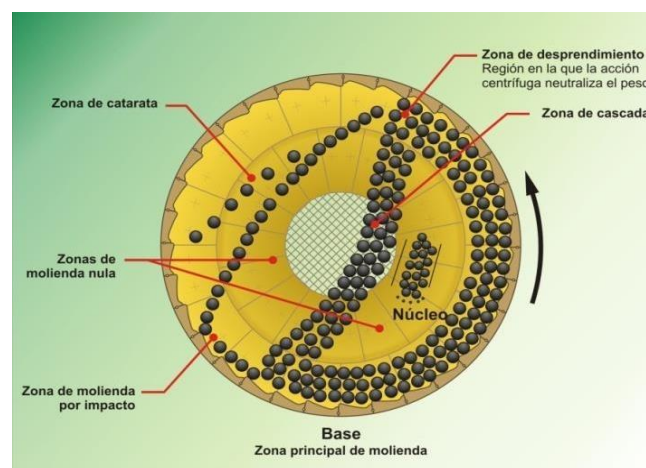
El circuito de molienda de Antamina está conformado por 2 molinos semiautógenos SAG (38' x 21') de 27000 HP (molienda primaria) y 4 molinos de bolas (24' x 36') de 15000 HP (molienda secundaria)

El mineral almacenado en los stockpiles ingresa al circuito de molienda por medio de fajas transportadoras, las cuales pasan por debajo de un alimentador rotatorio de bolas, que descarga de forma periódica bolas de acero de 5" de diámetro. El mineral y las bolas son introducidas en los molinos SAG a través de chutes de alimentación donde también se añade agua a presión y aditivos para el proceso.

La dinámica de molienda al interior del molino es una combinación de trituración y abrasión del mineral, lo cual se produce mediante los movimientos de catarata (impacto) y cascada (abrasión) que realizan las bolas de acero al girar en conjunto con el mineral dentro del molino. Para ello se requiere que el mineral sea mezclado con un volumen de agua adecuado para que este se adhiera a la superficie de las bolas, permitiendo así su trituración (Roman, 2018).

Figura 8

Dinámica de molienda al interior del molino.

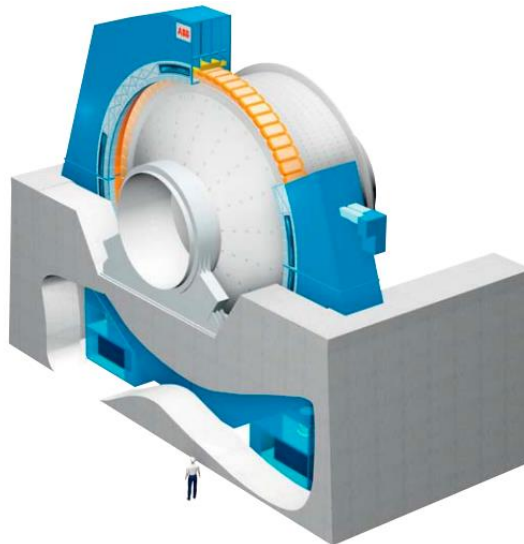


Nota: fuente (Eleazar, 2017)

El molino SAG es a la vez un motor síncrono del tipo gearless (sin engranaje), los polos del rotor se encuentran directamente instalados en el cuerpo del molino, y el estator está instalado en un toroide que lo rodea. Este tipo de configuración permite reducir una gran cantidad de componentes mecánicos convencionales como son catalinas, engranajes, piñones, etc. El molino SAG es alimentado eléctricamente por un ciclo convertidor de 12 pulsos que recibe la energía de un banco de transformadores de 23/1.6 KV.

Figura 9

Molino Gearless Mill Drive (GMD).



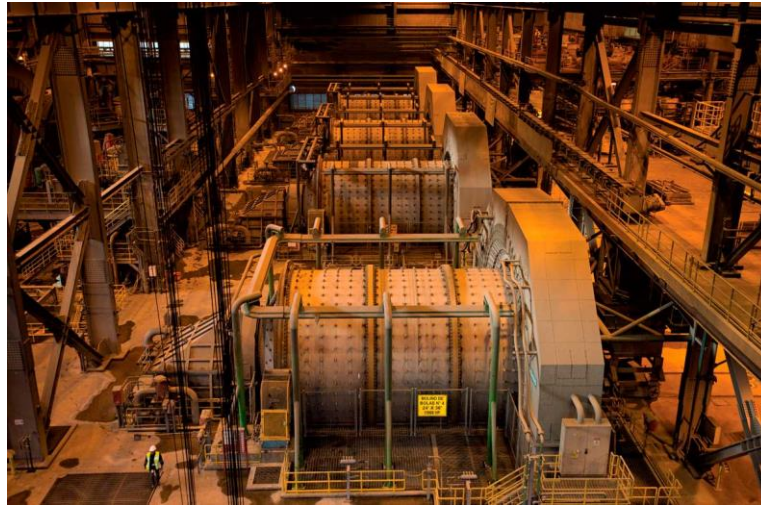
Nota: fuente <https://global.abb/group/en>

La descarga de los molinos SAG llega a unos cajones distribuidores de pulpa donde son bombeados a unos equipos hidrociclones que realizan la clasificación del mineral de acuerdo con su tamaño en un circuito cerrado. Los finos del mineral (overflow) son derivados al circuito de flotación mientras que los gruesos (underflow) ingresan a los molinos de bolas para su conminución.

Los molinos de bolas siguen una dinámica de molienda similar a los molinos SAG para lo cual utilizan también bolas de acero para la molienda, pero de menor tamaño. Tienen un diámetro menor que los SAG y una longitud mayor.

Figura 10

Molino de bolas.



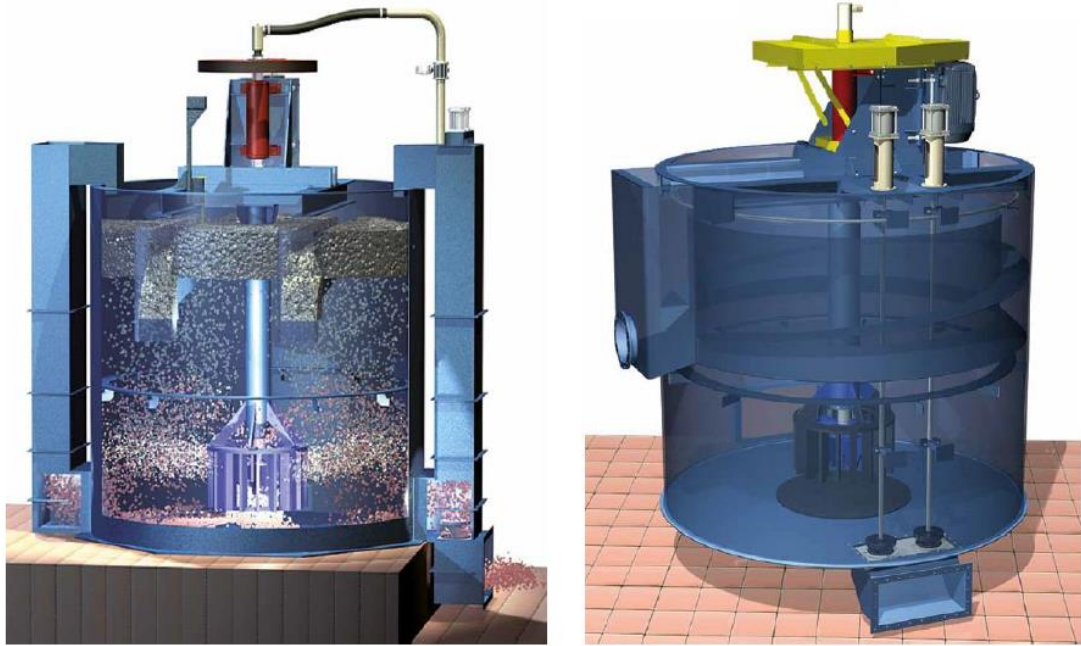
Nota: fuente <https://www.mineria-pa.com/>

2.2.1.4 Flotación. En el proceso de flotación se produce la separación de los minerales objetivos de los no deseados mediante un proceso fisicoquímico por medio de reactivos. La pulpa de mineral proveniente de la molienda es ingresada a las celdas de flotación, las cuales están dispuestas en bancos en serie y dispuestos en filas. Cada celda está provista de un agitador y de un alimentador de aire a presión, las partículas del mineral objetivo se adhieren a las burbujas de aire y son transportadas a la superficie de la celda formando espumas las cuales son derivadas por medio de canaletas para su recuperación. La ganga del mineral es evacuada por la parte inferior de la celda para ser conducidas a la relavera. Las celdas de flotación se dividen en celdas de cabeza (Rougher), Limpiadora (Cleaner) y de cola (Scavenger) (Roman, 2018).

2.2.1.5 Espesamiento y bombeo de concentrado. La pulpa proveniente de la flotación es enviada a los tanques espesadores para reducirles el contenido de agua para que sea adecuadamente transportada a través del mineroducto hacia el Puerto, donde es previamente filtrada y secada para su posterior embarque.

Figura 11

Celdas de Flotación.



Nota: fuente Metso Minerals

CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de investigación

3.1 Descripción del Sistema Eléctrico

3.1.1 Subestación de Transmisión 220 kV

El complejo minero es alimentado desde una Subestación de Transmisión, que forma parte del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), mediante dos líneas de transmisión de 220 kV de aproximadamente 52 km de longitud. Las líneas de transmisión se denominan en el presente trabajo como Línea 1 y Línea 2. La Subestación de Transmisión es del tipo anillo, cuenta también con otras 3 líneas en 220 kV de otros propietarios que forman parte del SEIN y con un equipo de compensación reactiva estático SVC de +90 (inductivo)/ -45 (capacitivo) MVAR de capacidad, el cual mantiene estable la tensión de alimentación de la mina.

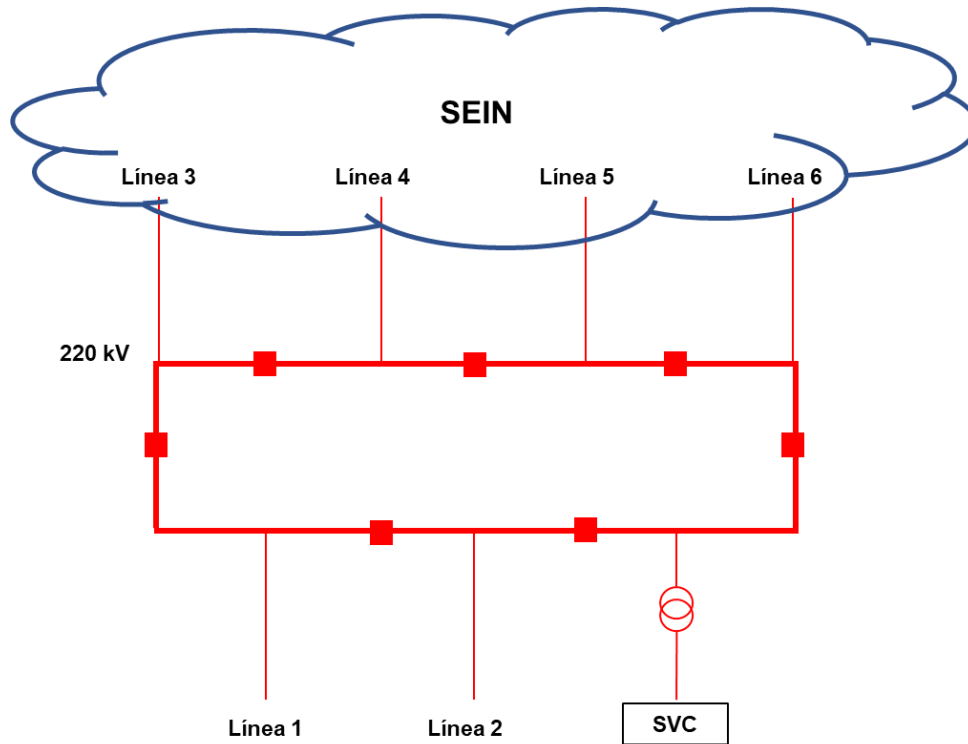
3.1.2 Subestación Principal Mina de 220 kV

La Subestación Principal del complejo minero recibe la alimentación de energía en 220 KV desde la subestación de transmisión por medio de las líneas 220 kV Línea 1 y Línea 2. Tiene una configuración de barra simple, desde donde se alimenta tres transformadores de potencia 220/23 kV de 75/100/125 MVA con regulación automática de tensión en el nivel de 23 kV. Cada transformador se conecta a un sistema de barras en 23 kV denominadas barras A, B y C.

En la figura 12 se muestra el sistema de transmisión 220 kV que alimenta al complejo minero.

Figura 12

Diagrama de la Subestación de Transmisión que alimenta a la mina.



3.1.3 Sistema de Distribución 23 kV

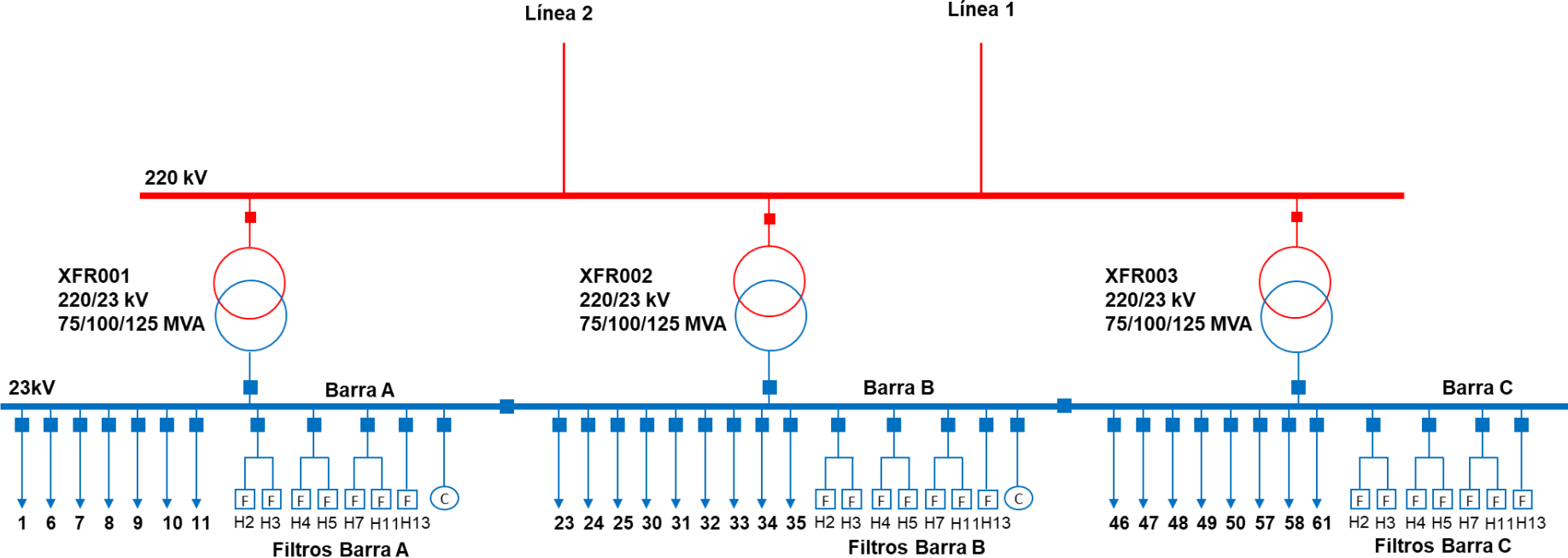
El sistema de distribución está conformado por tres barras en el nivel de 23 kV, denominadas barras A, B y C, que operan en condición normal de forma acopladas en serie, formando una configuración de barra simple. Las cargas de la Subestación Principal Mina conectadas al sistema de barras 23 kV son las siguientes:

- 02 compensadores síncronos de 15 MVAR cada uno, para la regulación fina del factor de potencia.
- 03 paquetes de filtros de 34.8 MVAR cada uno, sintonizados para filtrar los armónicos de orden 2, 3, 4, 5, 7, 11 y 13, para la regulación gruesa del factor de potencia.
- 24 alimentadores de carga para la distribución de energía al tajo de la mina, la planta concentradora y demás facilidades del complejo minero.

En la figura 13 se muestra el diagrama unifilar correspondiente a la Subestación Principal Mina.

Figura 13

Diagrama unifilar de la Subestación Principal Mina.



3.2 Modelo del equipamiento eléctrico

3.2.1 Líneas de Transmisión

Las características de las Líneas de Transmisión de 220 kV que alimentan al complejo minero son las indicadas en la tabla 1.

Tabla 1

Características de las líneas de Transmisión.

Línea de transmisión	Código	Capacidad (MVA)	Longitud (km)	Tensión (kV)
LT SE Transmisión – SE Principal	Línea 1	180	52.08	220
Mina	Línea 2	180	52.08	220

3.2.2 Transformadores de Potencia

Las Subestación Principal Mina cuenta con tres transformadores de 220/23 kV con una capacidad de 75/100/125 MVA cada uno. En condiciones de operación normal, dos transformadores se encuentran en servicio y uno queda fuera de servicio como reserva, esto debido a las limitaciones de corriente de cortocircuito existente en las barras de 23 kV y como estrategia para el mantenimiento de los equipos. Las características de los transformadores de potencia se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Características de los transformadores de potencia.

Característica	XFR-001	XFR-002	XFR-003
Potencia ONAN (MVA)	75	75	75
Potencia ONAF 1 (MVA)	100	100	100
Potencia ONAF 2 (MVA)	125	125	125
Tensión (kV)	220/23	220/23	220/23
Grupo de Conexión	Dyn1	Dyn1	Dyn1
Impedancia de Cortocircuito (%)	8.49	8.55	8.75
Cambiador de tomas HV	1-3 x 2,5%	1-3 x 2,5%	1-3 x 2,5%
Cambiador de tomas LV	±16 x 0.625%	±16 x 0.625%	±16 x 0.625%

3.2.3 Sistema de Control del Factor de Potencia (PFC)

La Subestación Principal cuenta con un sistema automático de control del factor de potencia el cual está ajustado para mantener un factor de potencia constante de 0.96 inductivo en la barra de 220 kV. El PFC está conformado por los tres paquetes de filtros de armónicos de aproximadamente 35 MVAR cada uno, conectados en las barras de 23 kV A, B y C y por dos compensadores síncronos de 15 MVAR. Como se ha indicado, cada paquete de filtros está conformado por filtros de armónicos de 2°, 3°, 4°, 5°, 11° y 13° orden; estos bancos de filtros de armónicos son la compensación reactiva de las cargas de la Mina, principalmente de los molinos de la planta concentradora y a su vez regulan el contenido armónico producido por los ciclo-convertidores de los molinos SAG y de Bolas. En la tabla 3 se muestran las características de los elementos que conforman los filtros de armónicos, cuyos circuitos eléctricos de configuración se muestran en el Anexo A (Configuración de los Filtros de Armónicos).

Tabla 3

Características de los filtros de armónicos.

Filtro	Capacitancia		Inductancia (mH)	Resistencia (ohm)
	C1 (µF)	C2 (µF)		
Filtro 2°	87	29	81	350
Filtro 3°	232	29	31	120
Filtro 4°	217	14.5	33	120
Filtro 5°	696	29	10.1	350
Filtro 7°	14.5	-	10	350
Filtro 11°	29	-	2	120
Filtro 13°	29	-	1.7	150

En operación con carga normal por lo menos dos bancos de filtros de armónicos están en servicio en conjunto con un compensador síncrono, el cual realiza la regulación fina del factor de potencia. Asimismo, un compensador síncrono siempre queda fuera de servicio como reserva, para no elevar la corriente de cortocircuito en las barras de 23 kV. En la tabla 4 se muestran las potencias reactivas nominales de los bancos de filtros de armónicos

Tabla 4*Potencia reactiva de los filtros de armónicos.*

Barra	Celda	Nombre	Potencia reactiva (MVAR)	
Barra A	A	Filtro 1A (H2)	5.9	
		Filtro 1A (H3)	5.8	
	2	Compensador Síncrono 1	15.0	
	3	Filtro 2A (H4)	2.9	
		Filtro 2A (H5)	5.8	
	4	Filtro 3A (H7)	3.0	
		Filtro 3A (H11)	5.8	
	5	Filtro 4A (H13)	5.8	
	Barra B	26	Compensador Síncrono 2	15
		27	Filtro 2B (H4)	2.9
Filtro 2B (H5)			5.8	
28		Filtro 3B (H7)	3.0	
		Filtro 3B (H11)	5.8	
29		Filtro 4B (H13)	5.8	
36		Filtro 1B (H2)	5.9	
		Filtro 1B (H3)	5.8	
Barra C		51	Filtro 1C (H2)	5.9
			Filtro 1C (H3)	5.8
	52	Filtro 2C (H4)	2.9	
		Filtro 2C (H5)	5.8	
	53	Filtro 3C (H7)	3.0	
		Filtro 3C (H11)	5.8	
	54	Filtro 4C (H13)	5.8	

La filosofía de operación del PFC se basa en el control del factor de potencia total del complejo minero en valor consigna de 0.96 inductivo. Para el ello, el sistema PFC calcula el valor actual de la potencia reactiva requerida (Q), de acuerdo con la siguiente fórmula (Siemens AG, 2011).:

$$Q_{requerido} = Q_{actual} - Q_{permitido} \quad (6)$$

$$Q_{permitido} = P_{actual} \times (\tan(\arccos(0.96))) = 0.29 \times P_{actual} \quad (7)$$

De acuerdo con el valor de Qrequerido obtenido, el sistema PFC controla la potencia reactiva entregada por el Compensador Síncrono y la conexión/desconexión de los filtros de armónicos en 23 kV.

El orden de ingreso de los filtros se realiza en forma ascendente y considerando la prioridad de conexión configurada. Es decir, si el paquete de filtros de la Barra A se encuentra con la prioridad seleccionada, ingresarán todos los filtros de la barra A en forma ascendente, luego los filtros de la barra C y posteriormente los de la B. Sí la prioridad fuese los filtros de la Barra B, ingresarán en forma ascendente los filtros de la B, luego los de la Barra C y finalmente los de la Barra A.

En la tabla 5. se resume la secuencia explicada.

Tabla 5

Secuencia de ingreso y desconexión de los filtros de armónicos.

Secuencia de ingreso filtros	Secuencia de desconexión	Secuencia de ingreso por barra
De menor a mayor orden	De mayor a menor orden	Por prioridad seleccionada, en sentido horario
2°/3°, 4°/5°, 7°/11° y 13°	13°, 11°/7°, 5°/4°, 3°/2°	Prioridad A: A, B, C Prioridad B: B, C, A Prioridad C: C, A, B

El sistema es capaz de realizar el control del fdp por barra en caso de que los interruptores de acople de barras 23 kV se encuentren abiertos.

Tensiones de Operación

Las tensiones de operación de las principales barras en la zona de influencia de la red se han considerado de acuerdo con lo siguiente:

- La tensión de operación de la SE Trasmisión es controlada por el SVC con un valor de ajuste de 224 kV (1.02 p.u.).
- La tensión de distribución en las barras de 23 kV está controlada por los reguladores automáticos bajo carga de los transformadores de potencia a un valor de 23.2 kV (1.09 p.u.).

En la tabla 6. se muestran las tensiones de operación consideradas.

Tabla 6*Tensiones de operación.*

Barra	Tensión (KV)
SE Transmisión	224
SE Principal Mina	220
Barra 23 kV	23.2

3.2.4 Demanda del sistema eléctrico

La demanda del complejo minero se caracteriza por tener un alto factor de carga, siendo un consumidor importante en los periodos de punta del SEIN. Para la caracterización de la demanda se han considerado los registros de consumo de energía cada 15 minutos del primer cuatrimestre del 2021 y se han seleccionado los valores de cada alimentador correspondientes con la demanda máxima de mina reportada en ese periodo. En la Tabla 7 se muestra el cuadro de demanda por secciones en 23 kV.

Tabla 7*Cuadro de demanda por secciones en 23 KV.*

Barra	Sección	Nombre	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)	
Barra A	1	Mina (1)	0.4	0.1	
	6	Molienda (1)	5.6	5.9	
	7	Flotación Zinc y Moly (1)	5.6	4.7	
	8	SAG Mill N°1	15.4	11.9	
	9	Ball Mill N°1	9.9	10.1	
	10	Mineroducto (1)	1.2	0.4	
	11	Planta de Pebbles	0.5	0.5	
	12	Reserva			
	13	Reserva			
	Barra B	23	Chancadora Primaria y Stacker (1)	4.6	4.6
		24	Agua Recuperada	8.6	4.0
		25	Nuevo Campamento	4.2	0.4
		30	Ball Mill N°2	10.1	8.1
31		Ball Mill N°3	9.3	8.1	
32		Molienda (2)	5.7	6.7	
33		Mina (2)	2.3	1.6	
34		Flotación Zinc y Moly (2)	5.5	4.6	
35		Mineroducto (2)	1.4	0.7	

Barra	Sección	Nombre	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVAr)
Barra C	46	Stacker (2)	1.2	0.7
	47	SAG Mill N°2	14.0	12.7
	48	Ball Mill N°4	9.8	8.5
	49	Flotación Cobre (1)	0.5	0.1
	50	Flotación Cobre (2)	4.2	2.3
	55	Reserva		
	56	Reserva		
	57	Flotación Zinc	1.3	0.4
	58	Planta de Moly	0.1	0.1
	59	Reserva		
	60	Reserva		
	61	Mina (3)	14.7	6.4
	62	Reserva		
	Total			136.0

Con la información contenida en las tablas del 1 al 7, se ha modelado la red eléctrica de potencia de la unidad minera utilizando el software DlgSILENT Power Factory, versión 15.7. En el modelado realizado se han tenido además las siguientes consideraciones:

- Para fines de simplificación se ha modelado el SEIN como una red equivalente vista desde la Subestación de Transmisión que alimenta a la mina. Para ello se ha considerado una tensión de operación de 224.4 kV (1.02 p.u.), debido a la regulación de tensión que ofrece el equipo SVC en ese punto, y una potencia de cortocircuito trifásica de 1844 MVA correspondiente al escenario de estiaje en máxima demanda del año 2021, tomada del archivo de base de datos que publica el COES.
- Se activa el control automático de los taps de los transformadores de potencia, con una tensión de referencia de 23.2 kV en el lado de baja.
- Las barras de 23 kV se han modelado conformadas por secciones de línea para poder obtener una mejor representación física del flujo de potencia que se presenta en cada tramo de barra.
- Los puntos de conexión física de las acometidas de los transformadores de potencia con las barras de 23 kV van de acuerdo con lo siguiente: acometida del

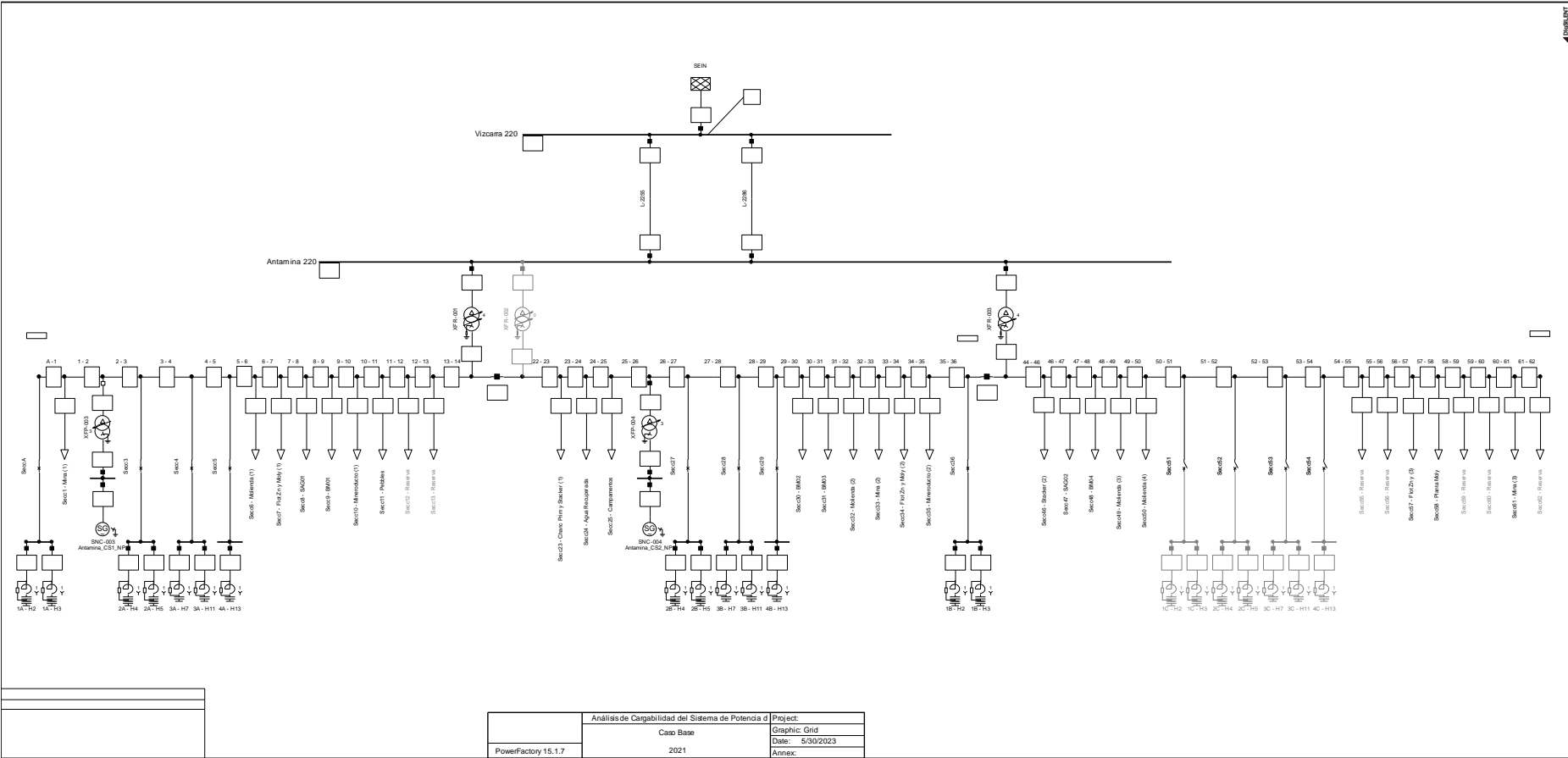
transformador XFR-001 por la sección 14, transformador XFR-002 por la sección 22 y transformador XFR-003 por la sección 44.

- Los valores nominales de carga para las líneas de transmisión y transformadores de potencia son 180 MVA y 125 MVA respectivamente.
- Los límites operativos de potencia reactiva de los compensadores síncronos están configurados en el PFC como +/- 8MVAR.
- Los filtros de armónicos son accionados en pares, a excepción del filtro de 13 que tiene un accionamiento exclusivo.

En la figura 14 se muestra el sistema eléctrico modelado en el software DigSILENT.

Figura 14

Sistema eléctrico modelado en DlgSILENT.



	Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d	Project:
	Caso Base	Geographic Grid
PowerFactory 15.1.7	2021	Date: 5/30/2023
		Annex:

3.3 Diagnóstico del Sistema de Potencia existente

Para el diagnóstico del sistema de potencia existente, se realizan simulaciones de flujo de potencia y cortocircuito sobre el modelo construido, a fin de conocer:

- Tensión en barras.
- Cargabilidad de transformadores y barras de 23 kV.
- Factor de potencia y capacidad de reactivos.
- Niveles de cortocircuito en barras.

Dado que la intención del trabajo es conocer el impacto que tendrá la ampliación de carga sobre las instalaciones existentes, se considera el modelo de carga indicado en la tabla 7, el cual representa la máxima demanda de la Mina.

3.3.1 Definición de escenarios

Escenarios A: Análisis de la tensión, factor de potencia y cargabilidad en líneas y transformadores de Potencia

Para el análisis de la tensión y factor de potencia en barras, así como la cargabilidad en líneas 220 KV y transformadores de potencia se han considerado los siguientes escenarios de operación.

Operación normal:

- 2 líneas de 220 kV, 2 Transformadores y el PFC en servicio.

Operación en contingencia (N-1):

- 2 líneas de 220 kV, 1 Transformador y el PFC en servicio.
- 1 línea de 220 kV, 2 Transformadores y el PFC en servicio.
- 2 líneas de 220 kV, 2 Transformadores en servicio y el PFC fuera de servicio.

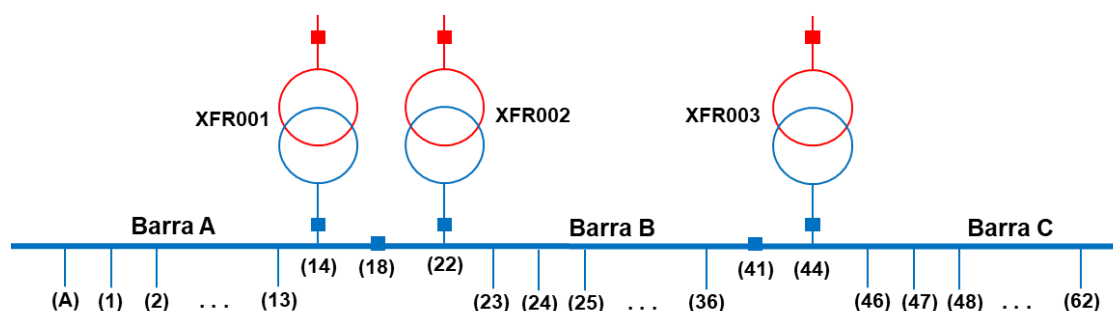
En la tabla 8 se resumen los escenarios a ser analizados.

Tabla 8*Escenarios para el análisis de tensión y factor de potencia.*

Escenario	Líneas	Transformadores	PFC
A1 - 2L2TCP	L1 + L2	T1 + T3	Si
A2 - 1L2TCP	L1	T1 + T3	Si
A3 - 2L1TCP	L1 + L2	T1	Si
A4 - 2L2TSP	L1 + L2	T1 + T3	No

Escenarios B: Análisis de la cargabilidad en barras de 23 kV

Para el análisis de cargabilidad en las barras de 23 kV se ha considerado las características físicas de las acometidas de los transformadores de potencia a las barras 23 kV, es decir, como se muestra en la figura 15, la alimentación de los transformadores a las barras 23 kV no se da de forma simétrica, siendo que el transformador XFR001 se conecta al final de la barra A, mientras que el transformador XFR002 está conectado al inicio de la barra y el transformador XFR003 al inicio de la barra C.

Figura 15*Distribución de cargas en barras 23 kV.*

Asimismo, se ha considerado la distribución de cargas existentes en las barras A, B y C. Como se observa en la tabla 9, la Barra A es la menos cargada de las tres barras mientras que la Barra C es la más cargada.

Tabla 9

Carga por las barras de 23 kV.

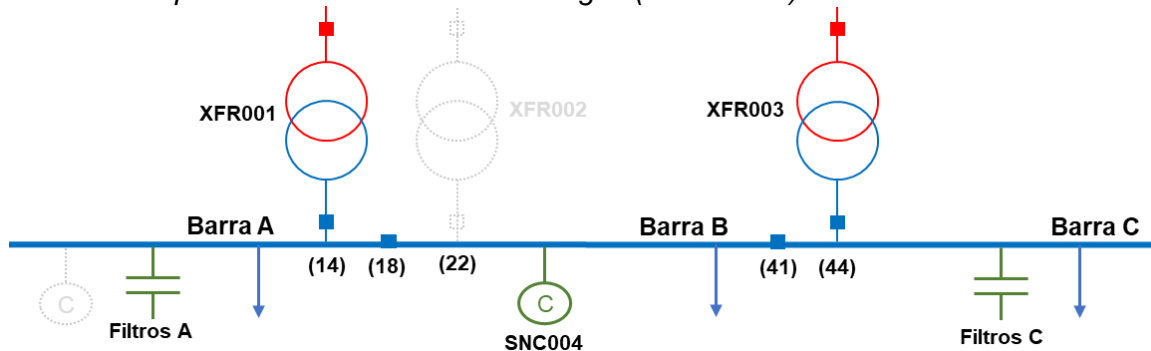
Barra	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
Barra A	38.6	33.5
Barra B	51.6	38.7
Barra C	45.8	31.1

Debido a esta condición de aparente desequilibrio en las barras en términos de carga, se analizan 2 escenarios: uno en el cual el reparto de carga es más equilibrado y otro que presenta desequilibrios más notorios.

En la figura 16 se muestra el escenario de reparto de carga equilibrado (T1T3S4PC), para el cual la alimentación a las barras de 23 kV se da por medio de los Transformadores de Potencia XFR-001 y XFR-003, los equipos de compensación reactiva en servicio son el compensador síncrono SNC004 y los filtros de armónicos de la barra C y A (Prioridad C del PFC). En esta configuración, se minimiza la corriente circulante por los interruptores de acople de barras 23 kV.

Figura 16

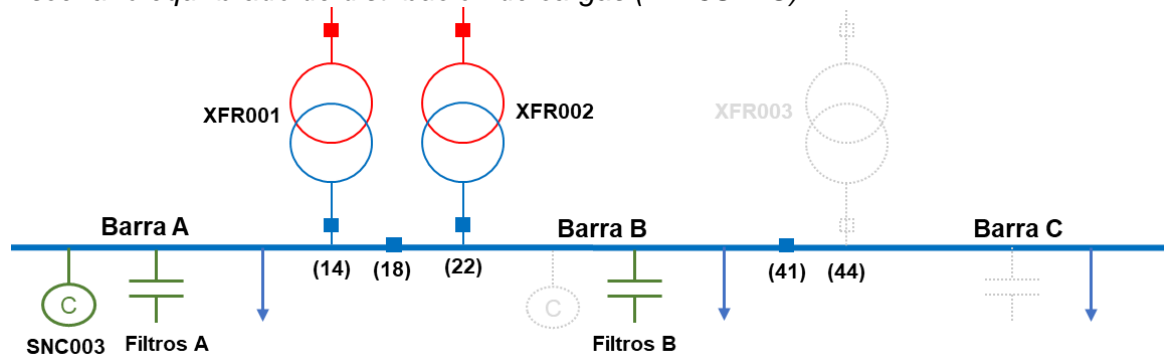
Escenario equilibrado de distribución de cargas (T1T3S4PC).



En la figura 17 se muestra el escenario reparto de carga desequilibrado (T1T2S3PA), en el cual la alimentación a las barras de 23 kV se da por medio de los Transformadores de Potencia XFR-001 y XFR-002, los equipos de compensación reactiva en servicio son el compensador síncrono SNC003 y los filtros de armónicos de la barra A y B (Prioridad A del PFC). En esta configuración, se tienen los mayores valores de corriente circulante por los interruptores de acople de barras 23 kV.

Figura 17

Escenario equilibrado de distribución de cargas (T1T3S4PC).



Adicionalmente, se analizan dos escenarios para los cuales, las barras operan con los interruptores de acople abiertos con el fin de analizar si el reparto de carga en los transformadores y la regulación de tensión se mantiene dentro de los límites adecuados de operación. En el primer escenario el interruptor de acople entre las barras B y C se encuentra abierto, el Transformador XFR-001 asume la carga de las barras A y B y el transformador XFR-003 asume la carga de la barra C. En el segundo escenario el interruptor de acople entre las barras A y B se encuentra abierto, el Transformador XFR-002 asume la carga de la barra A y el transformador XFR-002 asume la carga de las barras B y C. En ambos escenarios el control de fdp se hace de forma separada por barra.

En la tabla 10 se muestran los escenarios considerados para el análisis de cargabilidad en barras 23 kV.

Tabla 10

Escenarios para análisis de cargabilidad en barra 23 kV.

Escenario	Configuración Barras	Transformador	Comp. Síncronos	Filtros
B1 - T1T3S4PC	A+B+C	T1 + T3	SNC003	Filtro C + Filtro A
B2 - T1T2S3PA	A+B+C	T1 + T2	SNC004	Filtro A + Filtro B
B3 - T1(AB)_T3(C)	A + B, C	T1, T3	SNC003, SNC004	Filtros A, B y C
B4 - T1(A)_T2(BC)	A, B+C	T1, T2	SNC003, SNC004	Filtros A, B y C

Escenarios K: Análisis de cortocircuito

Para el análisis de cortocircuito, se consideraron los escenarios de operación normal y otros escenarios de operación con configuraciones de equipos que afectan a los

valores de corriente de cortocircuito en las barras de 23 KV. Entre estas configuraciones se tiene la operación con tres transformadores de Potencia en paralelo, con dos compensadores síncronos en paralelo y con al menos un interruptor de acople de barras de 23 kV abierto. Si bien estos escenarios no se dan en operación permanente, si pudieran darse durante cortos periodos de tiempo por razones operativas, por lo que es conveniente analizarlos.

En la tabla 11 se detallan los escenarios considerados.

Tabla 11

Escenarios para análisis de cortocircuito.

Escenario	Líneas	Transformadores	Compensadores Síncronos
K1 - 2L2T1C	L1 + L2	T1 + T3	1
K2 - 2L2T2C	L1 + L2	T1 + T3	2
K3 - 2L3T1C	L1 + L2	T1 + T2 +T3	1
K4 - 2LT1T22C	L1 + L2	T1, T2	2
K5 - 2LT1T31C	L1 + L2	T1, T3	2

3.3.2 *Análisis de tensiones y factor de potencia*

Para el análisis de tensiones y factor de potencia en las barras del sistema eléctrico en estudio, se establecen los límites de tensión y factor de potencia admisibles conforme a lo indicado en el PR-020 del COES (COES, 2021).

Operación normal:

Las tensiones de las barras de las subestaciones deben encontrarse dentro del rango $\pm 5\%$ de las tensiones nominales de los equipos instalados. En el caso de barras del sistema de transmisión, las tensiones en estado normal deben encontrarse dentro del rango de $\pm 2.5\%$ de las tensiones de operación.

El factor de potencia en el punto de conexión al SEIN en niveles de 220 kV no debe superar el valor de 0.98. En la barra 220 kV de la subestación principal Mina el factor de potencia debe ser igual a 0.96, de acuerdo con el ajuste establecido por el PFC.

Operación en contingencia

Las tensiones de las barras de las subestaciones 220 kV deben mantenerse en el rango comprendido entre 0.9 y 1.1 p.u. de la tensión de operación. Las tensiones de las barras iguales o menores a 138 kV deben mantenerse entre los rangos 0.9 y 1.05 p.u. de la tensión de operación.

En la tabla 12 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas los escenarios definidos. Se aprecia que en ningún caso se exceden los límites de tensión admisible, sin embargo, en el escenario A4 los taps de los transformadores llegan a su posición límite y se obtiene un factor de potencia de 0.74, sin embargo, al ser una contingencia de corta duración se considera aceptable.

Tabla 12

Tensión en barras y factor de potencia.

Escenario	VIZ220 kV	ANT220 kV	ANT23 kV	XFR-001 fdp	XFR-002 fdp	XFR-003 fdp
A1 - 2L2TCP	224.4	221.5	23.1	0.96	-	0.96
A2 -1L2TCP	224.4	217.6	23.1	0.96	-	0.96
A3 - 2L1TCP	224.4	221.5	23.1	0.96	-	-
A4 - 2L2TSP	224.4	216.2	23.1	0.74	-	0.74

3.3.3 Análisis de cargabilidad

Para el análisis de la cargabilidad se consideran los siguientes límites operativos:

Operación normal: no se admiten sobrecargas ni en líneas de transmisión ni en transformadores de potencia.

Operación en contingencia: las sobrecargas deben ser menores o iguales al 20% de la capacidad del equipo, de acuerdo con sus datos de placa.

3.3.3.1 Cargabilidad en líneas de transmisión y transformadores. Para el análisis de cargabilidad en líneas y transformadores se han considerado los escenarios indicados en la tabla 13. Los resultados del flujo de carga se muestran en la tabla 13, en la cual se aprecia que en ninguno de los casos se excede los límites de sobrecarga establecidos.

Tabla 13

Carga de líneas de 220 kV y Transformadores de Potencia.

Escenario	Línea 1 % Carga	Línea 2 % Carga	XFR-001 % Carga	XFR-002 % Carga	XFR-003 % Carga
A1 - 2L2TCP	39.2	39.2	57.2	-	55.6
A2 - 1L2TCP	79.8	-	58.3	-	56.6
A3 - 2L1TCP	39.2	39.2	112.8	-	-
A4 - 2L2TSP	52.1	52.1	76.2	-	74

Cabe resaltar que en el escenario A3, operando con solo un transformador de potencia se alcanza un nivel de carga de 112.8%. Sin embargo, al ser una condición de contingencia, esta sobrecarga de 12.8% se considera como aceptable.

3.3.3.2 Cargabilidad en barras en 23 kV. Para el análisis de cargabilidad del sistema de barras de 23 kV, se modelaron las barras en el DIGSILENT como la unión de pequeñas secciones a fin de poder verificar la corriente circulante a lo largo de las barras. En este análisis se han considerado los escenarios indicados en la tabla 14, en la cual se hacen más notorios los desequilibrios en el reparto de cargas en los transformadores de potencia.

En la tabla 14 se muestran los valores de la corriente circulante de barra obtenidos para ambos escenarios (equilibrado y desequilibrado).

Tabla 14

Carga en barras de 23 kV.

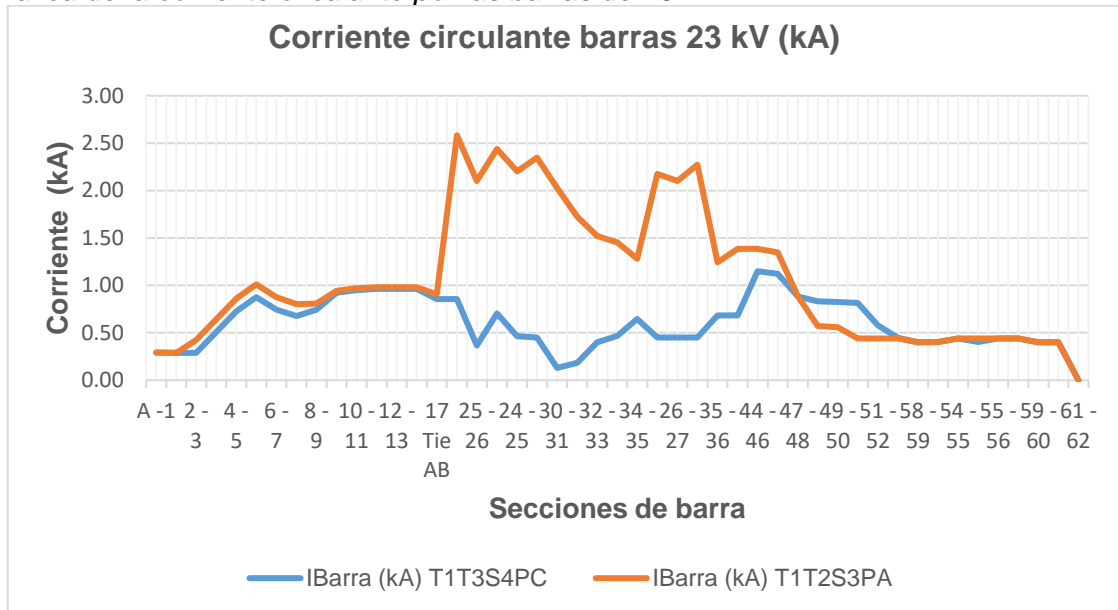
Escenario	XFR-001 (MVA)	XFR-002 (MVA)	XFR-003 (MVA)	Ibarra Max (kA)
B1 - T1T3S4PC	72.0	-	69.9	1.15
B2 - T1T2S3PA	71.2	70.7	-	2.58
B3 - T1(AB)_T3(C)	94.1	-	48.0	1.36
B4 - T1(A)_T2(BC)	40.3	101.7	-	2.47

En la figura 18 se grafican los valores obtenidos de la corriente circulante por las barras de 23 Kv para el escenario más desequilibrado (B2). Se aprecia que la corriente

máxima encontrada es de 2.58 kA, que es inferior al valor nominal de 3.72 kA. Con esto se concluye que la máxima condición encontrada, representa el 69.4% del valor límite, por lo que se puede decir que el sistema de barras cuenta con márgenes estáticos de sobrecarga suficientes.

Figura 18

Gráfica de la corriente circulante por las barras de 23 kV.



3.3.4 Análisis de cortocircuito

Con el fin de conocer los mayores niveles de cortocircuito en barras de 23 kV se simulan cortocircuitos trifásicos en el escenario de Estiaje Máxima Demanda del SEIN, por ser el escenario que presenta los mayores valores de corriente de cortocircuito en la zona de la Subestación de Transmisión 220 kV.

Las corrientes de cortocircuitos se calcularon utilizando el Método Completo del DIgSILENT, con la finalidad de obtener resultados más precisos. Esto es posible debido que la red en análisis es una red existente de la cual podemos conocer los valores del estado estacionario pre-falla.

Las magnitudes que se obtiene de las simulaciones de cortocircuito son las siguientes (DIgSILENT, 2018):

- I_{kss} : Corriente de cortocircuito inicial (RMS)
- I_{ks} : Corriente de cortocircuito transitoria (RMS)
- I_p : Corriente de cortocircuito pico (Valor Instantáneo)

Para establecer el valor límite de corriente de cortocircuito I_{kss} en barras de 23 kV, se consideran las capacidades de cortocircuito de las celdas 23 kV. Las Barras A y B tienen celdas con capacidad cortocircuito de 31.5 KA, sin embargo, aún cuenta con algunos interruptores de 25 kA que no han sido reemplazados. La Barra C tiene celdas con un valor límite de 40 kA. Por lo tanto, se considera 25 kA como valor restrictivo de la máxima I_{kss} en barras de 23 kV.

Para estimar el aporte de cortocircuito de la carga, se tuvieron las siguientes premisas:

- No se considera el aporte de los molinos SAG y Bolas por estar alimentados a través de ciclo-convertidores.
- No se considera el aporte de los motores asíncronos en media tensión que operan con variadores de frecuencia.
- Se considera el aporte de los motores asíncronos con arranque directo en media tensión por ser una carga considerable.

En el anexo A y en la figura 19 se muestran los motores asíncronos de media tensión considerados en el modelado.

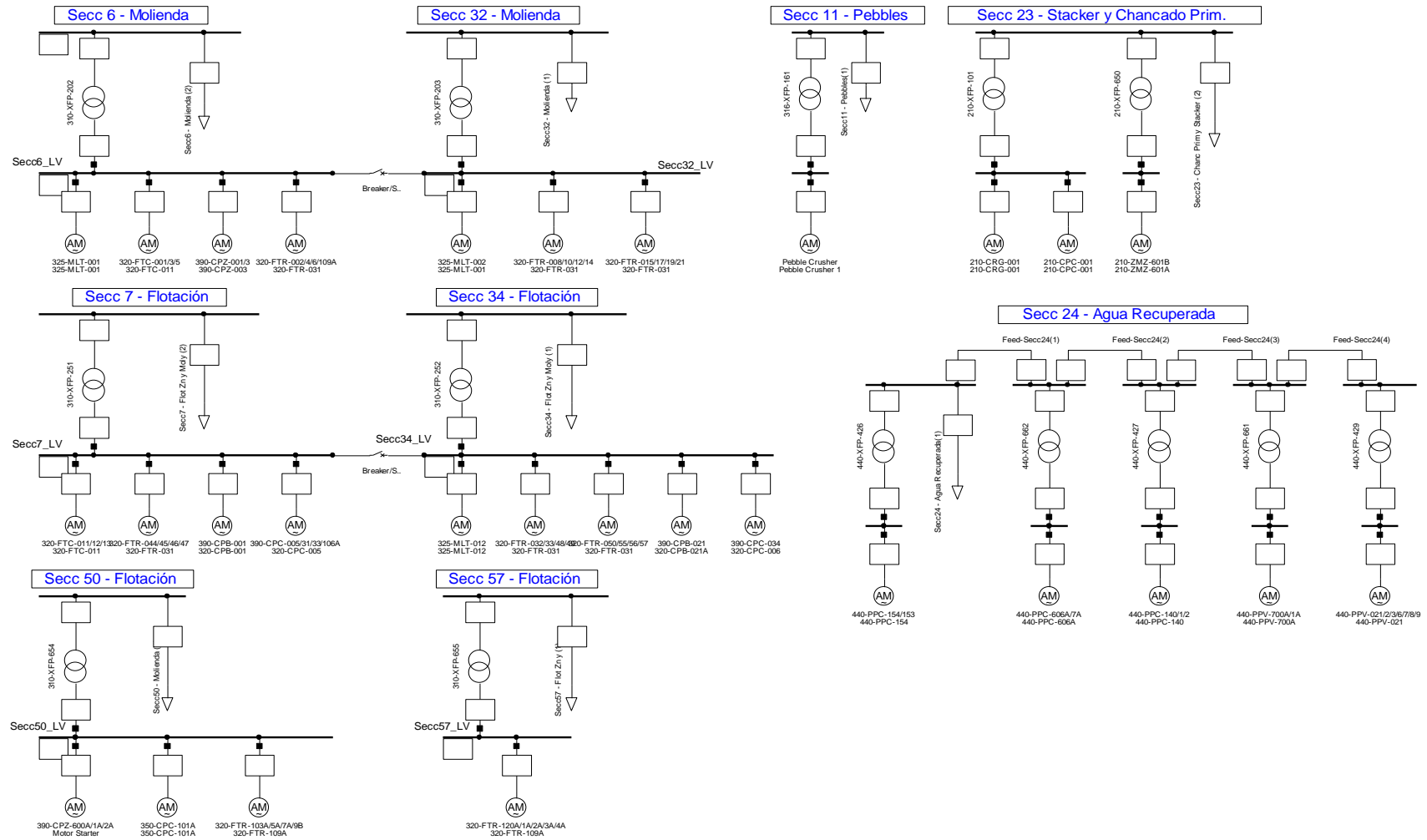
Con base en lo indicado, en la tabla 15 se muestran los resultados de las simulaciones de cortocircuito realizadas, indicando los valores de aporte cortocircuito en barras de 23 kV correspondientes a los Transformadores de Potencia (XFR-001/2/3), los condensadores síncronos (SNC-003/4) y las cargas de media tensión para cada escenario considerado.

Tabla 15*Valores de la corriente de cortocircuito en barras de 23 kV.*

Escenario	Ikss Barra 23kV (KA)	Aporte Transformadores (KA)	Aporte Comp. Síncrono (KA)	Aporte Cargas MT (KA)
K1 - 2L2T1C	24.4	18.1	2.5	4.0
K2 - 2L2T2C	26.7	18.1	4.8	4.0
K3 - 2L3T1C	27.2	21.0	2.4	4.0
K4 - 2LT1T22C	17.2	13.5	3.3	2.7
K5 - 2LT1T31C	18.8	12.9	2.4	4.4

Figura 19

Motores asíncronos en media tensión modelados en el DigSILENT.



3.4 Diagnóstico del Sistema de Potencia Proyectoado

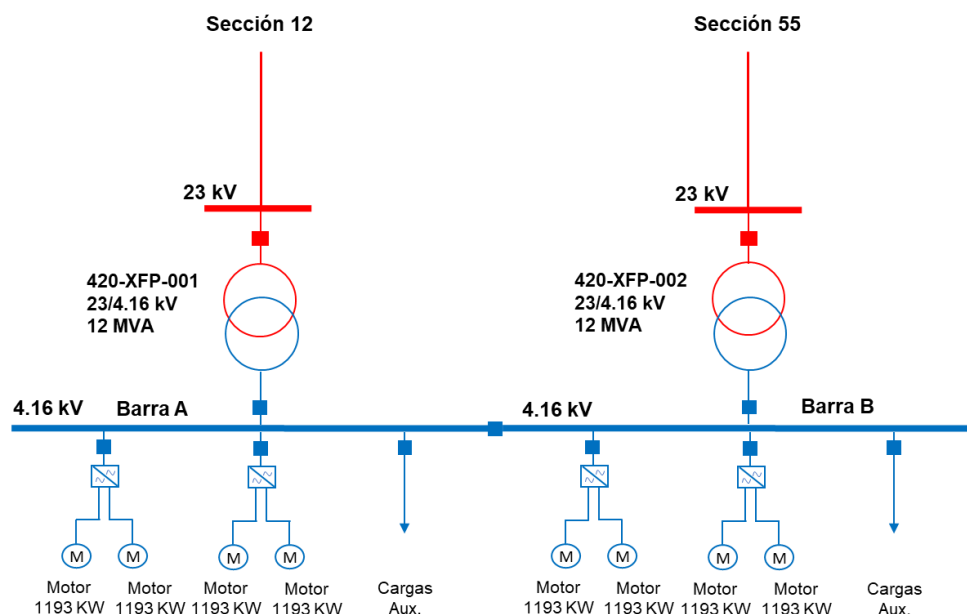
El nuevo Sistema de Bombeo de Relaves (SBR) consta de cuatro trenes de bombas centrífugas que transportan el relave de la Planta Concentradora hacia la laguna de relaves. De los cuatro trenes, uno siempre queda detenido como reserva, pudiendo ser cualquiera de los cuatro. Cada tren está compuesto por un par de bombas centrífugas en serie accionadas cada una por motores eléctricos (A y B) de 1193 kW (1600 HP) de potencia. Los motores son arrancados por un Variador de Frecuencia (VDF) en 4.16 kV mediante la siguiente filosofía:

- El VDF arranca el motor A con una rampa de aceleración de 2 min hasta alcanzar la velocidad nominal. Luego de 5 segundos el motor A es transferido de la barra del VDF a la barra de alimentación de red 4.16 kV.
- El segundo motor B es arrancado por el mismo VDF con una rampa de aceleración de 2 minutos y queda operando de forma permanente con este, a modo de control del flujo de relave (70% a 90% según el proceso).

Para la alimentación eléctrica del SBR se utilizarán dos transformadores de 23/4.16 kV con 12 MVA de capacidad, los cuales serán alimentados desde las celdas 23 kV Sección 12 (Barra B) y Sección 55 (Barra A) de la Subestación Principal de Mina. En la figura 20 se muestra el diagrama unifilar de la instalación.

Figura 20

Diagrama unifilar del Sistema de Bombeo de Relaves.



En la tabla 16 se muestran los datos de los transformadores de la Planta SBR.

Tabla 16

Parámetros de los transformadores de la Planta SBR.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia (MVA)	12
Tensión (kV)	23/4.16
Grupo de Conexión	Dyn11
Impedancia de Cortocircuito (%)	7.11
Cambiador de tomas HV	±2 x 2,5%

De acuerdo con la necesidad operativa, el SBR puede operar con uno o hasta tres trenes de bombas. Para el análisis de cargabilidad y el impacto operativo en la red eléctrica existente, se considera la máxima demanda posible del SBR, la cual se da con tres trenes de bombas en operación con un factor de carga en los motores de 0.85, de acuerdo con el proceso. El fdp de los motores se considera de acuerdo con la placa de características para los motores tipo A (operación permanente con la red) y 0.98 para los motores tipo B (operación permanente con el VFD).

En la tabla 17 se muestra los parámetros de los motores de la planta SBR.

Tabla 17*Parámetros de los motores de la Planta SBR.*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia (HP / KW)	1600 / 1193
Tensión (V)	4000
Frecuencia	60 Hz
Factor de Potencia	0.93
Factor de carga (Proceso)	0.85

3.4.1 Definición de escenariosEscenarios C: Análisis de la tensión, factor de potencia y cargabilidad en líneas y transformadores de Potencia

Para el análisis de la tensión y factor de potencia en barras, así como la cargabilidad en líneas 220 KV y transformadores de potencia se han considerado los mismos escenarios utilizados para analizar el sistema eléctrico sin proyecto. En la tabla 18 se muestran los escenarios considerados con la red con proyecto.

Tabla 18*Escenarios para el análisis de tensión y fdp con proyecto.*

Escenario	Líneas	Transformadores	PFC
C1 - 2L2TCP	L1 + L2	T1 + T3	Si
C2 - 1L2TCP	L1	T1 + T3	Si
C3 - 2L1TCP	L1 + L2	T1	Si
C4 - 2L2TSP	L1 + L2	T1 + T3	No

Escenarios D: Análisis de la cargabilidad en barras de 23 kV

Para el análisis de cargabilidad en las barras de 23 kV se ha considerado los mismos escenarios utilizados para analizar el sistema eléctrico sin proyecto. Además, en los escenarios con carga desequilibrada, D2 y D4, se ha considerado que solo la sección 55 alimenta al SBR, con el fin de incrementar el desequilibrio de carga. En la tabla 19 se muestran los escenarios considerados.

Tabla 19*Escenarios para el análisis de cargabilidad en barra 23 kV con proyecto.*

Escenario	Configuración Barra	Transformador	Comp. Síncronos	Filtros
D1 - T1T3S4PC	A+B+C	T1 + T3	SNC003	Filtro C + Filtro A
D2 - T1T2S3PA	A+B+C	T1 + T2	SNC004	Filtro A + Filtro B
D3 - T1(AB)_T3(C)	A + B, C	T1, T3	SNC003, SNC004	Filtros A, B y C
D4 - T1(A)_T2(BC)	A, B+C	T1, T2	SNC003, SNC004	Filtros A, B y C

Escenarios L: Análisis de cortocircuito con proyecto

Para el análisis de cortocircuito se ha considerado una red equivalente de Thevenin con una potencia de cortocircuito trifásica de 1862.7 MVA, correspondiente al escenario de estiaje máximo 2022 tomado del archivo de la base de datos DIgSILENT que publica el COES. Asimismo, se han considerado los mismos escenarios utilizados en el subtítulo 3.2.4, análisis del cortocircuito del sistema de potencia sin proyecto.

En la tabla 20 se muestran los escenarios considerados.

Tabla 20*Escenarios para el análisis de cortocircuito con proyecto.*

Escenario	Líneas	Transformadores	Compensadores Síncronos
L1 - 2L2T1C	L1 + L2	T1 + T3	1
L2 - 2L2T2C	L1 + L2	T1 + T3	2
L3 - 2L3T1C	L1 + L2	T1 + T2 + T3	1
L4 - 2LT1T22C	L1 + L2	T1, T2	2
L5 - 2LT1T31C	L1 + L2	T1, T3	2

3.4.2 Análisis de tensiones y factor de potencia

Para el análisis de tensiones y factor de potencia en las barras del sistema eléctrico en estudio, se establecen los límites de tensión y factor de potencia admisibles conforme a lo indicado en el PR-020 del COES.

Operación normal: el ingreso del proyecto no debe generar tensiones fuera del rango ± 2.5 % sobre las tensiones de operación, o la tensión nominal de los equipos.

Operación en contingencia: el ingreso del proyecto no debe generar tensiones post-contingencia (N-1) fuera del rango ± 10 %.

En la tabla 21 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas. Se aprecia que en ningún caso se exceden los límites de tensión admisible, sin embargo, en el escenario A4 los taps de los transformadores llegan a su posición límite y se obtiene un factor de potencia de 0.74, sin embargo, al ser una contingencia de corta duración se considera aceptable.

Tabla 21

Tensión en barras y fdp con el proyecto

Escenario	VIZ220 kV	ANT220 kV	ANT23 kV	XFR-001 fdp	XFR-002 fdp	XFR-003 fdp
C1 - 2L2TCP	224.4	221.3	23.2	0.96	-	0.96
C2 - 1L2TCP	224.4	217.2	23.2	0.96	-	0.96
C3 - 2L1TCP	224.4	221.3	23.2	0.96	-	-
C4 - 2L2TSP	224.4	215.9	23.0	0.74	-	0.74

3.4.3 Análisis de cargabilidad

Para el análisis de cargabilidad se analizan los estados de operación normal y en contingencia donde se definen los siguientes límites operativos:

Operación normal: el ingreso de un proyecto no debe generar sobrecargas.

Operación en contingencia: el ingreso de un proyecto no debe generar sobrecargas post-contingencia (N-1) en transformadores de potencia y líneas de transmisión mayores al 20%.

3.4.3.1 Cargabilidad en líneas de transmisión y transformadores. En la tabla 22 se muestran los resultados del flujo de carga, donde se aprecia que en ninguno de los casos se excede los límites de sobrecarga establecidos.

Tabla 22

Carga de líneas de 220 kV y transformadores de potencia con el proyecto.

Escenario	Línea 1 % Carga	Línea 2 % Carga	XFR-001 % Carga	XFR-002 % Carga	XFR-003 % Carga
C1 - 2L2TCP	41.0	41.0	60.0	-	58.2
C2 - 1L2TCP	83.7	-	61.2	-	59.3
C3 - 2L1TCP	41.1	41.1	118.2	-	-
C4 - 2L2TSP	54.3	54.3	79.4	-	77.0

Cabe resaltar que en el escenario A3 donde opera solo un transformador de potencia se alcanzan un nivel de carga de 118.2%. Sin embargo, al ser una condición de contingencia, esta sobrecarga de 18.2% se considera todavía como aceptable.

3.4.3.2 Cargabilidad en barras en 23 kV. En la tabla 23 se muestran los valores de la corriente circulante de barra obtenidos para ambos escenarios (equilibrado y desequilibrado) del sistema con proyecto.

Tabla 23

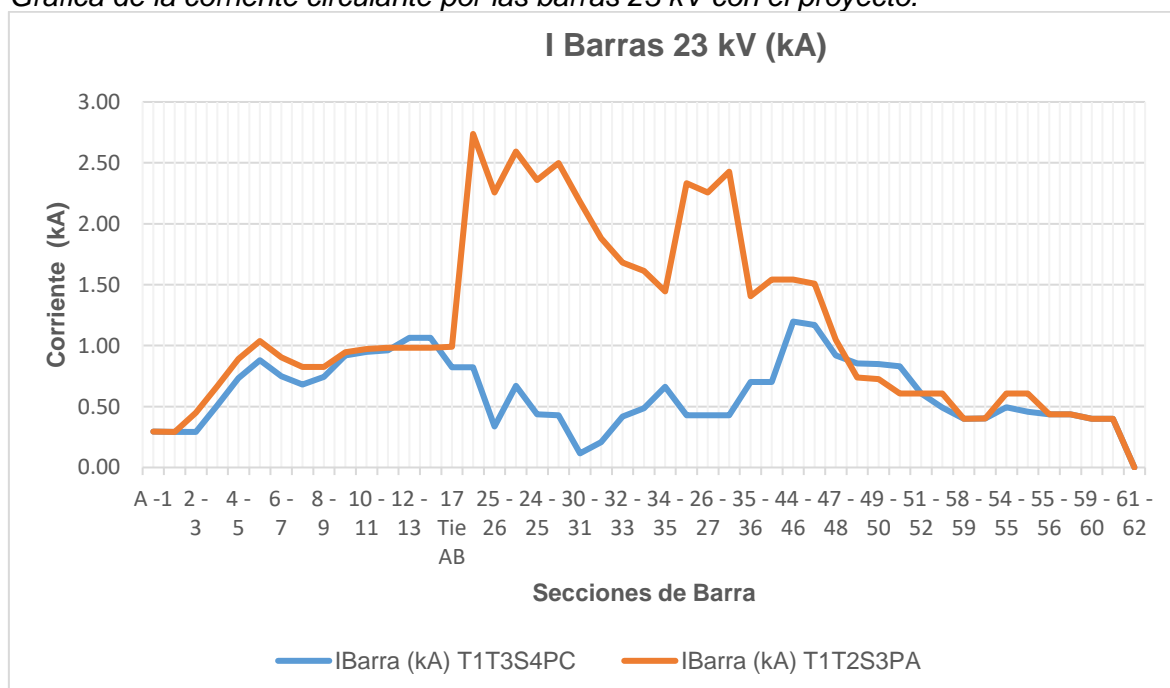
Carga en barras de 23 kV con el proyecto.

Escenario	XFR-001 (MVA)	XFR-002 (MVA)	XFR-003 (MVA)	Ibarra Max (kA)
D1 - T1T3S4PC	75.4	-	73.2	1.20
D2 - T1T2S3PA	74.6	74.0	-	2.74
D3 - T1(AB)_T3(C)	98.6	-	50.3	1.36
D4 - T1(A)_T2(BC)	39.7	105.2	-	2.62

En la figura 21 se grafican los valores obtenidos de la corriente circulante por las barras de 23 kV. En el escenario más desequilibrado (D2). La corriente máxima encontrada es de 2.74 kA, la cual representa el 73.7% del valor nominal, por lo que se puede concluir que el sistema cuenta con capacidad suficiente para la ampliación de carga del proyecto.

Figura 21

Gráfica de la corriente circulante por las barras 23 kV con el proyecto.



3.4.4 Análisis de cortocircuito

En la tabla 24 se muestran los valores de corriente de cortocircuito obtenidos para los casos considerados del sistema existente más el proyecto.

Tabla 24

Corriente de cortocircuito en barras de 23 kV con el proyecto.

Escenario	I_k'' Barra 23kV (KA)	Aporte Transformadores (KA)	Aporte Comp. Síncrono (KA)	Aporte Cargas MT (KA)
L1 - 2L2T1C	25.0	18.0	2.5	4.7
L2 - 2L2T2C	27.3	18.0	4.9	4.7
L3 - 2L3T1C	27.8	20.9	2.4	4.7
L4 - 2LT1T22C	17.5	13.5	3.2	3.0
L5 - 2LT1T31C	19.2	13.0	2.5	4.8

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Comparación de resultados del sistema de potencia existente y proyectado

En el presente capítulo se hace la comparación de los resultados obtenidos en los análisis de tensión en barras, factor de potencia, cargabilidad y cortocircuito del sistema de potencia existente y proyectado.

Como se muestra en las tablas 25 y 26, la entrada del proyecto no genera un impacto significativo en los valores de tensión de operación en barras y factor de potencia. Para los escenarios de operación normal y en contingencia A1/C1, A2/C3 y A3/C3 la variación de tensión con la entrada del proyecto se mantiene por debajo del rango de $\pm 2.5\%$ de la tensión nominal y el factor de potencia visto en la barra 220 kV se mantiene igual a 0.96. Para el escenario de operación en contingencia (A4/C4 - 2L2TSP) sin la compensación reactiva del PFC, la tensión se mantiene dentro del rango $\pm 2.5\%$ del valor nominal a pesar de que los transformadores de potencia alcanzan su límite de regulación de tensión (tap 16). Por otro lado, el factor de potencia alcanza un valor de 0.74 por debajo, sin embargo, este valor es el mismo al alcanzado con el sistema de potencia sin el proyecto, lo cual es aceptable dado que es una contingencia severa de corta duración.

Tabla 25

Comparación de tensión en barras.

Escenario	2021			2022		
	VIZ220 kV	ANT220 kV	ANT23 kV	VIZ220 kV	ANT220 kV	ANT23 kV
A1/C1 - 2L2TCP	224.4	221.5	23.1	224.4	221.3	23.2
A2/C2 - 1L2TCP	224.4	217.6	23.1	224.4	217.2	23.2
A3/C3 - 2L1TCP	224.4	221.5	23.1	224.4	221.3	23.2
A4/C4 - 2L2TSP	224.4	216.2	23.1	224.4	215.9	23.0

Tabla 26*Comparación del factor de potencia.*

Escenario	2021			2022		
	XFR-001 fdp	XFR-002 fdp	XFR-003 fdp	XFR-001 fdp	XFR-002 fdp	XFR-003 fdp
A1/C1 - 2L2TCP	0.96	-	0.96	0.96	-	0.96
A2/C2 -1L2TCP	0.96	-	0.96	0.96	-	0.96
A3/C3 - 2L1TCP	0.96	-	-	0.96	-	-
A4/C4 - 2L2TSP	0.74	-	0.74	0.74	-	0.74

De acuerdo con las tablas 27 y 28, con la entada del proyecto no se generan sobrecargas en las líneas de transmisión y en los transformadores de potencia para todos los escenarios analizados en operación y en contingencia. Sin embargo, es preciso notar que en el escenario de contingencia (2L1TCP) donde solo opera un transformador de potencia el valor de sobrecarga es muy cercano al 120%. Por lo que será importante considerar un análisis de esquemas de protección de alivio de carga para futuras ampliaciones.

Tabla 27*Comparación de carga de líneas 220 kV.*

Escenario	2021		2022	
	Línea 1 % Carga	Línea 2 % Carga	Línea 1 % Carga	Línea 2 % Carga
A1/C1 - 2L2TCP	39.2	39.2	41.0	41.0
A2/C2 -1L2TCP	79.8	-	83.7	-
A3/C3 - 2L1TCP	39.2	39.2	41.1	41.1
A4/C4 - 2L2TSP	52.1	52.1	54.3	54.3

Tabla 28*Comparación de carga de transformadores de potencia.*

Escenario	2021			2022		
	XFR-001 % Carga	XFR-002 % Carga	XFR-003 % Carga	XFR-001 % Carga	XFR-002 % Carga	XFR-003 % Carga
A1/C1 - 2L2TCP	57.2	-	55.6	60.0	-	58.2
A2/C2 -1L2TCP	58.3	-	56.6	61.2	-	59.3
A3/C3 - 2L1TCP	112.8	-	-	118.2	-	-
A4/C4 - 2L2TSP	76.2	-	74	79.4	-	77.0

De acuerdo con la tabla 29, que se refiere a la cargabilidad de las barras de 23 kV, se puede observar que con la entrada del proyecto la cargabilidad de las barras llega hasta un máximo 73.7% del valor nominal (en el escenario más desequilibrado). Esto indica que el sistema cuenta con reserva suficiente en estado estacionario para la nueva carga del proyecto.

Tabla 29

Comparación de la máxima corriente en barras de 23 kV.

Escenario	2021	2022
	IMAX Barra (kA)	IMAX Barra (kA)
B1/D1 - T1T3S4PC	1.15	1.20
B2/D2 - T1T2S3PA	2.58	2.74
B3/D3 - T1(AB)_T3(C)	1.36	1.36
B4/D4 - T1(A)_T2(BC)	2.47	2.62

En lo que respecta al análisis de corrientes de cortocircuito en la barra de 23 kV, de acuerdo con lo mostrado en la tabla 30, se tienen los siguientes resultados:

- En operación normal, con el ingreso del proyecto las corrientes de cortocircuito llegan hasta un valor de 25 kA, no cumpliéndose con el límite restrictivo establecido. Sin embargo, el incremento por el ingreso del proyecto es de solo 0.6 kA, por lo que esta situación corresponde más a un crecimiento acumulado del cortocircuito en la red de transmisión del SEIN que al ingreso del proyecto.
- En los escenarios de operación con dos compensadores síncronos, o tres transformadores de potencia en paralelo, la corriente de cortocircuito sobrepasa el límite restrictivo de 25 kA. Sin embargo, esta situación también se da en el sistema de potencia existente sin el proyecto.
- En los escenarios de operación con al menos un acoplamiento de barras de 23 KV abierto, se obtienen corrientes de cortocircuito inferiores al límite restrictivo de 25 kA. Estos escenarios pueden considerarse para un futuro estudio de mitigación del impacto generado por el incremento de las corrientes de cortocircuito.

Tabla 30*Comparación de corrientes de cortocircuito en barras de 23 kV.*

Escenario	2021	2022
	Ikss Barra 23 kV (KA)	Ikss Barra 23kV (KA)
K1/L1 - 2L2T1C	24.4	25.0
K2/L2 - 2L2T2C	26.7	27.3
K3/L3 - 2L3T1C	27.2	27.8
K4/L4 - 2LT1T22C	17.2	17.5
K5/L5 - 2LT1T31C	18.8	19.2

Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados de los estudios eléctricos realizados se concluye que:

- Se verificó que el ingreso de la nueva carga del sistema de bombeo de relaves no impacta negativamente en el sistema eléctrico de potencia de la compañía minera.
- Se modeló el sistema eléctrico de potencia de la compañía minera en el software DlgSILENT de forma satisfactoria, lo cual permitió realizar los estudios eléctricos de la red existente y proyectada.
- Con el análisis del perfil de tensiones y del factor de potencia realizado se verificó que, con el ingreso de la nueva carga, los niveles de tensión y factor de potencia se mantienen dentro de los límites de operación. Esto indica que el sistema de potencia cuenta con las reservas suficientes para la compensación reactiva y el control de tensión requerido por el ingreso del proyecto.
- Con el análisis de cargabilidad realizado en las líneas de transmisión y transformadores de potencia se verificó que no se generan sobrecargas con el ingreso del proyecto. Sin embargo, para futuras ampliaciones conviene desarrollar esquemas de protección de alivio de carga, y así evitar sobrecargas en contingencia cuando el sistema quede operando con un solo transformador de potencia.
- Con el análisis de cargabilidad realizado en las barras de 23 KV se verificó que con el ingreso del proyecto no se generan sobrecargas. Los diferentes escenarios de distribución de carga analizados (equilibrados y desequilibrados) indican que no existe un riesgo operativo en alcanzar el límite de corriente circulante por las barras, por lo que el criterio de equilibrar la carga corresponde más a una búsqueda de simetría que a un tema operativo.
- Con el análisis de cortocircuito realizado se verificó que con el ingreso del proyecto en operación normal se alcanzan niveles de cortocircuito de hasta 25 KA y en operación de contingencia se excede este valor, definido como límite restrictivo. Sin

embargo, el proyecto solo aporta un valor máximo de 0,6 kA a la corriente de cortocircuito. Con esto se concluye que el incremento de la corriente de cortocircuito por el ingreso del proyecto es aceptable, ya que el problema de fondo es el crecimiento acumulado de los niveles de cortocircuito en las redes de transmisión. Por ello, se recomienda realizar un análisis más detallado que aborde esta problemática.

Recomendaciones

- Desarrollar esquemas de protección de alivio de carga que actúen en la contingencia de operación con un solo transformador de potencia para evitar así el corte total de energía por sobrecarga en el transformador.
- Realizar estudios de reforzamiento del sistema de transmisión para futuras ampliaciones de carga, considerando las buenas prácticas de mantener el límite de capacidad de carga en 85% en operación normal y 120% en contingencias N-1.
- Completar el reemplazo de los interruptores de 25 kA en las celdas 23 KV de la SE Principal de mina por equipos de 31.5 kA, para incrementar así capacidad de cortocircuito de las barras de 23 KV.
- Desarrollar un estudio de mitigación del impacto del crecimiento de los niveles de corriente de cortocircuito en las barras de 23 KV, el cual considere la opción de operar con los acoplamientos abiertos en 23 kV u otros sistemas de protección como la apertura automática de los acoples ante fallas o la instalación de fusibles limitadores de corriente.

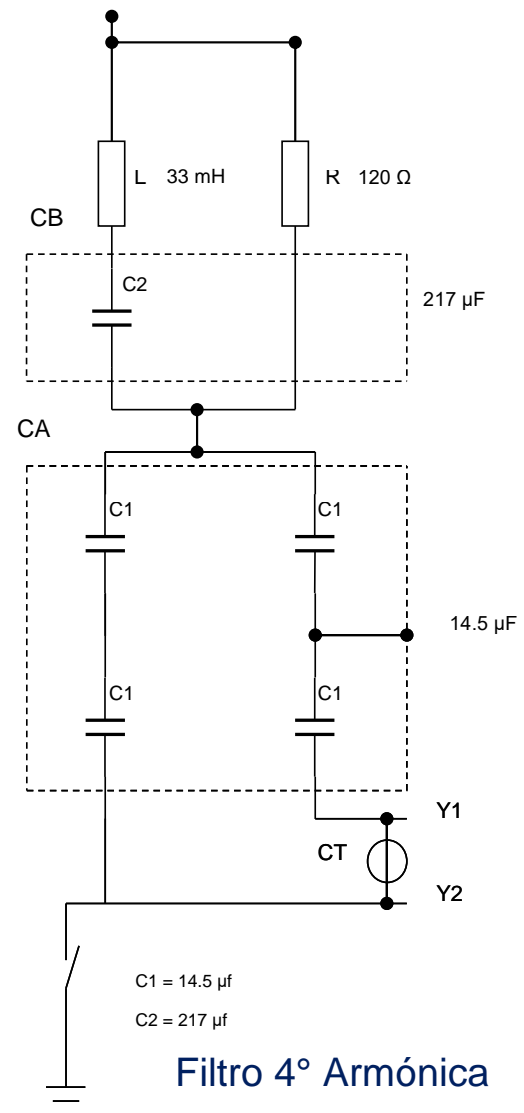
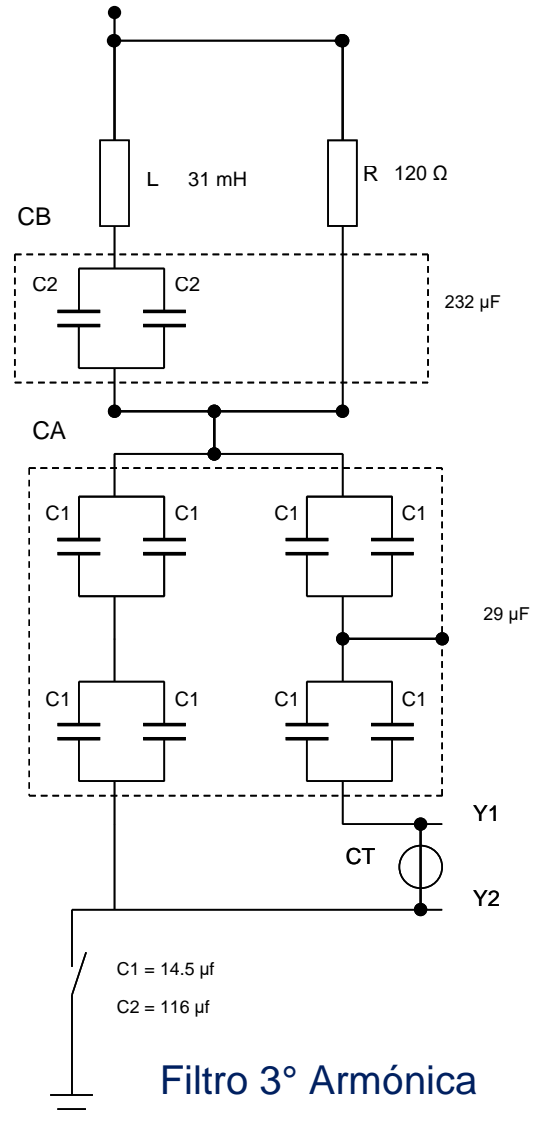
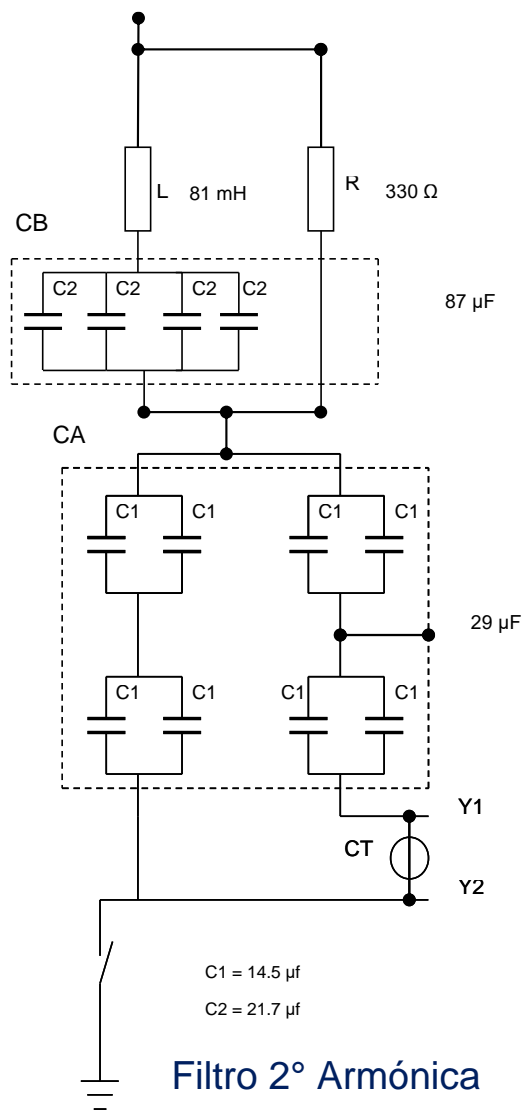
Referencias bibliográficas:

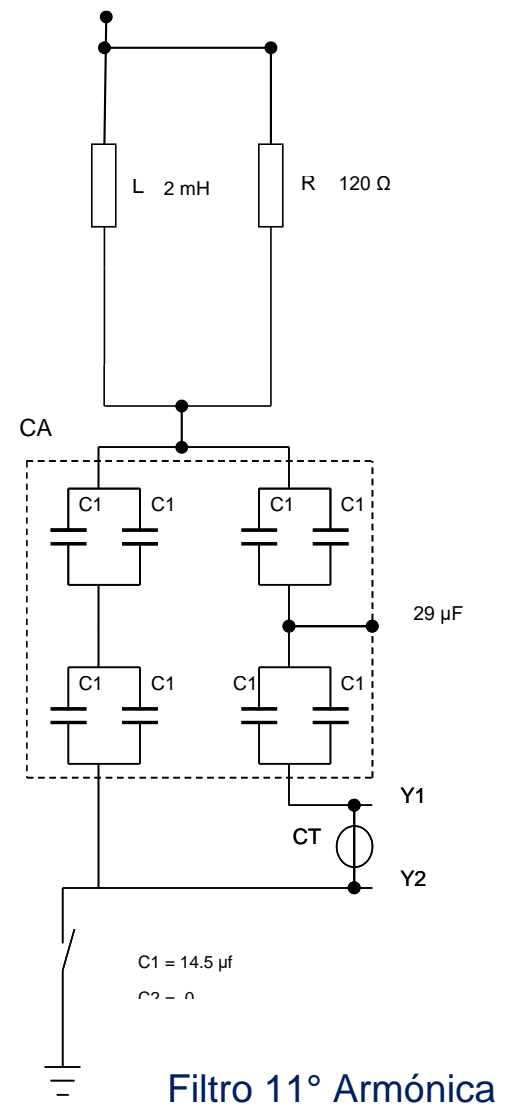
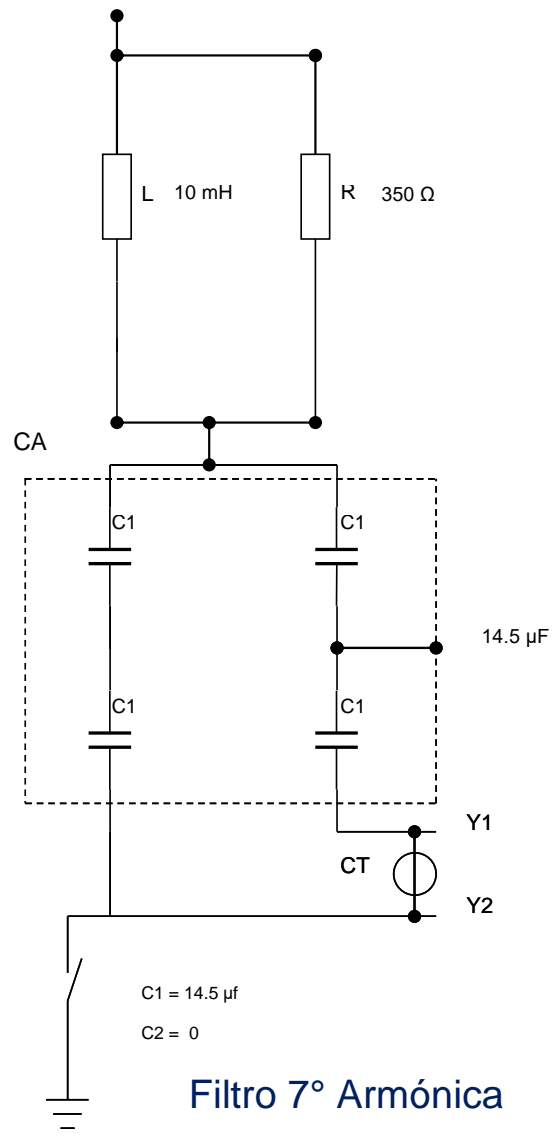
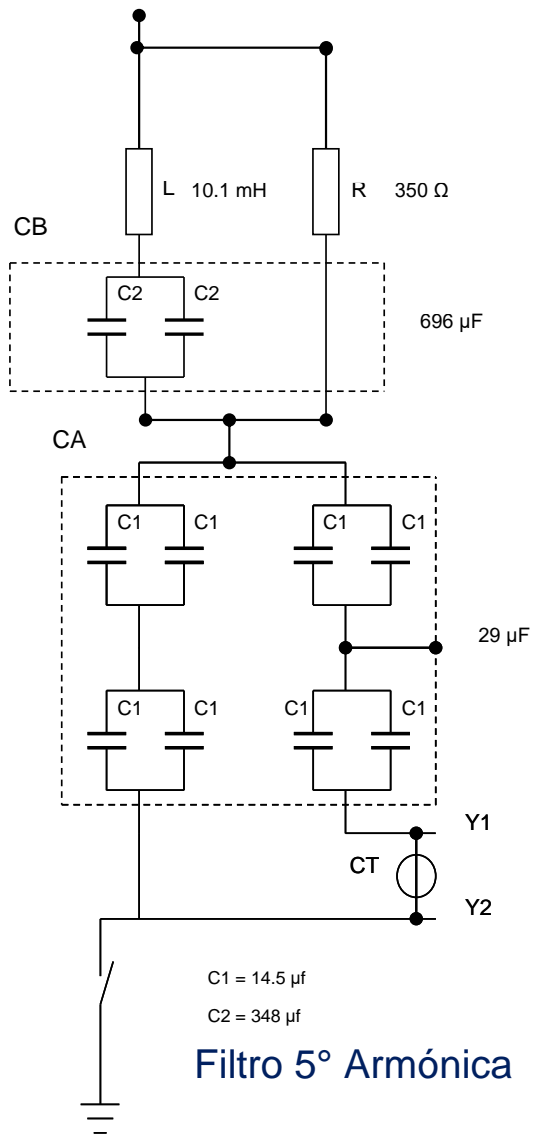
- Agüinsaca, M. (2019). *Elaboración del manual de prácticas para el análisis de flujos de potencia en redes eléctricas*. . Universidad Nacional de Loja.
- COES. (2021). *Ingreso, Modificación y Retiro de Instalaciones del SEIN (PR-20)*.
- DlgSILENT. (2018). *Manual DlgSILENT Power Factory*.
- Gomez, A. (2002). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw-Hill.
- Gomez, D. (2010). *Análisis de contingencias eléctricas en centros comerciales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gonzales, J. (2015). *Sistemas por Unidad*. Universidad Nacional de Tucumán.
- Grainger, J., & Stevenson, W. (1996.). *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill.
- Kindermann, G. (2010). *Cortocircuito*. LabPlan.
- Siemens AG. (2011). *Power Factor Correction System*.
- Roman, E. (2018.). *Optimización del proceso de flotación rougher zinc en minerales m4b (mineral de cobre (calcopirita) y zinc) sobre selectividad y recuperación de minerales. Mediante el uso de reactivos alternativos diamond*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

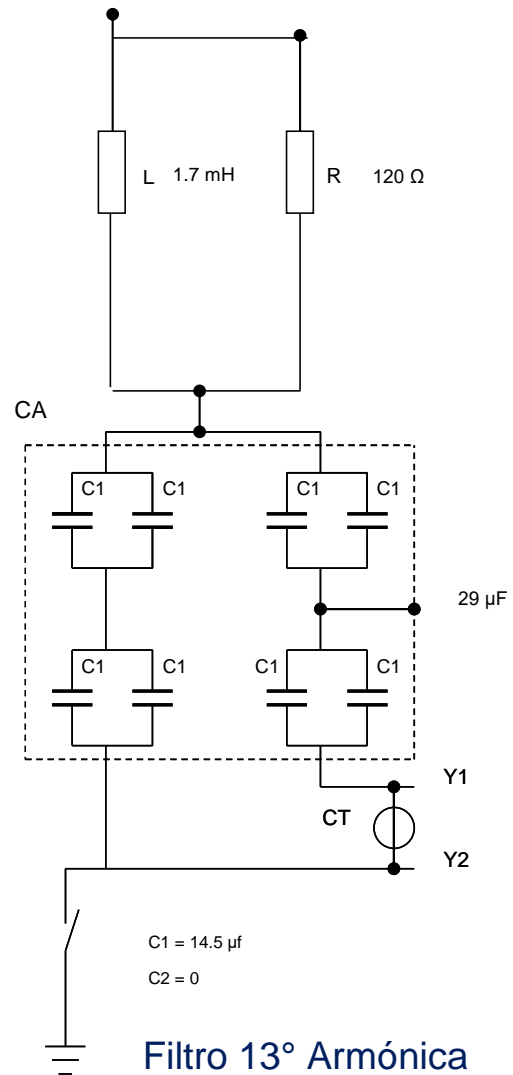
Anexos

Anexo 1: Configuración de los filtros de armónicos.....	1
Anexo 2: Característica de los motores asíncronos	5
Anexo 3: Resultados de simulaciones sin el proyecto.....	7
Anexo 4: Resultados de simulaciones con el proyecto.....	21

Anexo 1: Configuración de los filtros de armónicos





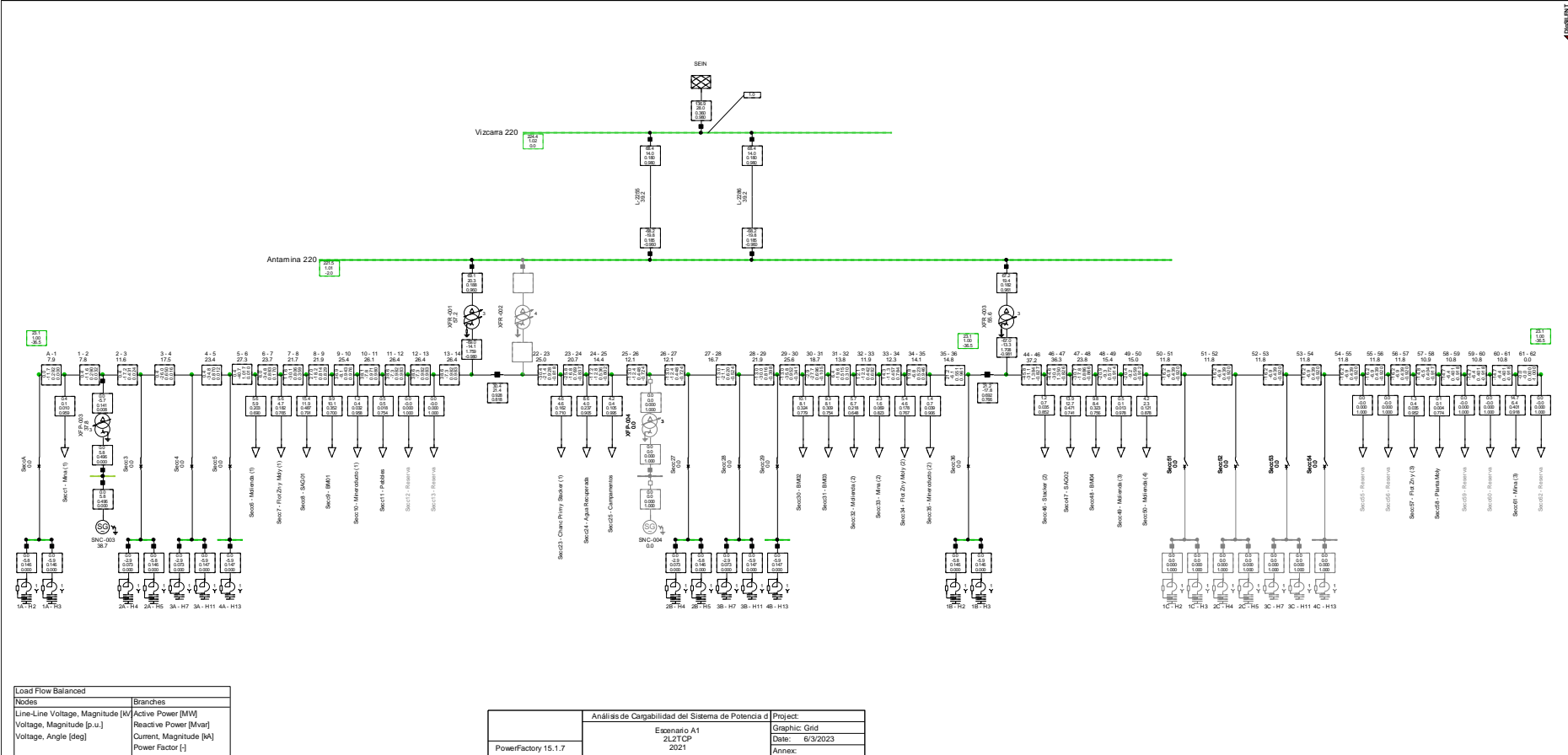


Anexo 2: Característica de los motores asíncronos

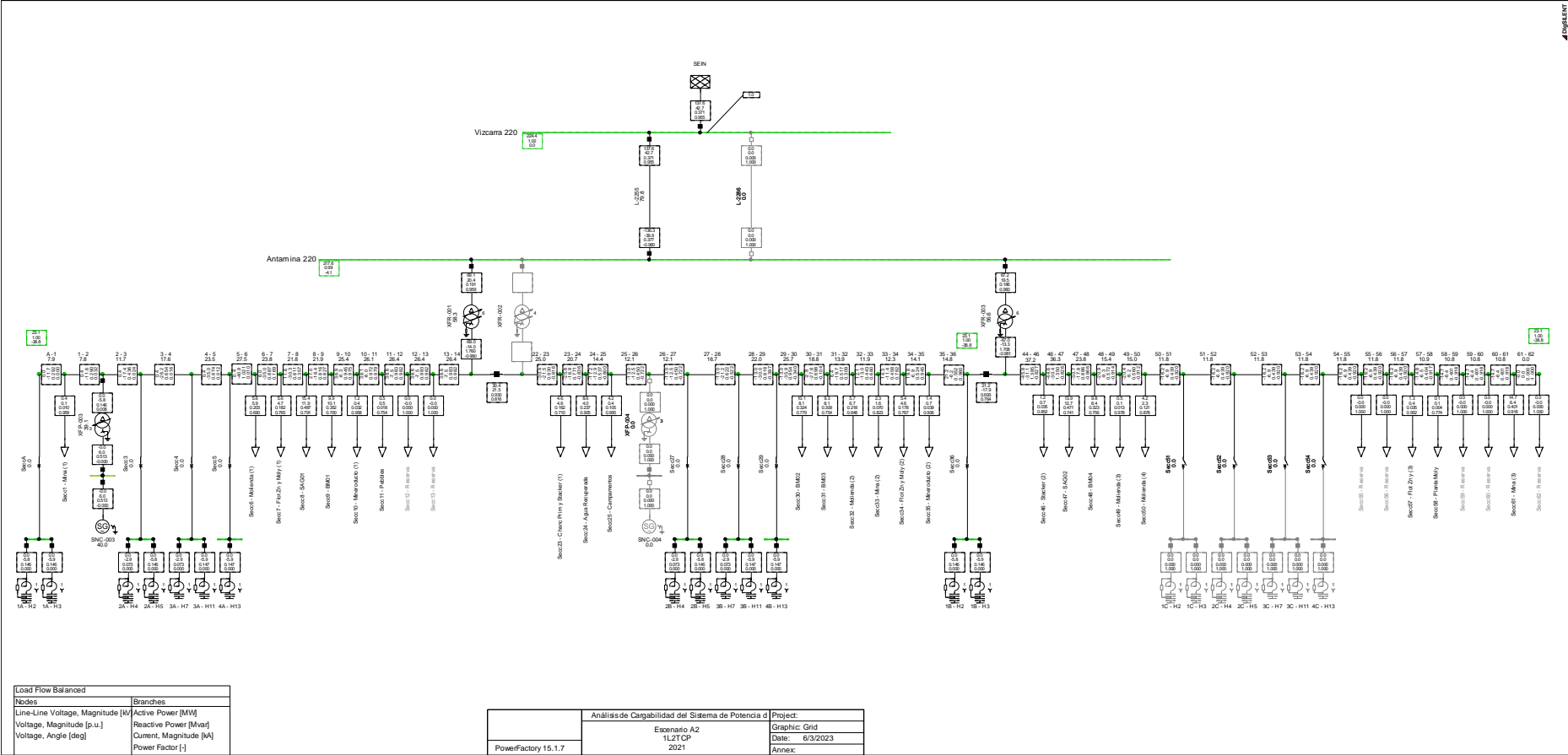
Sección	Tag motor	Tipo	Datos
11	316-CRC-001	Chancadora Pebbles	4 kV, 600 kW, 60 Hz, 2P
6	325-MLT-001	Molino helicoidal vertical	4 kV, 746 kW, 60 Hz, 2P
6	320-FTC-001/003/005	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P
6	390-CPZ-001/003	Compresor de nitrógeno	4 kV, 300 kW, 60 Hz, 2P
6	320-FTR-002/004/006/109 ^a	Celdas de Flotación Scavenger	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P
7	320-FTC-011/012/013	Celdas de Flotación Scavenger	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P
7	320-FTR-044/045/046/047	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P
7	320-CPB-001	Blower de aire	4 kV, 1120 kW, 60 Hz, 2P
7	325-CPC-005/031/033/106A	Compresor de aire	4 kV, 522 kW, 60 Hz, 2P
32	325-MLT-002	Molino helicoidal vertical	4 kV, 746 kW, 60 Hz, 2P
32	320-FTR-008/010/0012/014/015/017/019/021	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60Hz, 4P
34	325-MLT-012	Molino helicoidal vertical	4 kV, 746 kW, 60Hz, 2P
34	325-CPC-034	Compresor de aire	4 kV, 522 kW, 60Hz, 2P
34	325-CPB-021A	Blower de aire	4 kV, 671 kW, 60Hz, 2P
34	320-FTR-032, 033, 048, 049, 050, 055, 056, 057	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60Hz, 4P
23	210-CRG-001	Chancadora Primaria	4 kV, 597 kW, 60 Hz, 6P
23	210-CPC-001	Compresor de aire	4 kV, 224 kW, 60 Hz, 6P
23	210-ZMZ-601B	Apron Feeder	4 kV, 261 kW, 60 Hz, 2P
24	440-PPC-154/153	Bombas de agua recuperada	4 kV, 1119 kW, 60 Hz, 2P
24	440-PPC-606A/607A	Bombas de agua recuperada	4 kV, 1129 kW, 60 Hz, 2P
24	440-PPC-140/141/142	Bombas de agua recuperada	4 kV, 522 kW, 60 Hz, 2P
24	440-PPV-700A/701A	Bombas de agua recuperada	4 kV, 263 kW, 60 Hz, 2P
24	440-PPV-021/022/023/026/027/028/029	Bombas de agua recuperada	4 kV, 225 kW, 60 Hz, 2P
50	390-CPZ-600A,601A, 602A	Compresores de nitrógeno	4 kV, 224 kW, 60 Hz, 6P
50	350-CPC-101A	Compresor de aire	4 kV, 186.5 kW, 60 Hz, 4P
50	320-FTR-103A,105A,107A,109B	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P
57	320-FTR-120A,121A,122A,123A,124A	Celdas de Flotación Rougher	4 kV, 150 kW, 60 Hz, 4P

Anexo 3: Resultados de simulaciones sin el proyecto

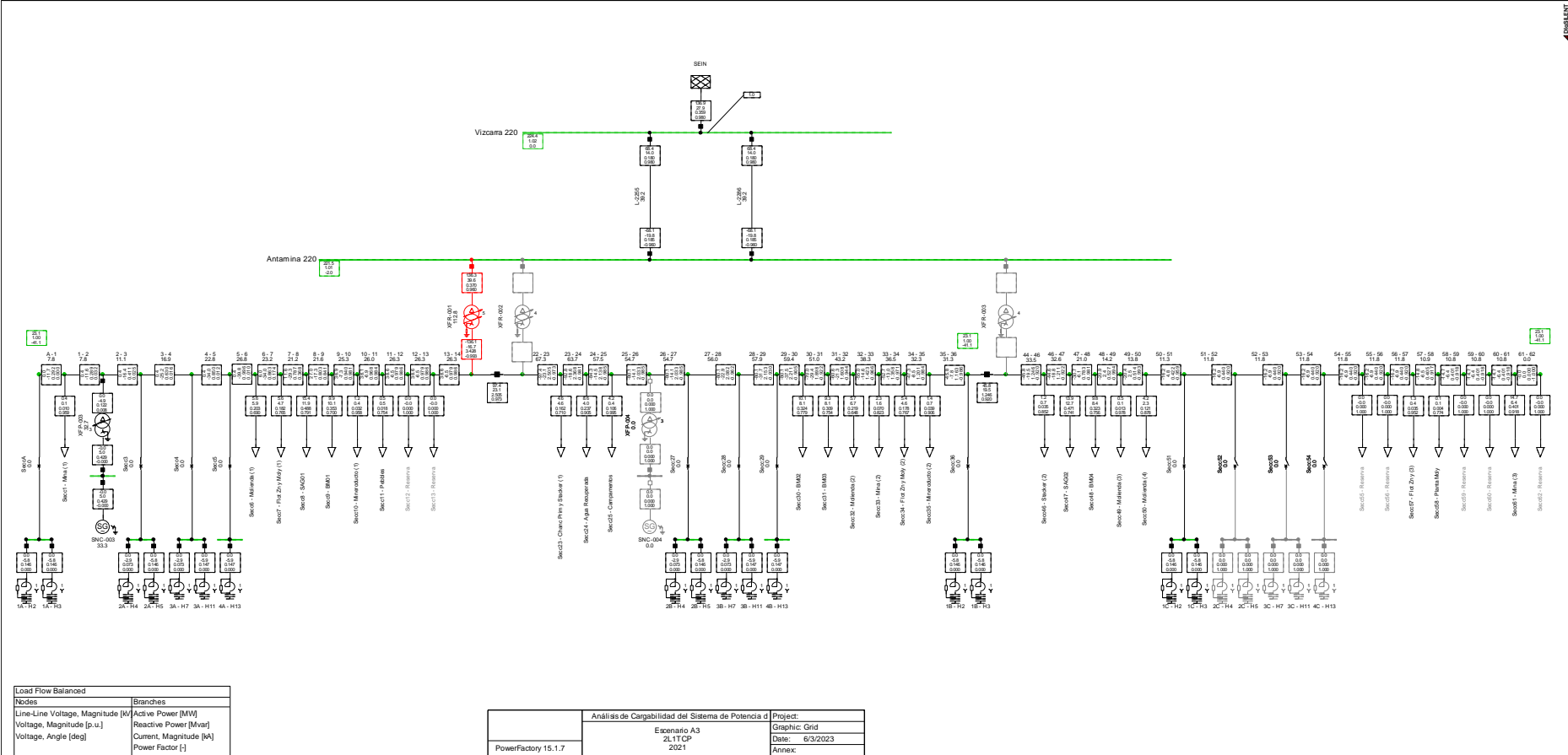
Escenario A1 - 2L2TCP



Escenario A2 - 1L2TCP



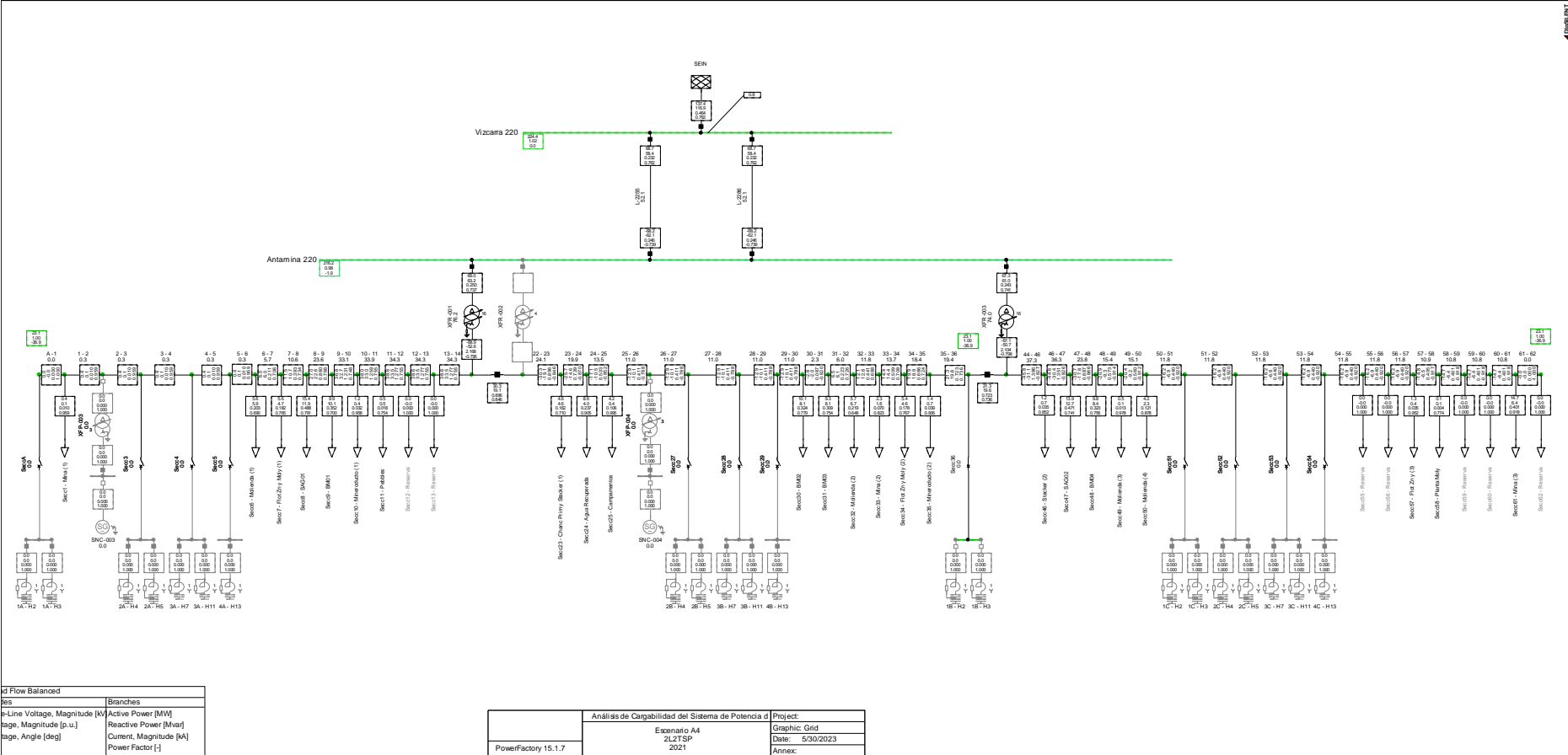
Escenario A3 - 2L1TCP



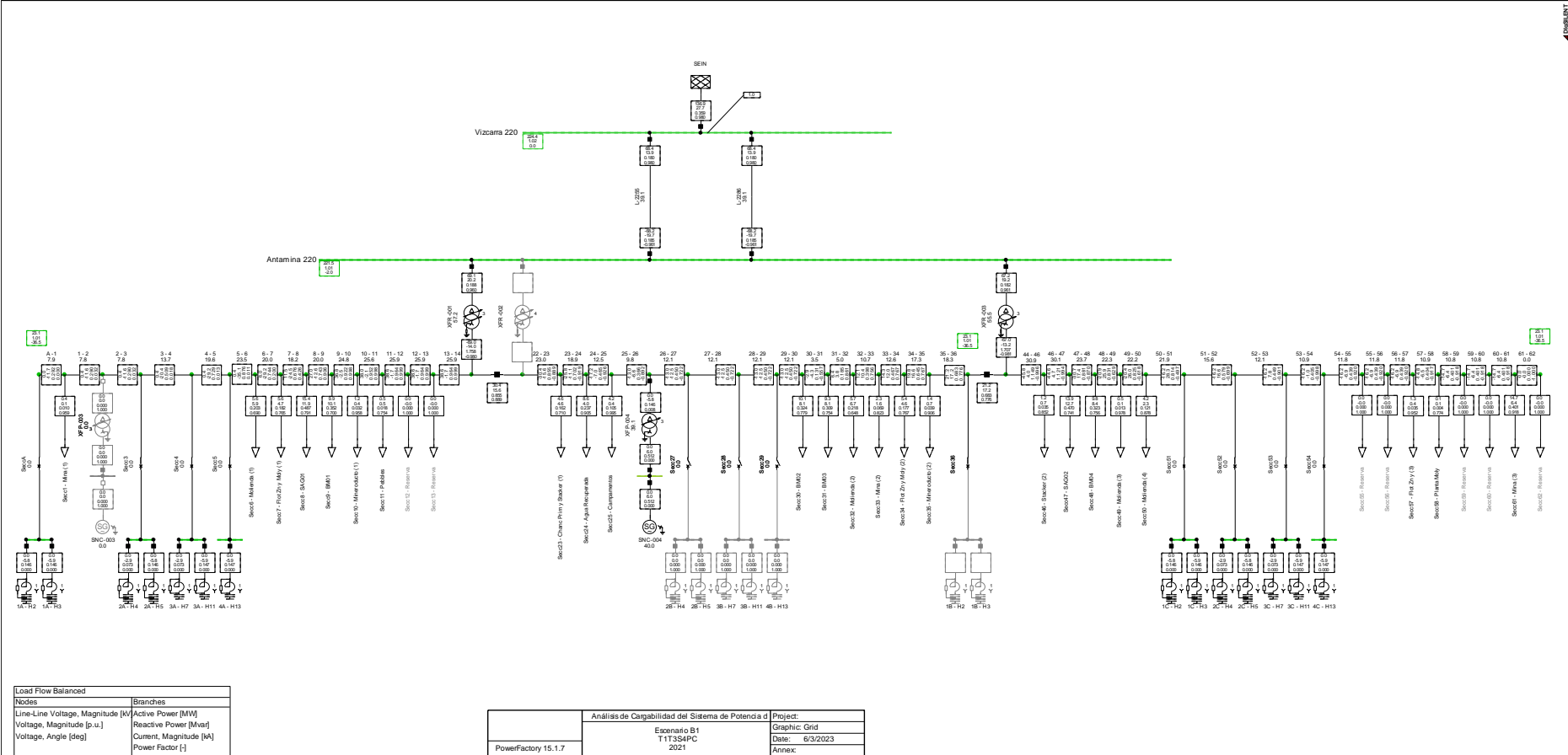
Load Flow Balanced	
Nodos	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Current, Magnitude [kA]
	Power Factor [-]

Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d		
PowerFactory 15.1.7	Escenario A3 2L1TCP 2021	Project: Graphic: Grid Date: 6/3/2023 Annex:

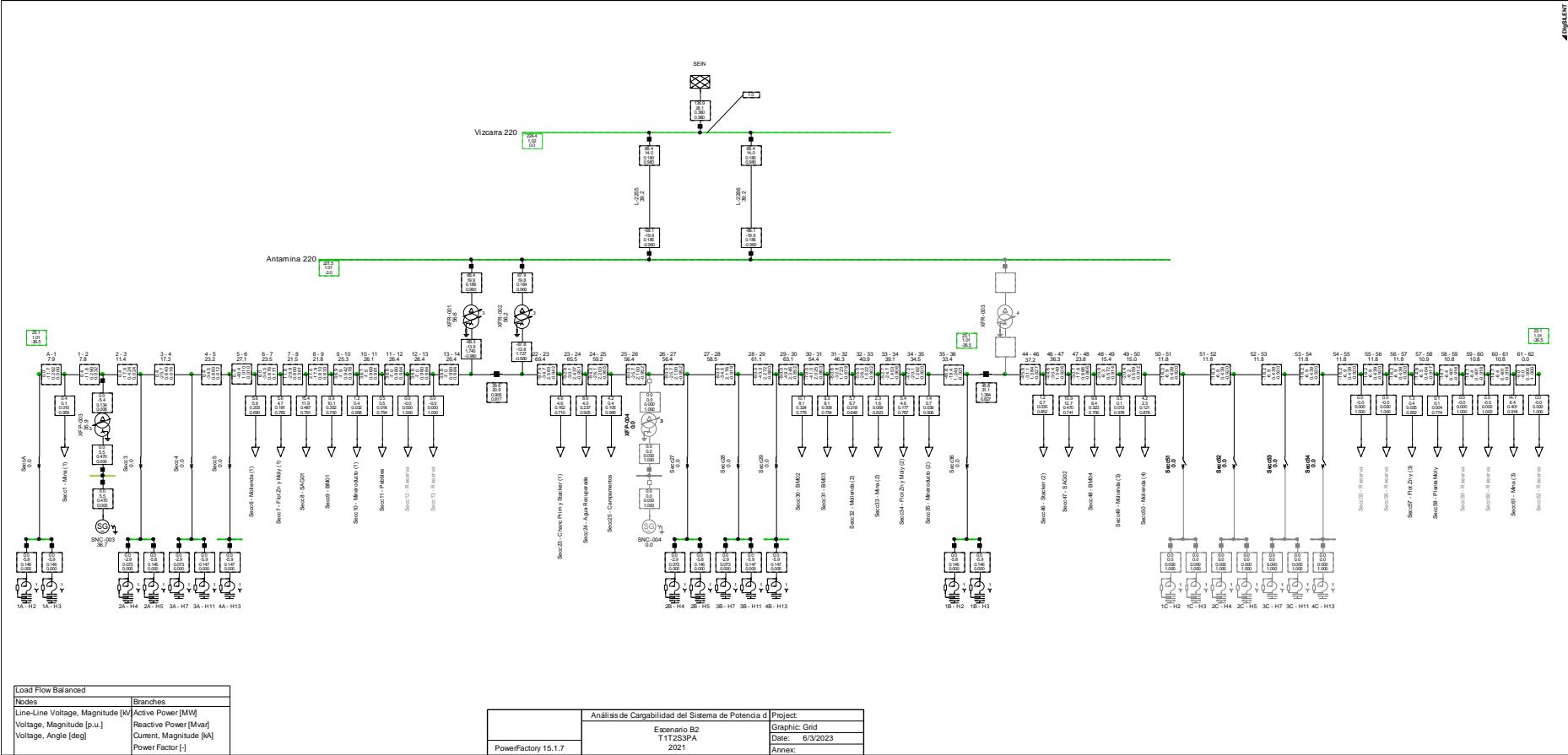
Escenario A4 - 2L2TSP



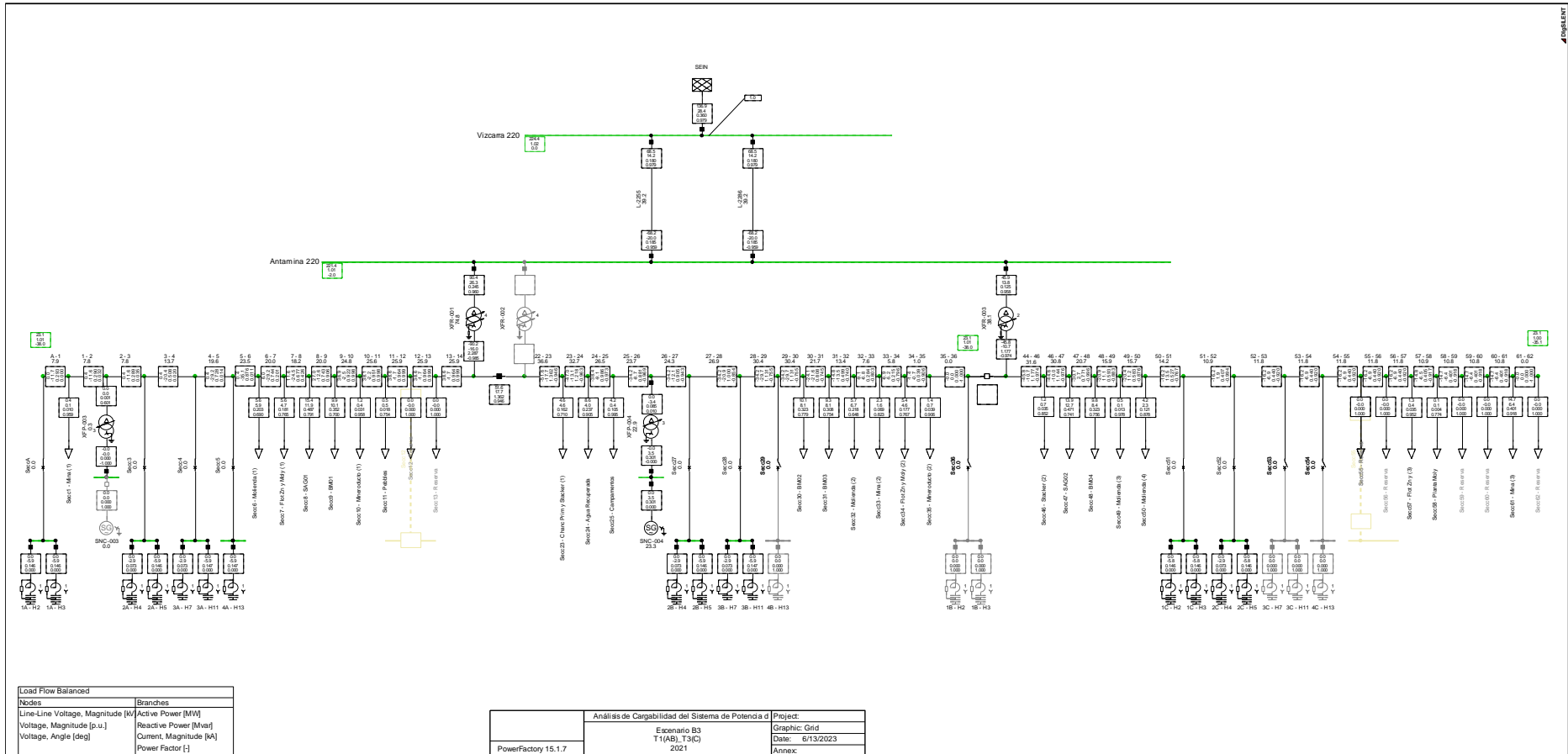
Escenario B1 - T1T3S4PC



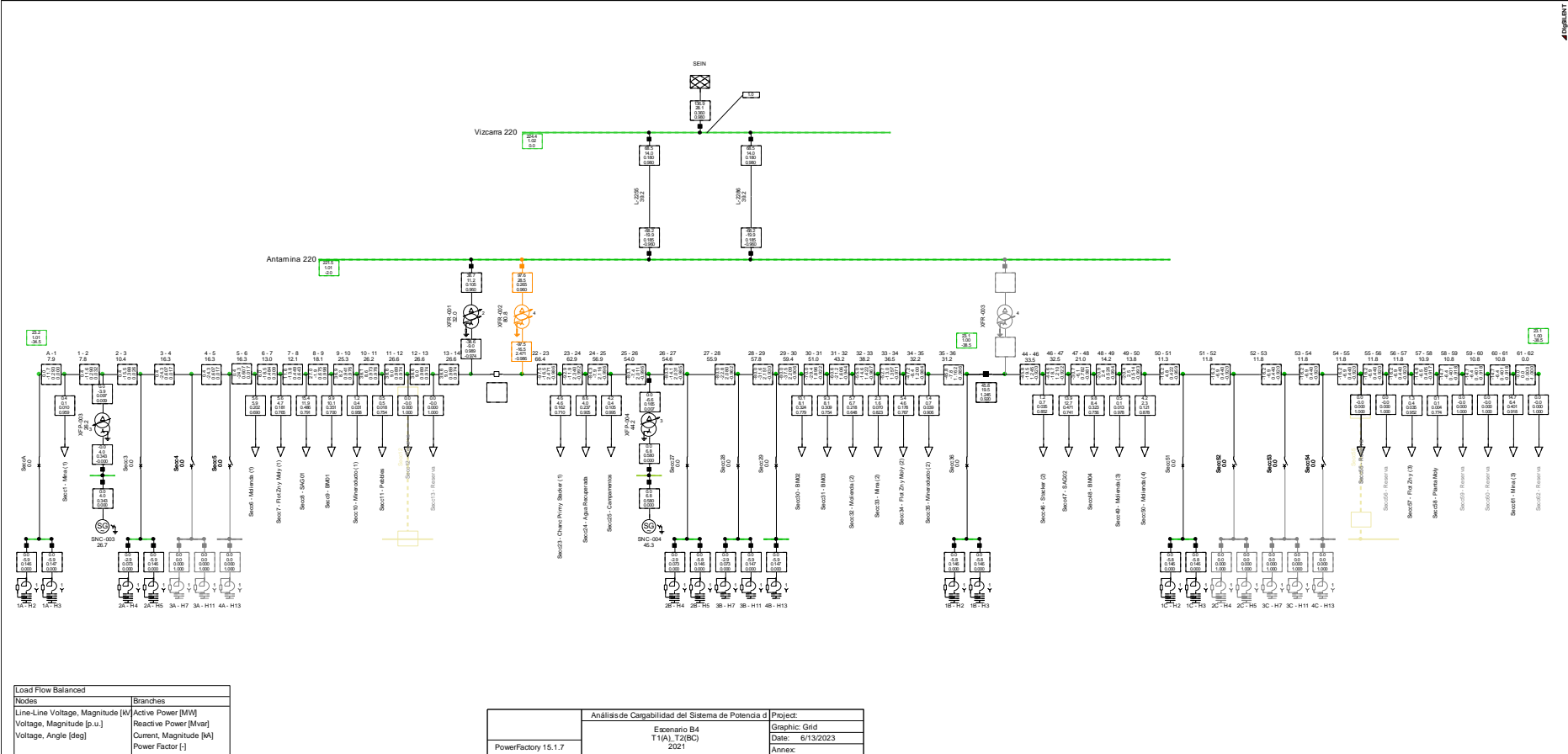
Escenario B2 - T1T2S3PA



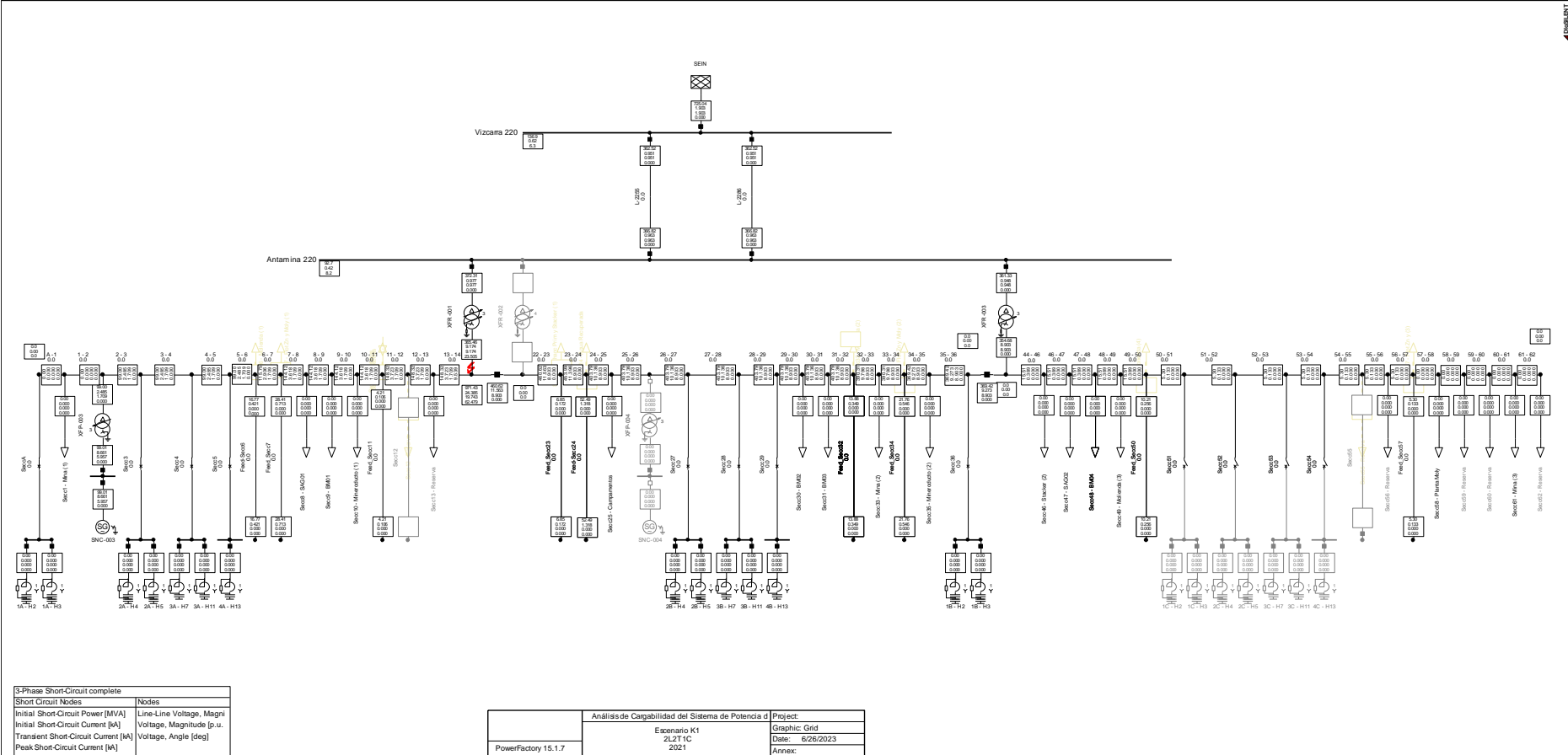
Escenario B3 - T1(AB)_T3(C)



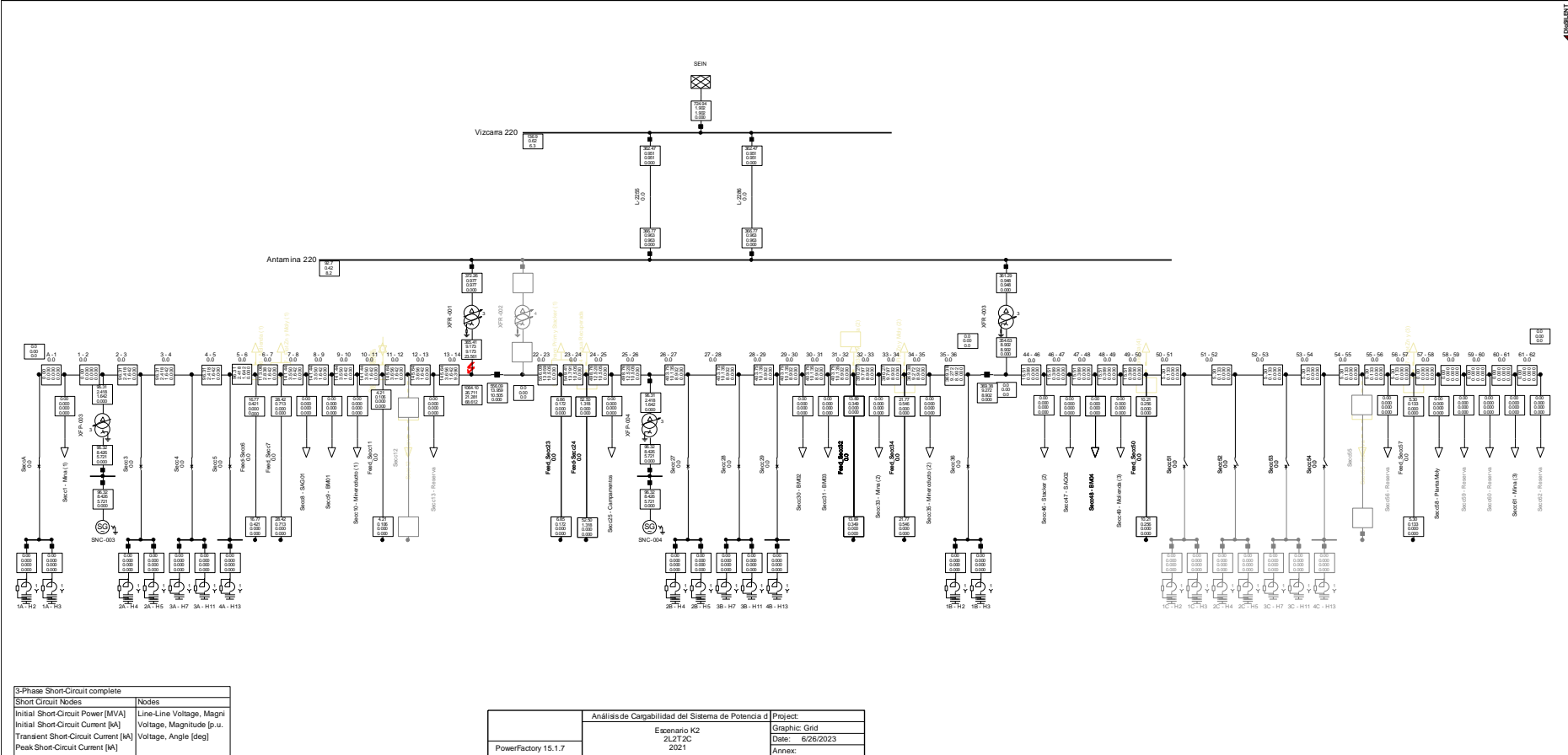
Escenario B4 - T1(A)_T2(BC)



Escenario K1 – 2L2T1C



Escenario K2 – 2L2T2C

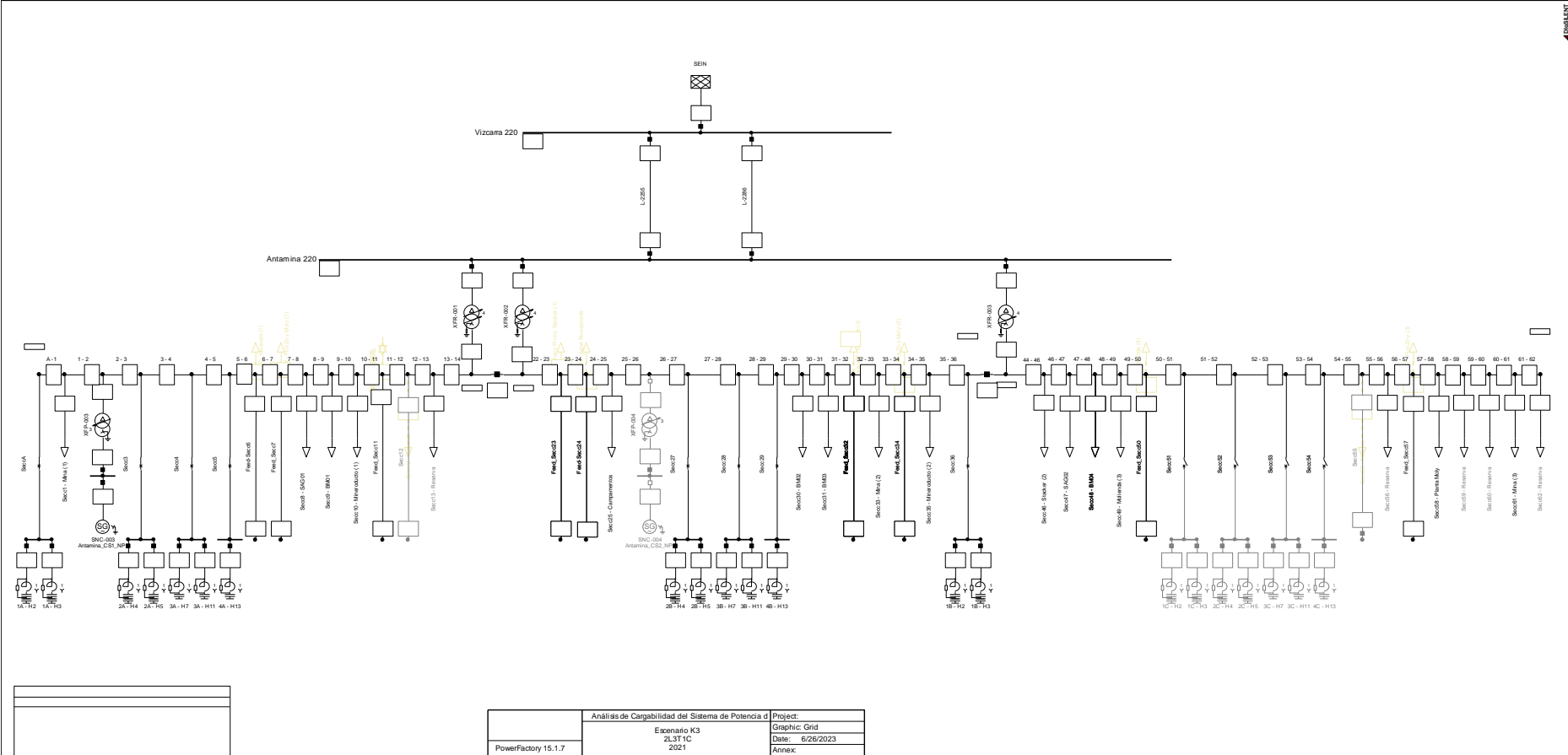


3-Phase Short-Circuit complete	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [MVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.
Transient Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]
Peak Short-Circuit Current [kA]	

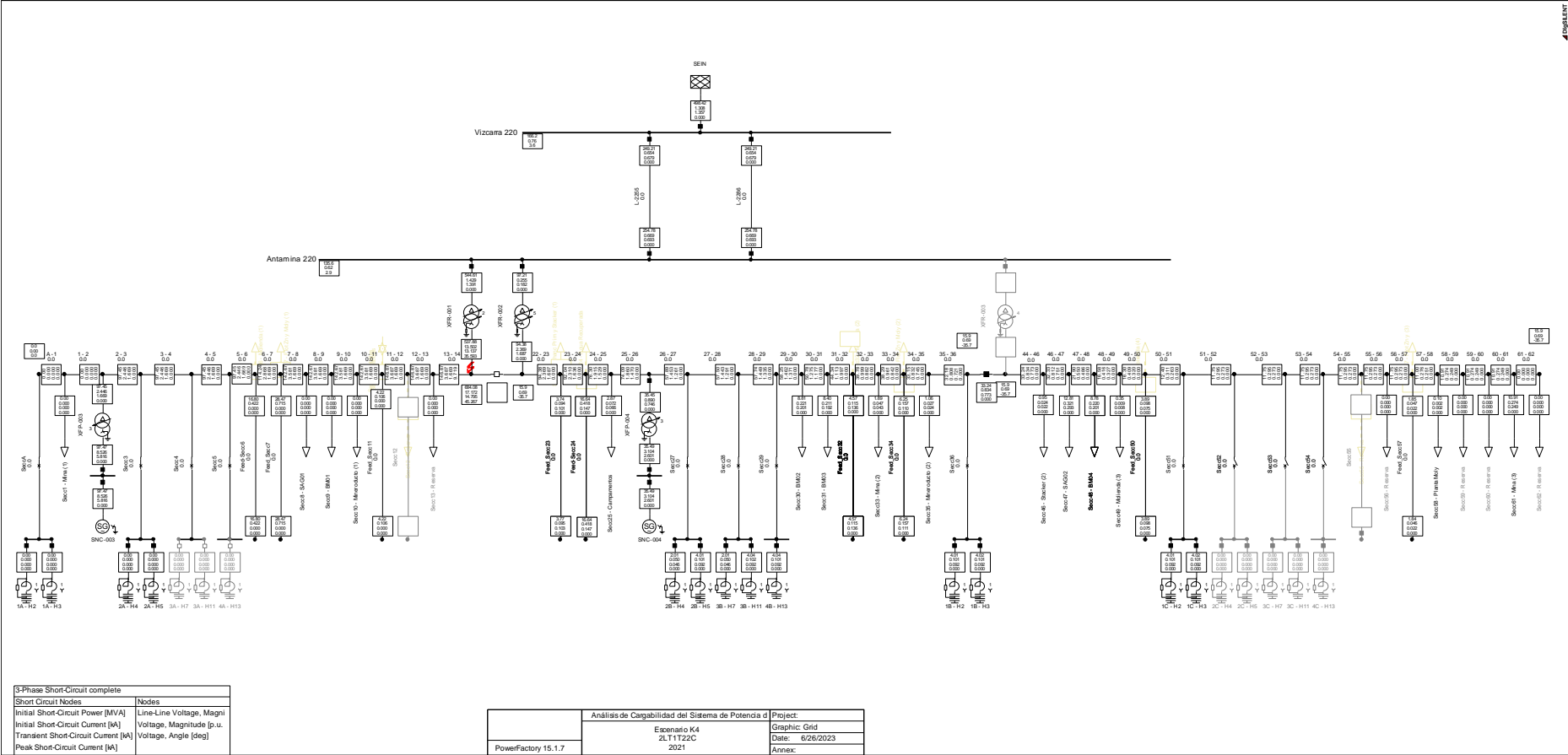
Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d		Project:
Escenario K2		Graphic Grid
2L2T2C		Date: 6/26/2023
2021		Annex:

PowerFactory 15.1.7

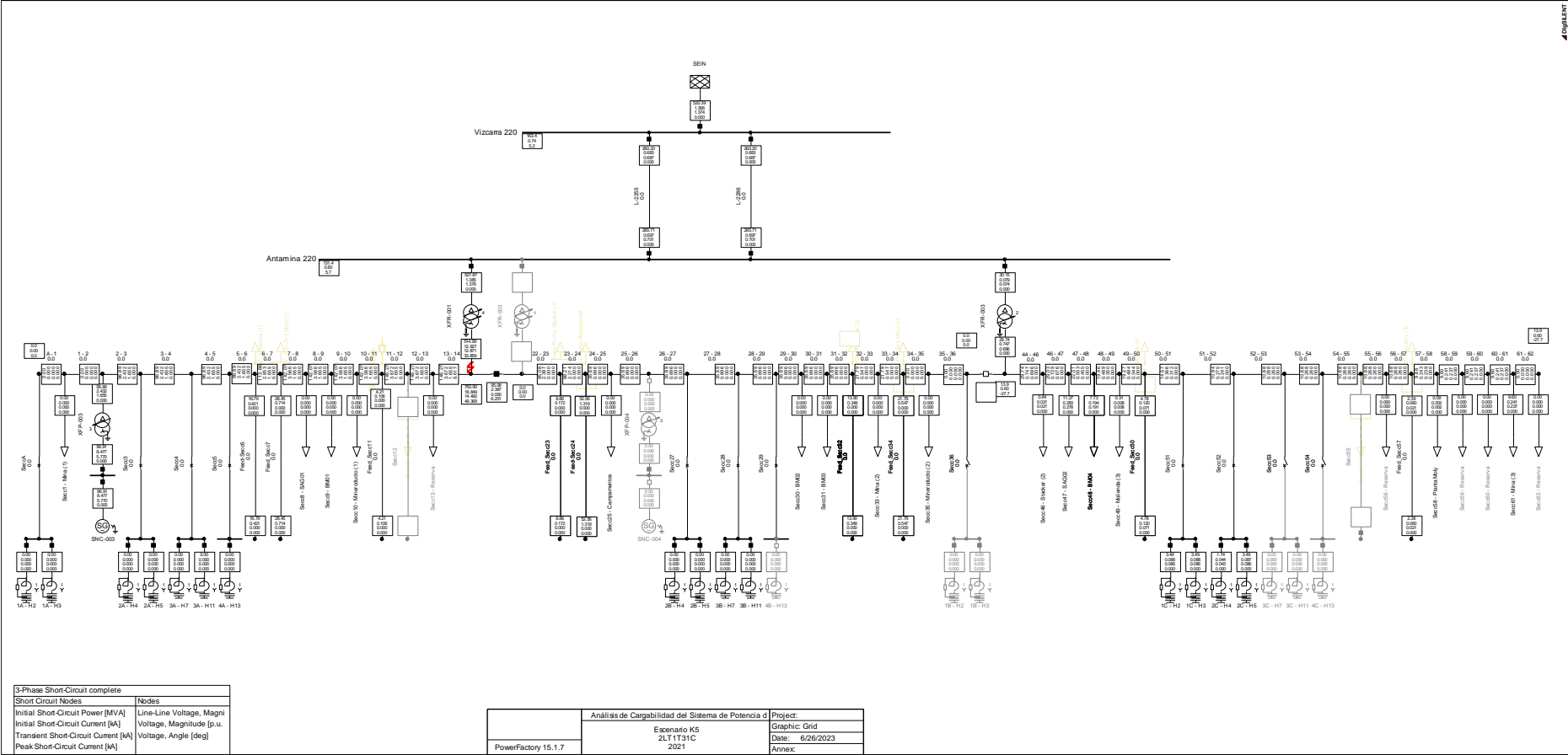
Escenario K3 – 2L3T1C



Escenario K4 – 2LT1T2C

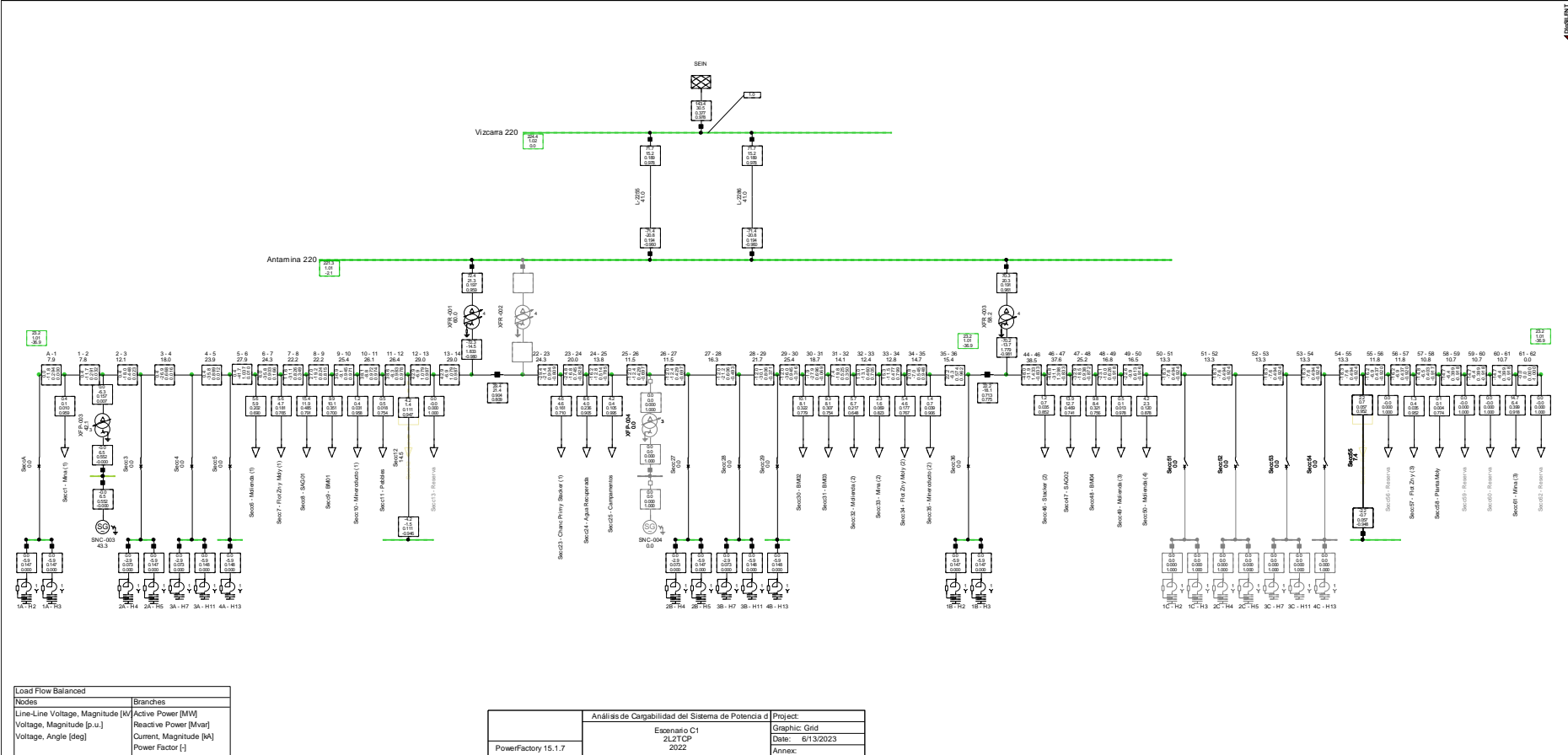


Escenario K5 – 2LT1T31C

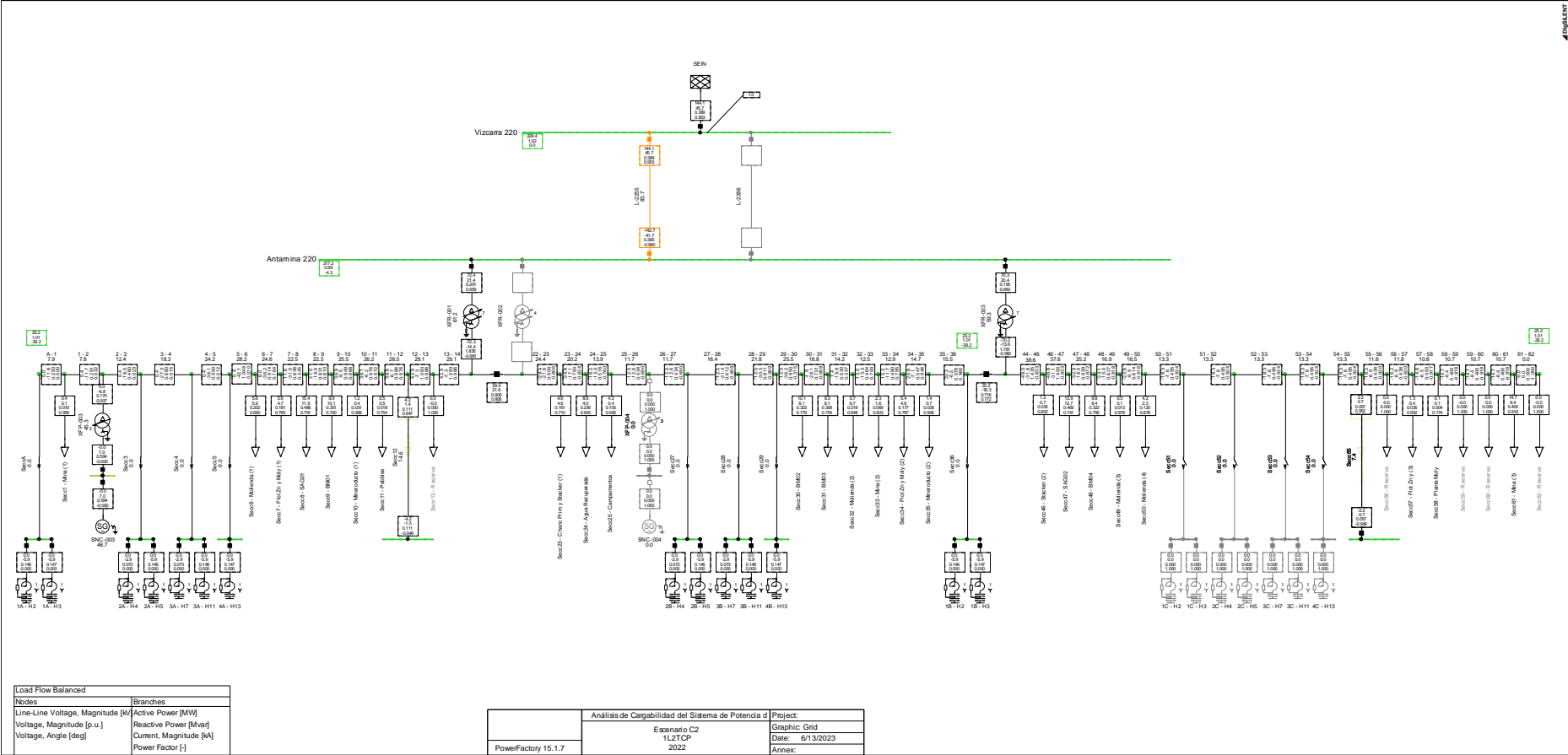


Anexo 4: Resultados de simulaciones con el proyecto

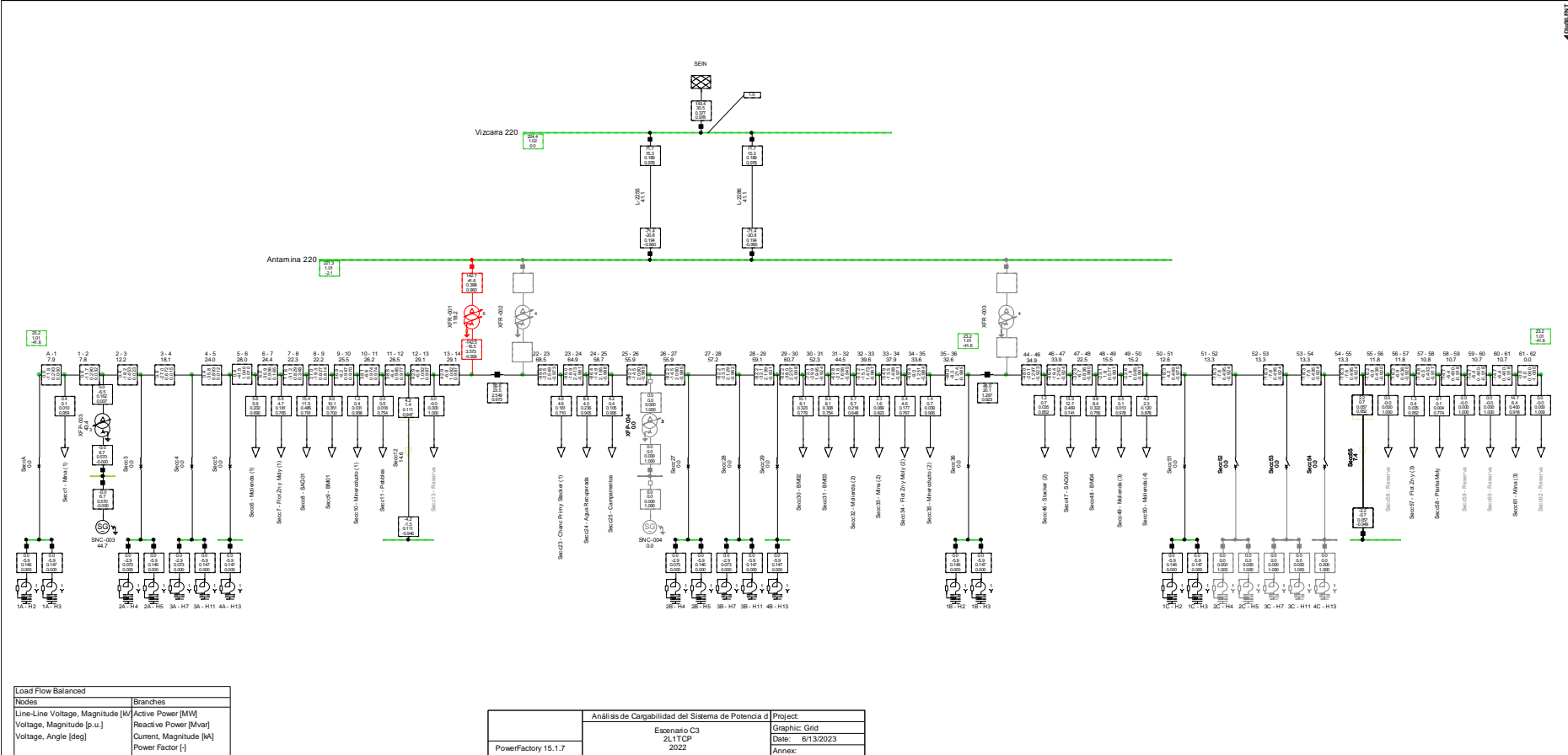
Escenario C1 - 2L2TCP



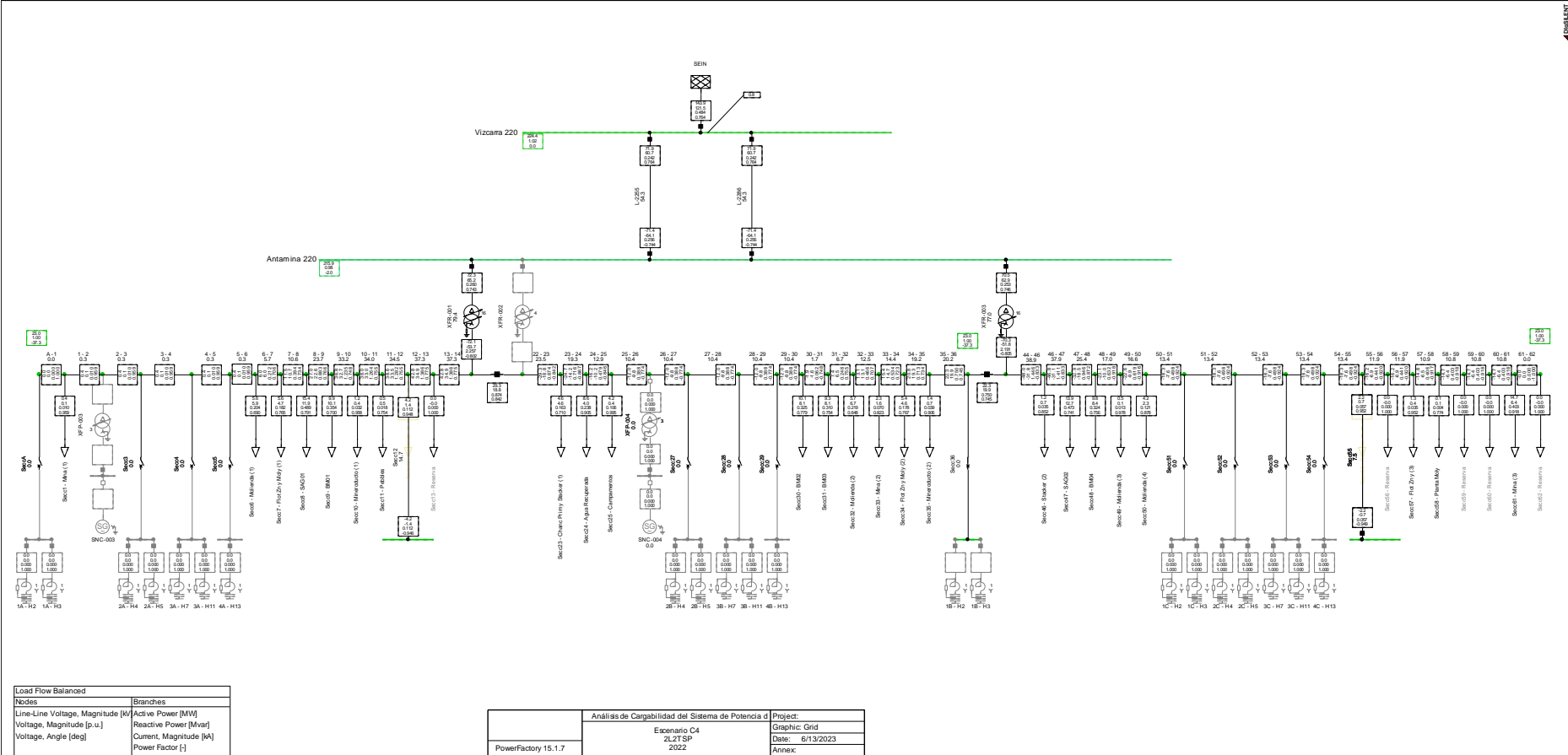
Escenario C2 - 1L2TCP



Escenario C3 - 2L1TCP



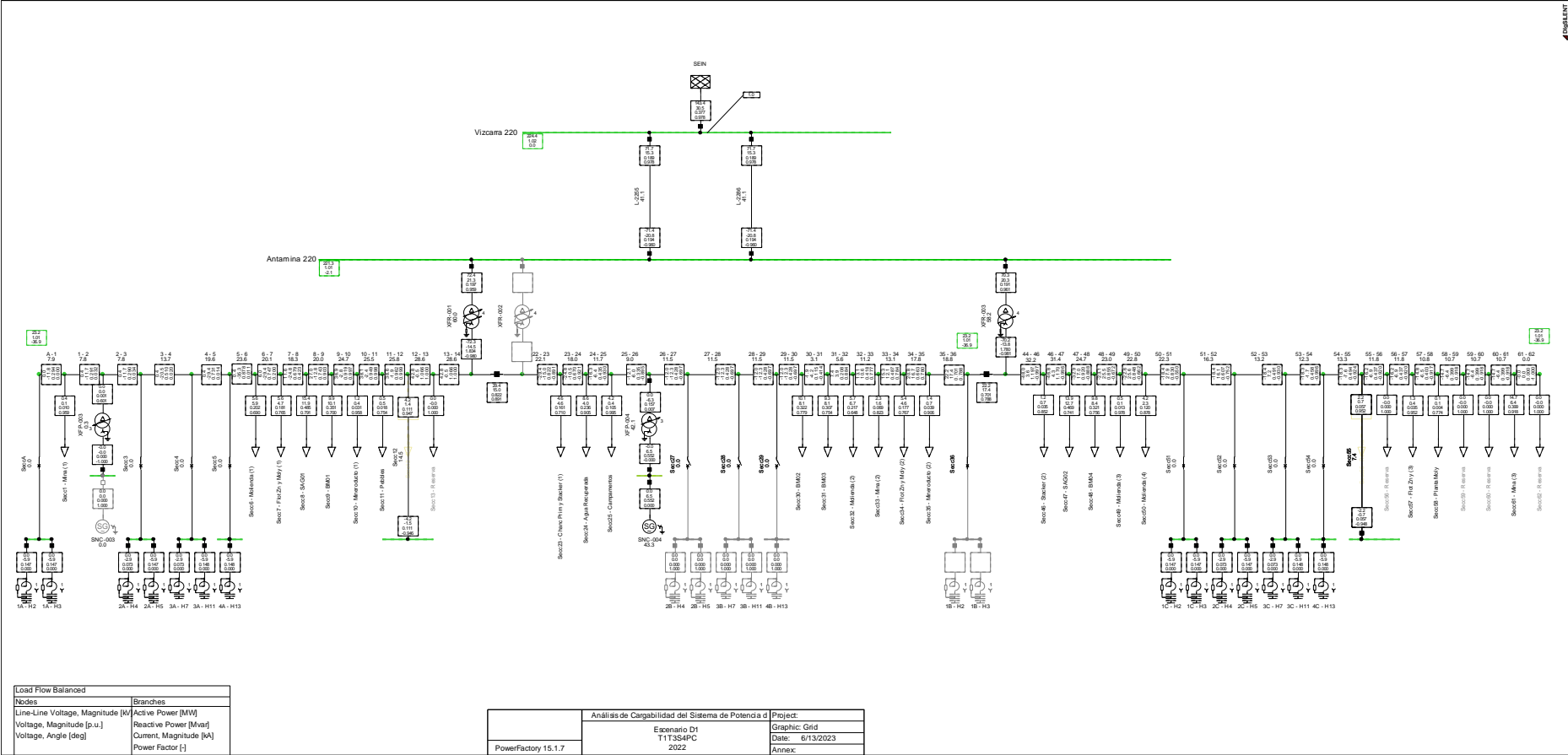
Escenario C4 - 2L2TSP



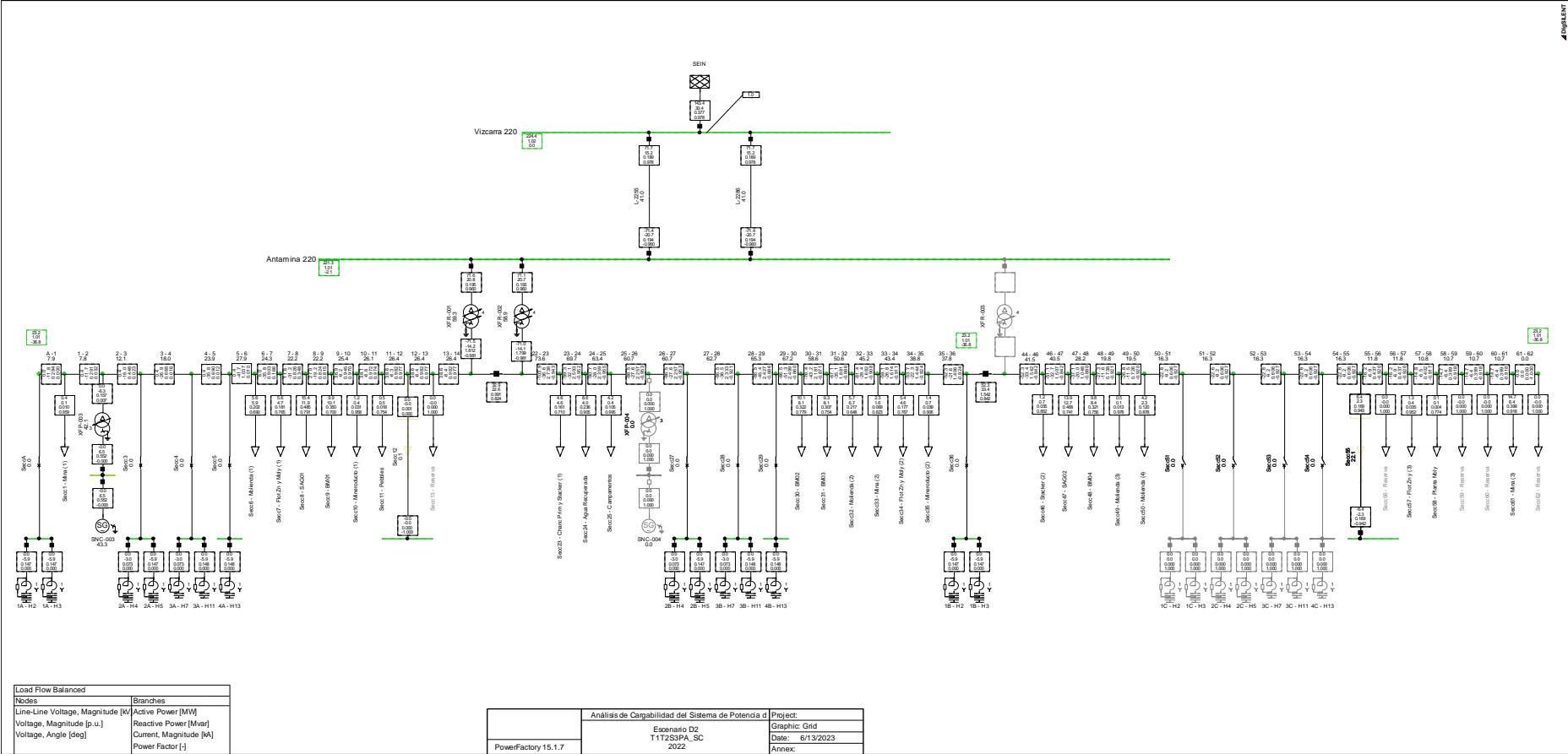
Load Flow Balanced	
Nodos	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Current, Magnitude [kA]
	Power Factor [-]

Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d		
Escenario C4		
2L2TSP		
2022		
PowerFactory 15.1.7		Project:
		Graphic: Grid
		Date: 6/13/2023
		Annex:

Escenario D1 – T1T3S4PC



Escenario D2 – T1T2S3PA_PC



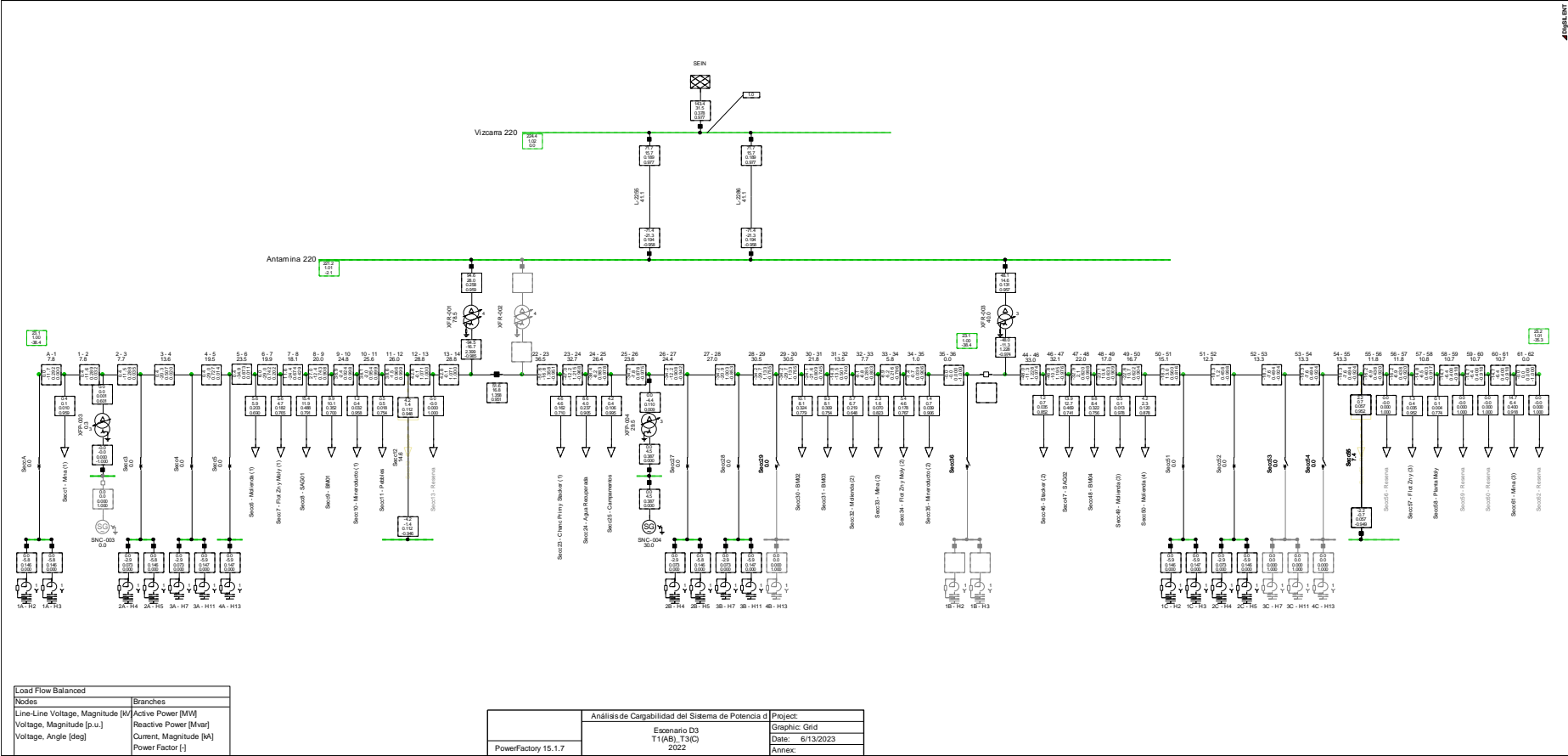
ALTA LENA

Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Current, Magnitude [kA]
	Power Factor [-]

Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d		Project:
Escenario D2		Graphic: Grid
T1T2S3PA_SC		Date: 6/13/2023
2022		Annex:

PowerFactory 15.1.7

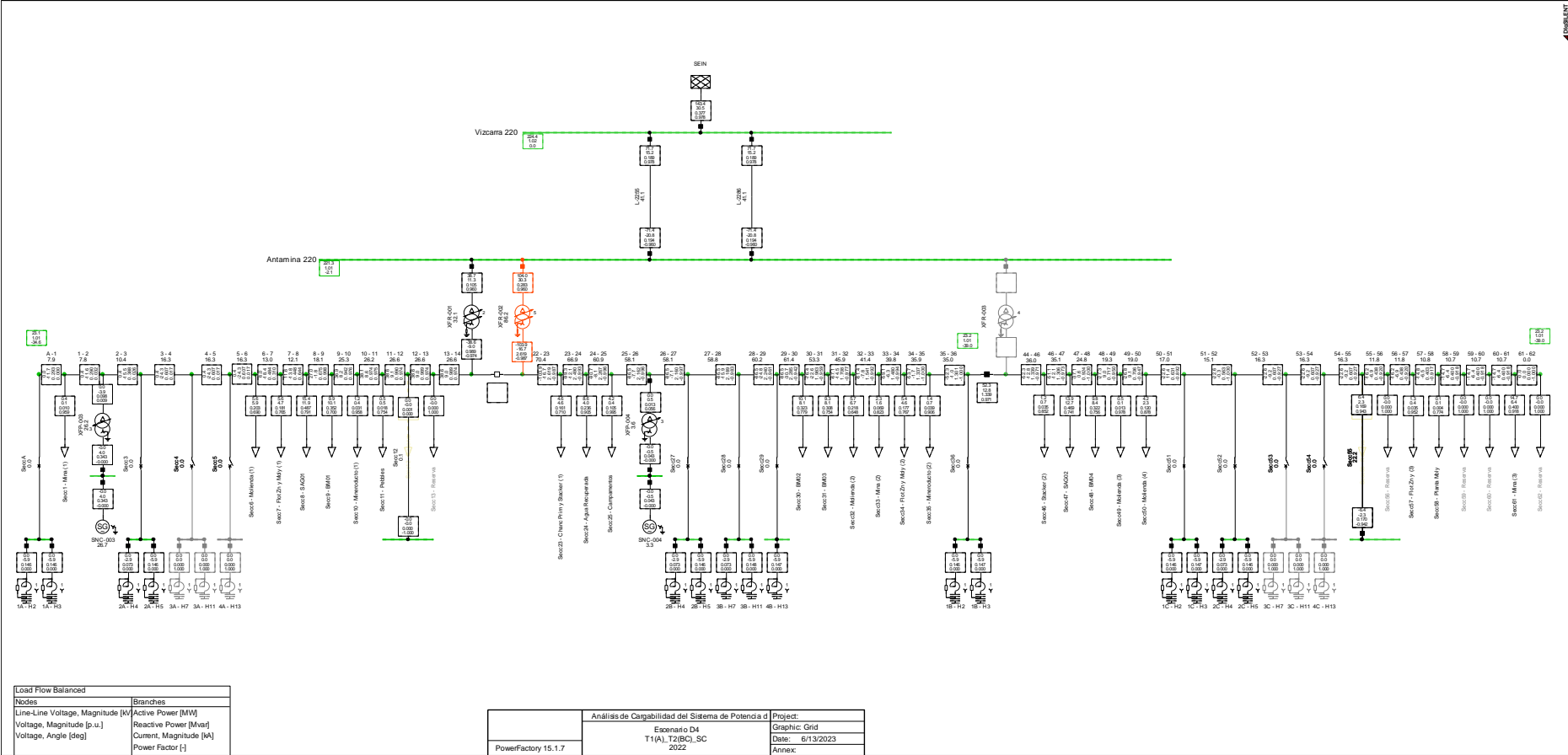
Escenario D3 - T1(AB)_T3(C)



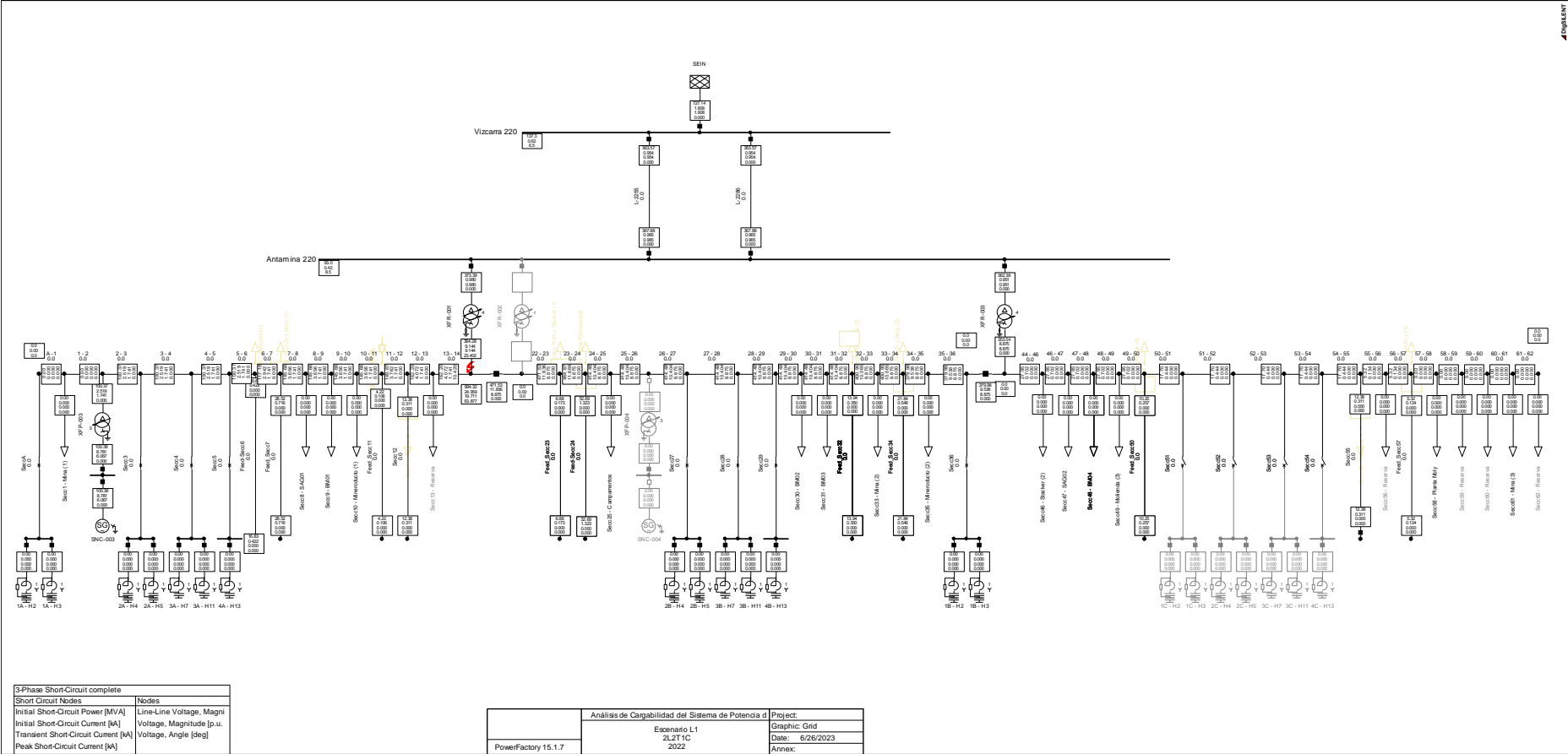
Load Flow Balanced	
Rúctas	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Current, Magnitude [kA]
	Power Factor [-]

Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d	
PowerFactory 15.1.17	Escenario D3 T1(AB)_T3(C) 2022
	Project: Graphic Grid Date: 6/13/2023
	Annex:

Escenario D4 - T1(A)_T2(BC)_SC



Escenario L1 – 2L2T1C

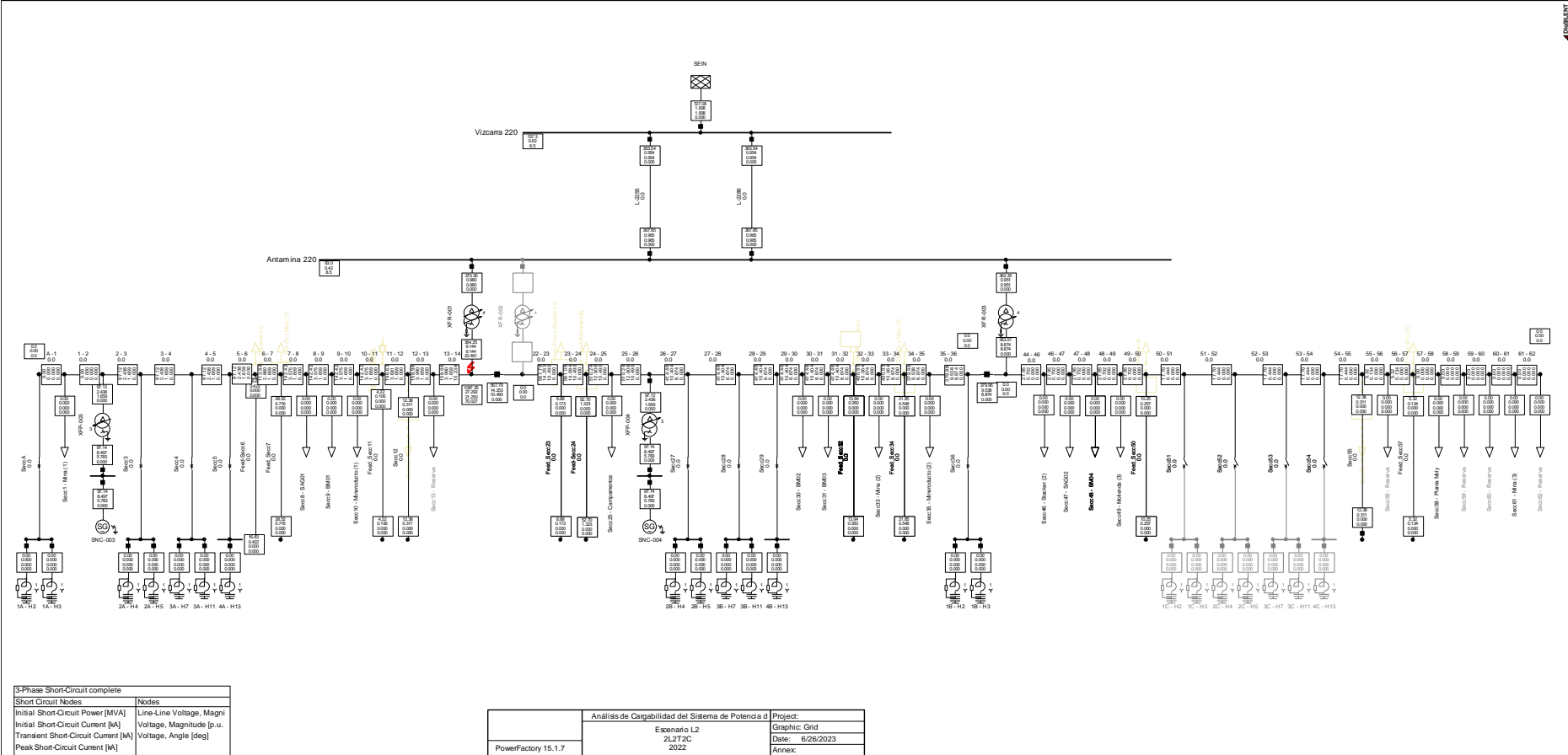


3-Phase Short-Circuit complete	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [MVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.
Transient Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]
Peak Short-Circuit Current [kA]	

Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d		
Project:	Escenario L1	Graphic: Grid
Date:	2L2T1C	6/26/2023
Annex:	2022	

PowerFactory 15.1.7

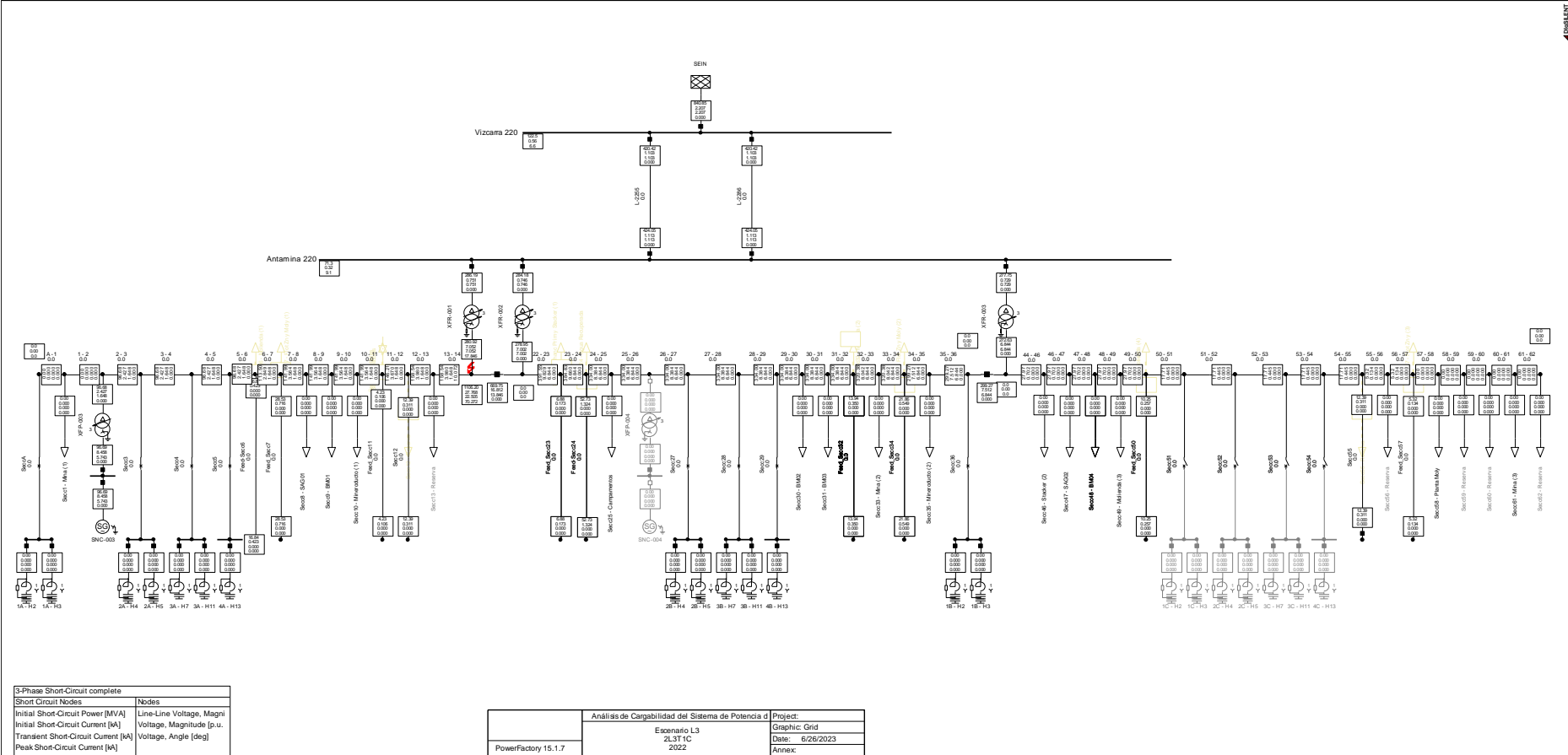
Escenario L2 – 2L2T1C



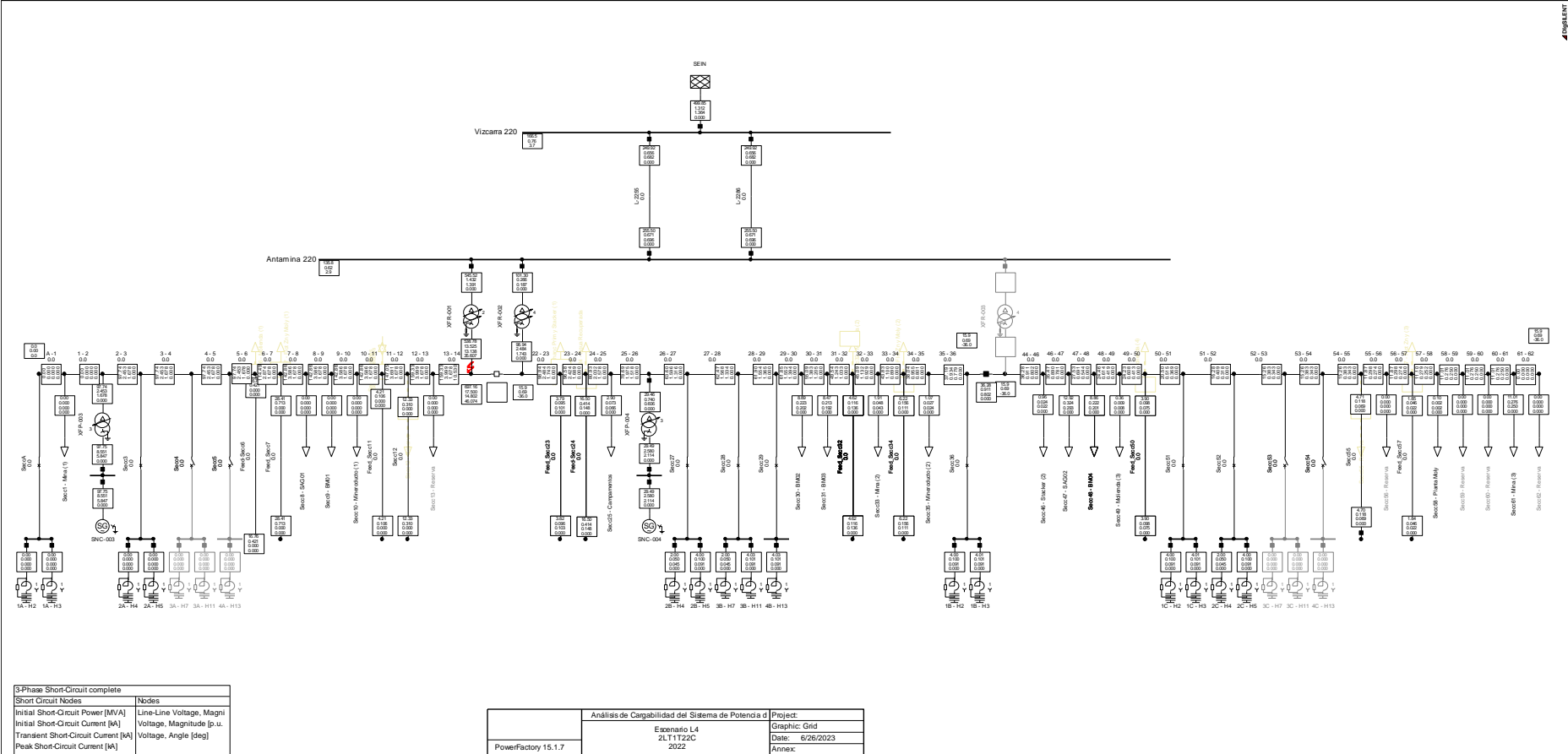
3-Phase Short-Circuit complete	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [MVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.
Transient Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]
Peak Short-Circuit Current [kA]	

PowerFactory 15.1.7	Análisis de Cargabilidad del Sistema de Potencia d	Project:
	Escenario L2	Graphic: Grid
	2L2T1C	Date: 6/26/2023
	2022	Annex:

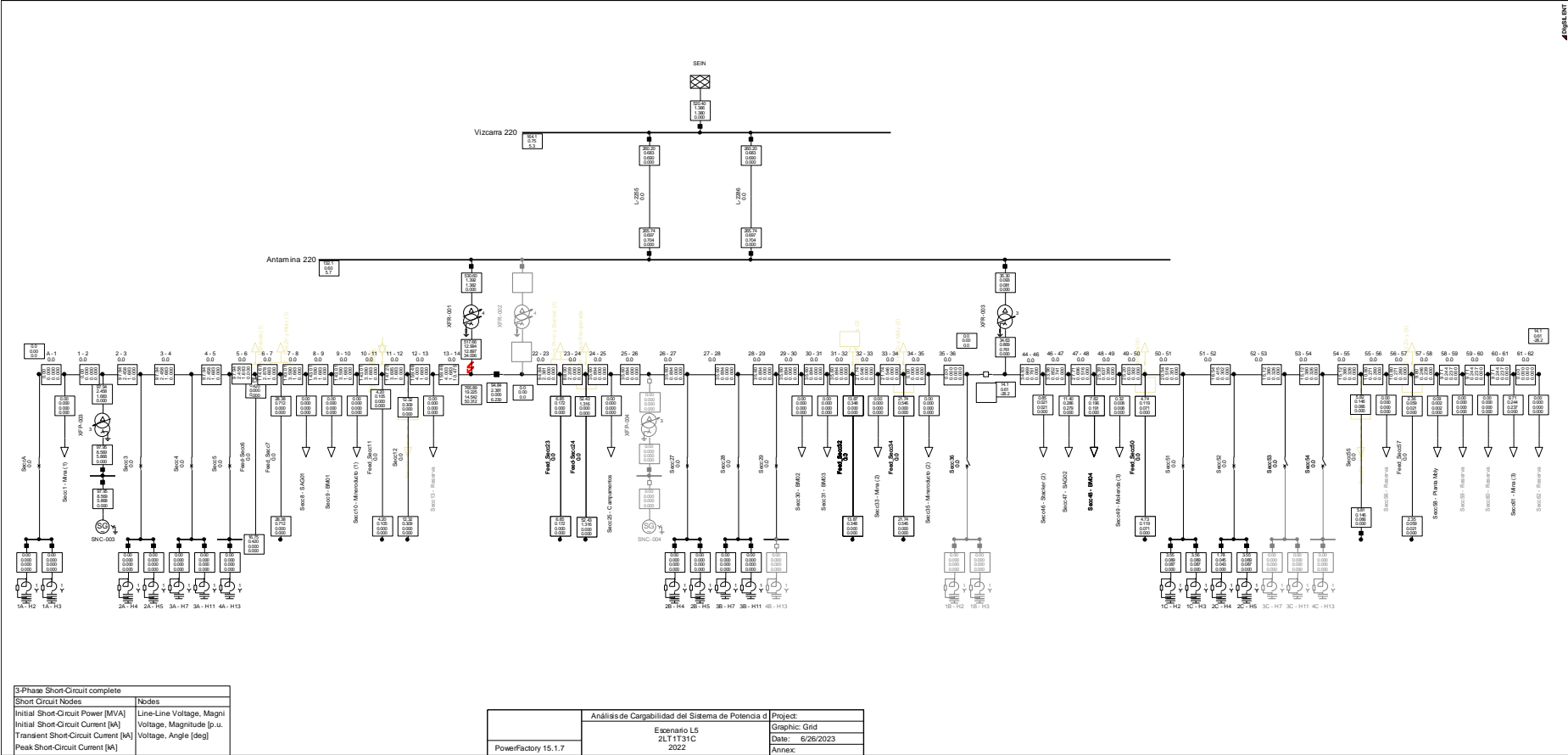
Escenario L3 – 2L3T1C



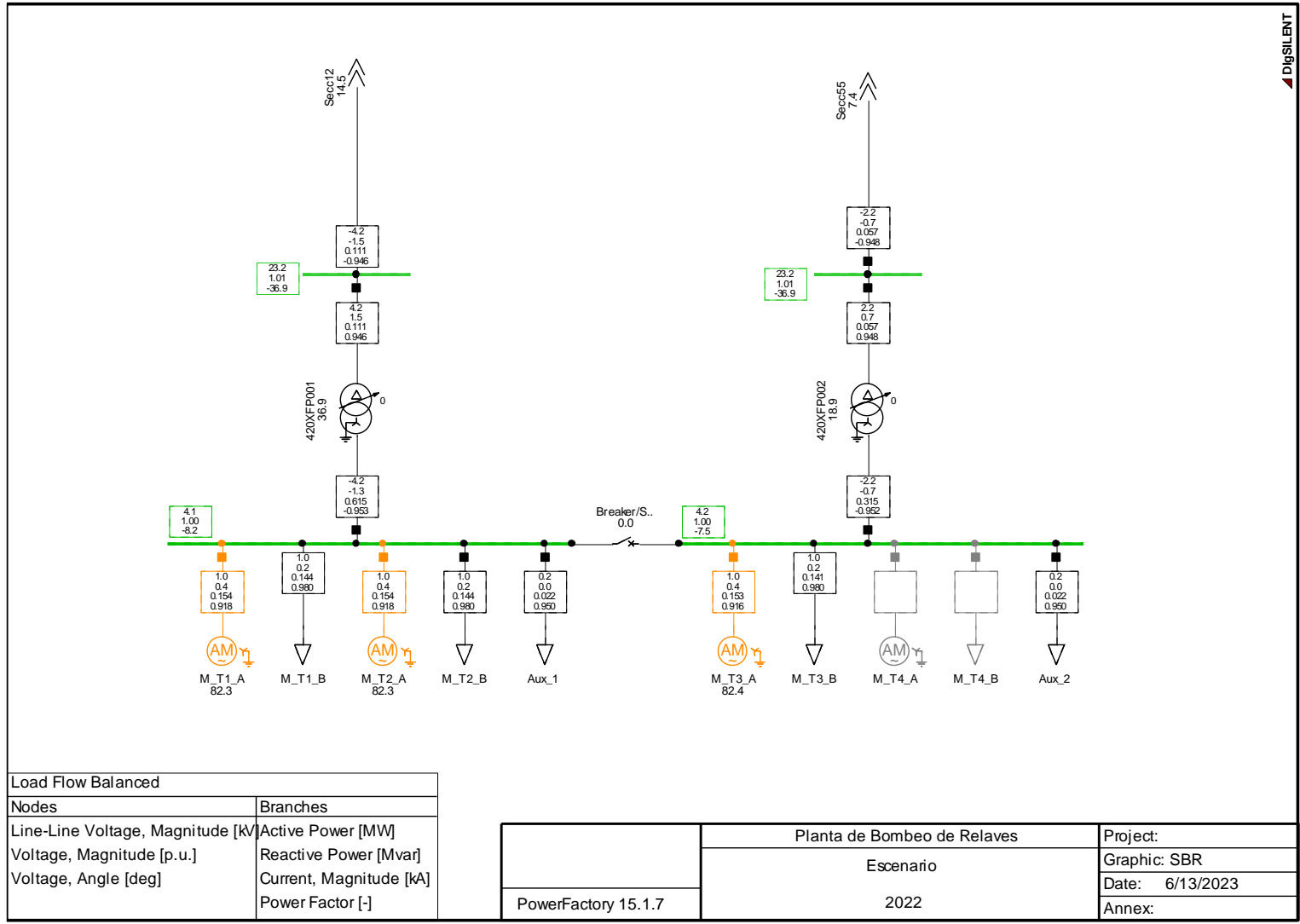
Escenario L4 – 2LT1T22C



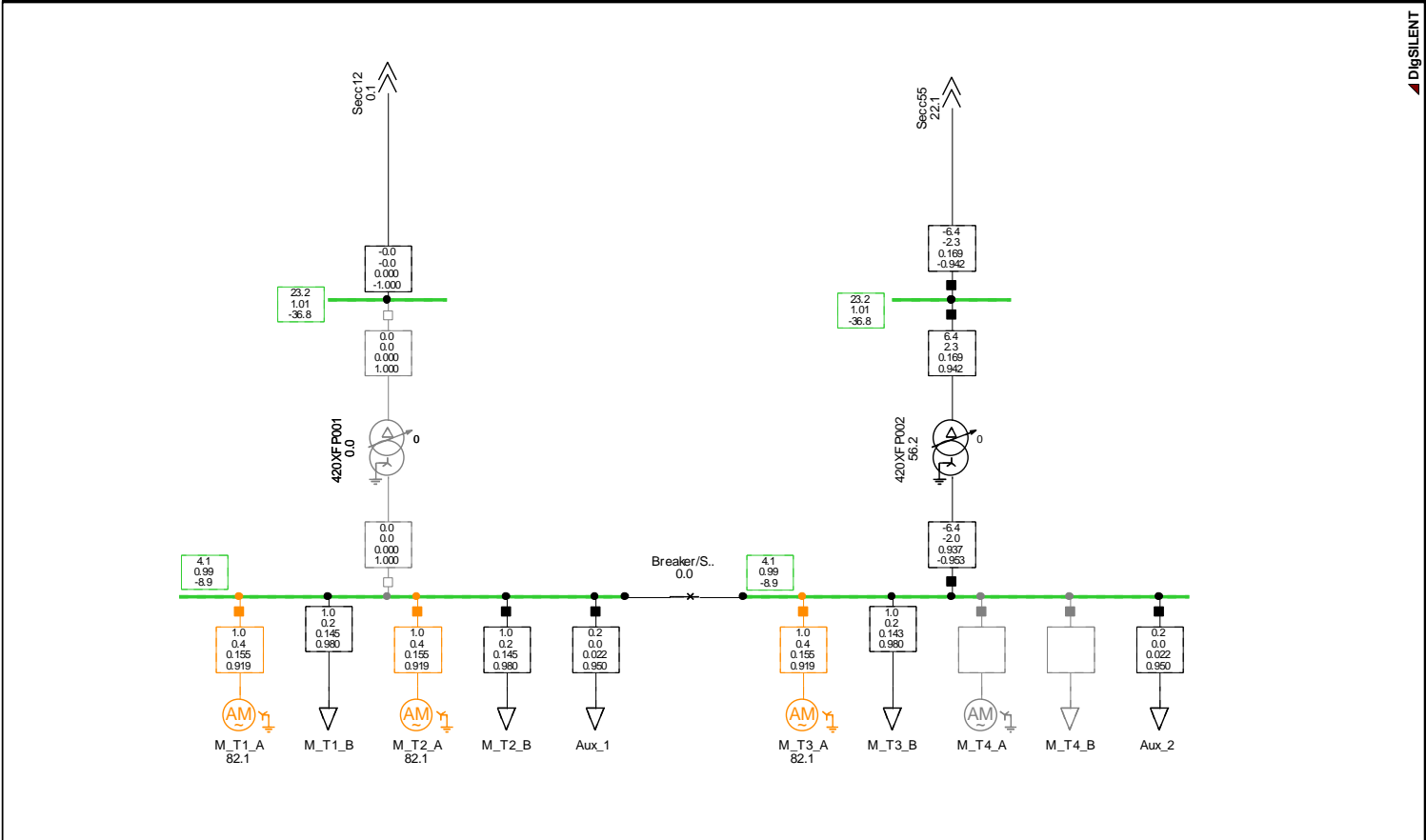
Escenario L5 – 2LT1T31C



Sistema de bombeo de relaves alimentado desde las secciones 12 y 55



Sistema de bombeo de relaves alimentado desde la sección 55



DIGSILENT

Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [MW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [Mvar]
Voltage, Angle [deg]	Current, Magnitude [kA]
	Power Factor [-]

PowerFactory 15.1.7

Planta de Bombeo de Relaves
Escenario
2022

Project:
Graphic: SBR
Date: 6/13/2023
Annex: