



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO ARMÓNICO EN PLANTAS HÚMEDAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

DANIEL ALONSO APARICIO ARIAS

PROFESOR GUÍA:
ALFREDO MUÑOZ RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
OSCAR MOYA ARAVENA
ALEJANDRO ESCOBAR LUCERO

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: DANIEL APARICIO A.
FECHA: 20/04/2010
PROF. GUÍA: Sr. ALFREDO MUÑOZ R.

ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO ARMÓNICO EN PLANTAS HÚMEDAS

El objetivo principal del presente trabajo de título, es realizar un estudio del comportamiento armónico en el Área Húmeda de minas de cobre, que utilizan el método de lixiviación. Esto, con el fin de analizar la posibilidad de encontrar una nueva alternativa, para la compensación de componentes armónicos eléctricos.

En la actualidad, la solución técnica corresponde a compensar en las salas eléctricas, existiendo una fuerte contaminación entre las salas y las respectivas cargas (que generalmente se encuentran bastante separadas). Dentro de los equipos contaminantes, se tienen sistemas transformadores-rectificadores, para el proceso de electro-obtención, que operan en media tensión y sistemas variadores de velocidad, para el control de bombeo de flujo variable, que operan en baja tensión.

Luego de definir la estructura del Área Húmeda a considerar, especificando los equipos incluidos y sus respectivos ciclos de trabajo, se procedió a describir la forma en que los dispositivos de electrónica de potencia son dispuestos y organizados en la planta. Posteriormente y en forma complementaria, se hicieron simulaciones en el programa ETAP, con el propósito de determinar la contaminación armónica del proceso, bajo condiciones normales de operación y para corroborar el cumplimiento de los requerimientos de la normativa, en el punto de acople común con el sistema de alimentación eléctrica (PCC).

Finalmente, se analizaron distintas posibilidades de filtrado armónico, según el comportamiento de las respectivas cargas.

Dentro del análisis efectuado, se pudo apreciar que el comportamiento de los sistemas de rectificación es prácticamente constante, de manera que la metodología actual (filtrado pasivo), es la solución técnico-económica más conveniente. Para el caso de baja tensión, el comportamiento de las cargas es variable, de manera que desde el punto de vista técnico, la implementación de filtros activos podría ser conveniente (no así desde el punto de vista económico). Por otra parte, una solución técnico-económica conveniente para el caso de baja tensión, consiste en la implementación de filtros comunes (ya sean activos o pasivos), junto con la disposición de los variadores de frecuencia fuera de las salas eléctricas (minimizando la distancia entre los variadores y sus respectivas cargas).

Como trabajo a futuro, se propone la elaboración de un algoritmo que permita minimizar el costo de instalación de la planta, el cual tome como variables de decisión, algunas de las siguientes opciones: el tipo de filtrado en baja tensión (pasivo, activo o híbrido), la definición de los grupos de variadores para el filtrado en conjunto y la posición de los gabinetes con variadores (fuera de la sala eléctrica), que minimice las distancias a los motores. Además, se propone desarrollar un estudio, que permita determinar la factibilidad de implementar variadores de frecuencia, para operación dentro de áreas clasificadas.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por todo el cariño y apoyo incondicional. A mis padres Irene y Raúl, ya que este gran logro es fruto de todo su amor, esfuerzo y preocupación. A mis hermanos Loreto y Raúl Andrés, por todo su afecto, ayuda y compañía. A mi tía Mirta, por todos los consentimientos y por ser prácticamente una segunda madre.

También expreso mi agradecimiento a los señores Alejandro Escobar y Rodrigo Marks, de quienes recibí constante apoyo, significativos aportes y por hacer posible el desarrollo de esta memoria.

Mi gratitud al profesor Alfredo Muñoz por sus valiosas contribuciones a este trabajo.

Finalmente, agradezco el apoyo de mis amigos y personas que han sido parte importante de mi vida universitaria.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Objetivos específicos o secundarios	2
1.2 Estructura de la memoria	2
Capítulo 2: Definición del Área Húmeda en estudio.....	3
2.1 Aspectos generales.....	3
2.2 Especificación de los consumos eléctricos de la planta.....	4
2.2.1 Etapas de extracción por solventes	4
2.2.2 Etapas de patio de tanques	5
2.2.3 Etapas de electro-obtención	6
2.2.4 Etapas de manejo de soluciones.....	8
2.3 Descripción y disposición de dispositivos de electrónica de potencia	11
2.3.1 Equipos rectificadores	11
2.3.2 Equipos variadores de frecuencia.....	12
Capítulo 3: Análisis de alternativas filtrado armónico	14
3.1 Aspectos generales y consideraciones	14
3.2 Análisis en media tensión	15
3.2.1 Método de filtrado	15
3.3 Análisis en baja tensión	16
3.3.1 Métodos de filtrado.....	16
3.3.2 Agrupación de filtros armónico.....	16
3.3.3 Distribución de variadores de frecuencia	16
3.3.4 Distancias entre variadores de frecuencia y respectivos motores.....	17
Capítulo 4: Conclusiones.....	19
Bibliografía.....	20
Apéndice A: Proceso productivo del cobre por lixiviación.....	21
Proceso de chancado.....	21
Proceso de aglomeración.....	22
Proceso de lixiviación.....	23
Proceso de extracción por solventes.....	24
Proceso de electro-obtención.....	26
Apéndice B: Límites de contaminación armónica.....	28
Aspectos generales	28
Límites de distorsión de tensión	29

Límites de distorsión de corriente	29
Apéndice C: Diagrama unilineal	30
Apéndice D: Especificación de equipos considerados en la definición del Área Húmeda	32
Apéndice E: Plano de disposición general de equipos del sistema de rectificación.....	41
Apéndice F: Plano de disposición general de salas eléctricas de baja tensión	46
Apéndice G: Modelación y simulaciones en el software ETAP	61
Modelación del Área Húmeda.....	61
Simulación del comportamiento eléctrico del Área Húmeda en el software ETAP	65
Análisis de resultados	69
Apéndice H: Librería de motores en el programa ETAP	72
Apéndice I: Detalle del cálculo de los respectivos filtros armónicos.....	74

Capítulo 1: Introducción

Esta memoria, surge de la necesidad de la empresa OUTOTEC¹, de ofrecer soluciones tecnológicas a menores costos. Particularmente, busca evaluar la posibilidad de reducir costos de instalación de equipos eléctricos, en plantas de extracción por solventes y electro-obtención, dentro del proceso productivo de cobre por el método de lixiviación.

Por otra parte, la incorporación de equipos de electrónica de potencia en procesos industriales, ha permitido hoy en día la optimización y un mayor aprovechamiento en el uso de la energía eléctrica. Si bien las ventajas de este tipo de equipos son muchas, también existen ciertas desventajas como es el problema de contaminación armónica en la red de suministro.

Los niveles de contaminación armónica, se encuentran acotados según normativas (como es la norma IEEE 519²), de manera que si la operación del proceso industrial sobrepasa dichos límites, se deben agregar dispositivos que permitan mitigar las ondas armónicas.

Asimismo y desde el punto de vista de la disciplina eléctrica, se tiene que los procesos mineros son consumos eléctricos con distintos comportamientos. Existen cargas eléctricas de flujo variable, como es el caso de: correas, mezcladores, molinos, etc., así como redes en corriente continua para dar suministro al proceso de electro-obtención. Producto de esto, se implementan equipos de electrónica de potencia que conllevan a la implementación de soluciones para la reducción de armónicos.

Por ende, el objetivo principal de esta memoria es hacer un estudio del comportamiento armónico en el área húmeda de minas de cobre, que utilizan el método de lixiviación. Esto, con el fin de analizar una posible nueva solución de compensado de componentes armónicos eléctricos.

En la actualidad, la solución técnica corresponde a filtrar en salas eléctricas, existiendo una fuerte contaminación entre la sala y la respectiva carga (generalmente distante).

En términos generales se analizará el comportamiento armónico completo:

- Armónicas producidas por cargas no lineales de baja tensión (los equipos operan con flujo variable y por ende utilizan variadores de velocidad)
- Armónicas producidas por cargas no lineales en sistemas de media tensión (particularmente, los sistemas de transformación-rectificación para electro-obtención)

Según los requerimientos acordados con la empresa generadora de este estudio, queda fuera del alcance de este trabajo de título, la investigación acerca de las últimas tecnologías (o las que estén en desarrollo) en temas relacionados con: métodos de producción de cobre, tecnologías de filtrado armónico y operación (o funcionamiento) de equipos de electrónica de potencia (entre

¹ OUTOTEC corresponde a uno de los proveedores líderes en entrega de soluciones de procesos, tecnologías y servicios, para las industrias mineras y metalúrgicas. Además, se caracteriza por utilizar su vasta experiencia y conocimientos técnicos proporcionando plantas, equipos y servicios, basados mayormente en tecnologías propias.

² Las Plantas Húmedas de OUTOTEC son instaladas en cualquier parte del mundo, motivo por el cual, dicha Compañía utiliza por estándar interno, la norma internacional vigente más reconocida (y a la que muchas normativas de distintos países se refieren), que corresponde a la norma IEEE 519-1992

otros). Centrándose en indagar en nuevas opciones (o configuraciones) de filtrado armónico, en plantas húmedas existentes o próximas a ser instaladas.

1.1 Objetivos específicos o secundarios

Para cumplir con el objetivo principal de esta memoria, se propusieron ciertos objetivos secundarios que permitirán concretar el trabajo, estos son:

- Conocer el proceso productivo del cobre por el método de lixiviación, actualmente en operación
- Estudiar el funcionamiento, desde un punto de vista teórico, de los dispositivos de electrónica de potencia, aplicados en las faenas mineras existentes
- Investigar sobre los requerimientos, establecidos por la respectiva normativa vigente, sobre límites de contaminación armónica
- Indagar en las tecnologías actuales para la mitigación de ondas armónicas y la metodología en que son aplicadas

1.2 Estructura de la memoria

Esta memoria se encuentra organizada en 3 capítulos (aparte de este capítulo introductorio). El Capítulo 2, define y entrega detalles sobre los equipos y cargas eléctricas a considerar en el estudio de la planta. A su vez, describe la forma en que van organizados los respectivos dispositivos de electrónica de potencia.

En el Capítulo 3, se discute sobre el tipo de filtrado armónico a utilizar (que puede ser de tipo pasivo, activo o híbrido), tanto para media como baja tensión. También se analiza la posibilidad de adoptar nuevas configuraciones para la mitigación de armónicos en baja tensión.

Finalmente, en el Capítulo 4 se concluye sobre los resultados obtenidos y se proponen posibles estudios a futuro.

Capítulo 2: Definición del Área Húmeda en estudio

2.1 Aspectos generales

El área húmeda se encuentra constituida por los procesos de extracción por solventes y electro-obtención. Donde deben considerarse las etapas de: extracción por solventes, patio de tanques, electro-obtención y manejo de soluciones (ILS, PLS y Refino)³.

A continuación, se definirá el área húmeda a considerar en este análisis, especificándose la arquitectura de la red eléctrica y los tipos de carga conectadas, así como las respectivas potencias y ciclos de trabajo de cada consumo. Dicha descripción, se realizará tanto a nivel general del Área, como también para cada sector, detallándose en cada caso, la potencia total conectada y la potencia total efectivamente demandada.

A grandes rasgos, el sistema eléctrico de toda el Área, se encuentra organizado de la siguiente manera:

- Dos barras principales denominadas 500-SGM-001 y 500-SGM-001a, que son independientes entre sí y que operan a un nivel de tensión de 23 [kV] @ 60 [Hz]. Estas, se conectan directamente a la subestación principal A1 y A2 respectivamente, aunque en caso de presentarse alguna falla en el suministro desde alguna subestación, pueden ser conectadas entre ellas, con el fin de no interrumpir el proceso productivo de la planta. Cabe mencionar que dichas barras corresponden al punto de acople común, en otras palabras, corresponden al punto donde deben cumplirse los requerimientos de contaminación armónica, especificados en la norma IEEE 519⁴
- Dos barras denominadas 500-SGM-002 y 500-SGM-003, que operan a un nivel de tensión de 23 [kV] y que se conectan a las barras 500-SGM-001 y 500-SGM-001a respectivamente. Dichas barras alimentan los sistemas de rectificación que serán descritos más adelante
- Tres barras denominadas 300-MCL-001, 400-MCL-001a y 500-MCL-001, que operan a un nivel de tensión de 0,48 [kV] y que se encuentran alimentadas por tres transformadores reductores (conectados a la barra 500-SGM-001) denominados 300-XFU-001, 400-XFU-001 y 500-XFU-001 respectivamente
- Cinco barras denominadas 300-MCL-002, 400-MCL-001, 810-MCL-001, 820-MCL-001 y 830-MCL-001, que operan a un nivel de tensión de 0,48 [kV] y que se encuentran alimentadas por cinco transformadores reductores (conectados a la barra 500-SGM-001a) denominados 300-XFU-002, 400-XFU-002 y 810-XFU-001, 820-XFU-001 y 830-XFU-001 respectivamente

³ Ver Apéndice A, para información complementaria sobre el proceso productivo del cobre por medio del método de lixiviación

⁴

Revisar

Apéndice B, para información detallada sobre los requerimientos de dicha normativa

Con el fin de facilitar el entendimiento de la arquitectura del sistema recién descrito, se ha incluido un diagrama unilineal de la planta, el que se encuentra disponible en el Apéndice C.

2.2 Especificación de los consumos eléctricos de la planta

2.2.1 Etapa de extracción por solventes

En base a la arquitectura del sistema eléctrico, que se describió recientemente, esta etapa se encuentra dividida en dos sub-sectores. El primero, se encuentra alimentado por la barra 300-MCL-001 y se denomina SX-1, mientras que el segundo, por la barra 300-MCL-002 y se denomina SX-2.

Las siguientes tablas, resumen los tipos de consumos eléctricos y también muestran las potencias totales de cada sub-sector.

Tabla 2.1: Descripción sub-sector SX-1

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
9	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
14	Motor de inducción (operación intermitente)	105,57	65,98	124,49	84,80	7,39	4,62	8,71	84,80
19	Motor de inducción (operado por VDF)	798,18	433,48	908,29	87,88	718,36	390,13	817,46	87,88
1	Servicios Auxiliares	83,89	40,63	93,21	90,00	79,70	38,60	88,55	90,00
2	Tablero (operación de 2 turnos - 16 horas)	24,15	14,75	28,30	85,34	10,87	6,64	12,74	85,34

Tabla 2.2: Resumen sub-sector SX-1

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área SX-1	1,012	0,555	1,154	87,68	0,816	0,440	0,927	88,03

Tabla 2.3: Descripción sub-sector SX-2

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
5	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
5	Motor de inducción (operación intermitente)	9,79	7,61	12,40	78,94	0,69	0,53	0,87	78,94
19	Motor de inducción (operado por VDF)	798,18	433,48	908,29	87,88	718,36	390,13	817,46	87,88
1	Servicios Auxiliares	72,48	35,10	80,54	90,00	68,86	33,35	76,51	90,00

Tabla 2.4: Tabla resumen sub-sector SX-2

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área SX-2	0,880	0,476	1,001	87,96	0,788	0,424	0,895	88,06

2.2.2 Etapa de patio de tanques

Según la topología del sistema eléctrico y al igual que en caso anterior, esta área se encuentra dividida en dos sub-sectores. Un sub-sector denominado TF-1 y alimentado por la barra 400-MCL-001a, y otro sub-sector denominado TF-2 y alimentado por la barra 400-MCL-001.

Las cuatro tablas que se muestran a continuación, resumen los consumos eléctricos y totales de cada sub-sector considerado.

Tabla 2.5: Descripción sub-sector TF-1

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
1	Calentadores	139,60	67,61	155,11	90,00	132,62	64,23	147,35	90,00
9	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
3	Motor de inducción (operación de 22 horas)	40,35	25,56	47,76	84,48	27,24	17,25	32,24	84,48
3	Motor de inducción (operación intermitente)	15,20	10,65	18,56	81,89	1,06	0,75	1,30	81,89
9	Motor de inducción (operado por VDF)	936,56	513,27	1067,98	87,69	842,90	461,94	961,18	87,69
1	Servicios Auxiliares	117,45	56,88	130,50	90,00	111,58	54,04	123,97	90,00

Tabla 2.6: Resumen sub-sector TF-1

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área TF-1	1,249	0,674	1,419	88,01	1,115	0,598	1,266	88,13

Tabla 2.7: Descripción sub-sector TF-2

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
5	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
8	Motor de inducción (operación intermitente)	318,04	199,34	375,35	84,73	22,26	13,95	26,27	84,73
5	Motor de inducción (operado por VDF)	867,70	473,02	988,25	87,80	780,93	425,71	889,43	87,80

Tabla 2.8: Resumen sub-sector TF-2

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área TF-2	1,186	0,672	1,363	86,99	0,803	0,440	0,916	87,72

2.2.3 Etapa de electro-obtención

Esta etapa se encuentra dividida en tres sub-sectores: El primero, que opera a un nivel de tensión de 0,48 [kV], es alimentado por la barra 500-MCL-001 y se denomina EW-1. Los otros dos sub-sectores se denominan Rectificadores A y Rectificadores B, operan a un nivel de tensión de 23 [kV] y como su nombre lo indica, corresponden a sub-etapas de rectificación que permiten suministrar con corriente continua las celdas de electro-obtención (a un nivel de tensión de 315 [V]). Estos, son alimentados por las barras 500-SGM-002 y 500-SGM-003 respectivamente.

En forma análoga a los casos anteriores, las siguientes tablas resumen los tipos de cargas eléctricas de cada sub-sector de la etapa.

Tabla 2.9: Descripción sub-sector EW-1

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
1	Equipo de Reparación Bordos Cátodos	63,15	34,09	71,77	88,00	4,42	2,39	5,02	88,00
2	Grúa Automática de Cosecha	137,36	74,14	156,09	88,00	103,02	55,60	117,07	88,00
1	Grúa de Mantenimiento	8,11	4,81	9,43	86,00	0,57	0,34	0,66	86,00
1	Maquina Deshojadora	319,03	180,80	366,71	87,00	239,28	135,60	275,03	87,00
2	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
6	Motor de inducción (operado por VDF)	813,83	418,99	915,35	88,91	732,45	377,09	823,82	88,91
3	Servicios Auxiliares	429,52	208,03	477,25	90,00	408,05	197,63	453,39	90,00

Tabla 2.10: Resumen sub-sector EW-1

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área EW-1	1,771	0,921	1,996	88,72	1,488	0,769	1,675	88,84

Tabla 2.11: Descripción sub-sector Rectificadores A

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
2	Rectificador	19695,95	6473,75	20732,58	0,95	14397,74	4732,31	15155,52	0,95
1	Rectificador de emergencia	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-

Tabla 2.12: Resumen sub-sector Rectificadores A

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Rect A	19,696	6,474	20,733	95,00	14,398	4,732	15,156	95,00

Tabla 2.13: Descripción sub-sector Rectificadores B

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
2	Rectificador	19695,95	6473,75	20732,58	0,95	14397,74	4732,31	15155,52	0,95
1	Rectificador de emergencia	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-

Tabla 2.14: Resumen sub-sector Rectificadores B

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Rect B	19,696	6,474	20,733	95,00	14,398	4,732	15,156	95,00

2.2.4 Etapa de manejo de soluciones

Se encuentra dividida en tres sub-sectores, que se denominan: Refino, PLS e ILS. Los que son alimentados por las barras 810-MCL-001, 820-MCL-001 y 830-MCL-001 respectivamente.

De manera similar a las etapas revisadas con anterioridad, en las siguientes tablas se resumen las características de los consumos eléctricos asociados a cada sub-sector. Finalmente, se muestra una tabla que resume las cargas de toda el Área Húmeda.

Tabla 2.15: Descripción sub-sector Refino

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
3	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
1	Motor de inducción (operación intermitente)	1,32	1,06	1,69	78,00	0,09	0,07	0,12	78,00
4	Motor de inducción (operado por VDF)	1513,99	775,64	1701,11	89,00	1362,59	698,07	1531,00	89,00
1	Servicios Auxiliares	53,69	26,00	59,66	90,00	51,01	24,70	56,67	90,00

Tabla 2.16: Resumen sub-sector Refino

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área Refino	1,569	0,803	1,762	89,03	1,414	0,723	1,588	89,04

Tabla 2.17: Descripción sub-sector PLS

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
2	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
2	Motor de inducción (operación intermitente)	5,09	3,95	6,44	79,00	0,36	0,28	0,45	79,00
5	Motor de inducción (operado por VDF)	712,45	420,32	827,20	86,13	641,20	378,29	744,48	86,13
1	Servicios Auxiliares	58,39	28,28	64,88	90,00	55,47	26,86	61,63	90,00

Tabla 2.18: Resumen sub-sector PLS

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área PLS	0,776	0,453	0,898	86,38	0,697	0,405	0,806	86,44

Tabla 2.19: Descripción sub-sector ILS

Cantidad	Descripción	Total carga conectada				Total carga demandada			
		[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	F.P. [%]
1	Motor de inducción (en standby)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-
4	Motor de inducción (operado por VDF)	1399,94	793,38	1609,13	87,00	1259,95	714,04	1448,21	87,00
1	Servicios Auxiliares	58,39	28,28	64,88	90,00	55,47	26,86	61,63	90,00

Tabla 2.20: Resumen sub-sector ILS

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
Total Área ILS	1,458	0,822	1,674	87,12	1,315	0,741	1,510	87,13

Tabla 2.21: Resumen Área Húmeda

	Carga Conectada				Carga demandada			
	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]	[MW]	[MVar]	[MVA]	F.P. [%]
SX-1	1,012	0,555	1,154	87,68	0,816	0,440	0,927	88,03
SX-2	0,880	0,476	1,001	87,96	0,788	0,424	0,895	88,06
TF-1	1,249	0,674	1,419	88,01	1,115	0,598	1,266	88,13
TF-2	1,186	0,672	1,363	86,99	0,803	0,440	0,916	87,72
EW-1	1,771	0,921	1,996	88,72	1,488	0,769	1,675	88,84
Rectificadores A	19,696	6,474	20,733	95,00	14,398	4,732	15,156	95,00
Rectificadores B	19,696	6,474	20,733	95,00	14,398	4,732	15,156	95,00
Refino	1,569	0,803	1,762	89,03	1,414	0,723	1,588	89,04
PLS	0,776	0,453	0,898	86,38	0,697	0,405	0,806	86,44
ILS	1,458	0,822	1,674	87,12	1,315	0,741	1,510	87,13
Total Área Húmeda	49,293	18,323	52,588	93,73	37,232	14,004	39,779	93,60

Para información detallada sobre los consumos eléctricos considerados, además de otros aspectos relevantes, referentes al cálculo de las cargas conectadas y demandadas, se recomienda revisar el Apéndice D.

2.3 Descripción y disposición de dispositivos de electrónica de potencia

2.3.1 Equipos rectificadores

Cada sistema de rectificación a considerar (sub-sector Rectificadores A y sub-sector Rectificadores B respectivamente), se encuentra constituido por dos rectificadores trifásicos controlados (tipo puente y de seis pulsos), conectados en paralelo en configuración ANSI 45-46, para conformar un rectificador trifásico controlado de 12 pulsos [2][3][4].

Los sistemas de rectificación de cada sub-sector, van montados en salas eléctricas prefabricadas y requieren de equipos de enfriamiento tipo Split (80.000 [BTU] por cada rectificador de seis pulsos). Así, cada sala eléctrica también alberga los siguientes equipos: equipo de aire acondicionado y presurización, panel de control electrónica rectificador 1, panel de control electrónica rectificador 2, sistema de bombas de enfriamiento rectificador 1, sistema de bombas de enfriamiento rectificador 2 y tableros varios (control, servicios auxiliares, auxiliares rectificadores, etc.).

Cabe mencionar que los respectivos intercambiadores de calor y transformadores rectificadores, al igual que el grupo electrógeno de respaldo, van dispuestos fuera de las salas eléctricas.

En el Apéndice E, se muestra un plano de disposición general. El cual incluye la sala eléctrica de cada sub-sector, así como también, los equipos mencionados en el párrafo anterior.

2.3.2 Equipos variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia van montados en salas eléctricas prefabricadas, con excepción del sub-sector EW-1, en que es de hormigón. En general, se utiliza una sala eléctrica para cada sub-sector, salvo el caso de la etapa de patio de tanques, donde los sub-sectores TF-1 y TF-2 comparten la misma sala. Con esto, existen grandes distancias entre los variadores y sus respectivas cargas y por lo tanto, la necesidad de utilizar cables especiales entre variadores y motores [9], incrementa los costos de instalación de la planta.

Aparte de los variadores de frecuencia, las salas eléctricas albergan otros equipos, como por ejemplo: centro de control de motores (CCM), equipo de climatización y presurización, sistema de control distribuido (DCS), tableros varios (general, alumbrado, instrumentación y fuerza), transformador de distribución y UPS.

Es importante señalar, que el principal motivo de la implementación de equipos de aire acondicionado y presurización en las salas, se debe a la gran disipación de energía por parte de los variadores de frecuencia. La siguiente tabla, detalla la carga térmica disipada por los principales equipos dentro de cada sala.

Tabla 2.22: Carga térmica de equipos en salas eléctricas de baja tensión

Equipo	Carga térmica por sala eléctrica [kW]						
	SX-1	SX-2	TF	EW-1	Refino	PLS	ILS
Alumbrado	0,12	0,1	0,15	0,3	0,1	0,1	0,1
Cables B.T.	0,65	0,5	1,3	1,3	0,65	0,5	0,65
Cables M.T.	N/A	N/A	N/A	1,15	N/A	N/A	N/A
CCM B.T.	3,2	2,8	3,8	2,2	2,8	2,2	2,8
Switchgear M.T.	N/A	N/A	N/A	2,8	N/A	N/A	N/A
Trafo. Distrib.	1,6	1,6	2,5	2,5	0,6	0,6	0,9
VDF's	22,2	22,2	68,7	20	50	25	50
TOTAL	27,77	27,2	76,45	30,25	54,15	28,4	54,45

En la Tabla 2.22, se observa que la carga térmica de los variadores de frecuencia, representa entre el 80% y 90% de la carga térmica total de la sala, salvo el caso del sub-sector EW-1, donde representa el 60% del total disipado.

A partir de las dimensiones de los equipos que deben incluirse, es posible determinar el tamaño de las respectivas salas. A continuación, se muestran las medidas de cada sala considerada.

Tabla 2.23: Dimensiones de salas eléctricas de baja tensión

Sub-sector	Código	Dimensiones [mm]			Obs.
		Largo	Ancho	Alto	
SX-1	300-ERS-001	12000	4000	3500	Prefabricada
SX-2	300-ERS-002	12000	4000	3500	Prefabricada
TF-1 y TF-2	400-ERS-001	20000	4000	3500	Prefabricada
EW-1	500-ERC-001	30000	6500	3500	De hormigón
Refino	810-ERS-001	12000	4000	3500	Prefabricada
PLS	820-ERS-001	12000	4000	3500	Prefabricada
ILS	830-ERS-001	12000	4000	3500	Prefabricada

Es importante destacar que los transformadores de poder de cada sub-sector, van montados fuera de las respectivas salas.

El Apéndice F, muestra los planos de disposición general de las salas eléctricas. A su vez, entrega información complementaria sobre las dimensiones de los equipos considerados.

El dimensionamiento de los sistemas de aire acondicionado y presurización, se hace a partir del tamaño de cada sala y su respectiva carga térmica. La Tabla 2.24, resume dicha información, aparte de mostrar el valor de las respectivas salas y sistemas de climatización.

Tabla 2.24: Dimensiones, carga térmica y precio de salas eléctricas de baja tensión

Código sala eléctrica	Dimensiones [mm]			Carga térmica [kW]	Precio		
					Sala [USD]	Equipo climatización [USD]	Total [USD]
	Largo	Ancho	Alto				
300-ERS-001	12000	4000	3500	27,77	150.000	79.093	229.093
300-ERS-002	12000	4000	3500	27,2	150.000	79.093	229.093
400-ERS-001	20000	4000	3500	76,45	250.000	111.516	361.516
500-ERC-001	30000	6500	3500	30,25	390.000	82.635	472.635
810-ERS-001	12000	4000	3500	54,15	150.000	97.516	247.516
820-ERS-001	12000	4000	3500	28,4	150.000	79.093	229.093
830-ERS-001	12000	4000	3500	54,45	150.000	97.516	247.516

De la Tabla 2.24, se deduce que el valor total de las salas eléctricas de baja tensión, asciende a US\$2.016.462.

Por otra parte, el comportamiento de los consumos eléctricos de cada sub-sector es similar. En otras palabras, la operación de los variadores de frecuencia de cada etapa del proceso, es en forma conjunta (salvo los VDF's que se encuentren en "standby").

Finalmente, se debe mencionar que cada variador es instalado con su propio filtro de entrada (atenuador de armónicos) y de salida (dv/dt), este último, en los casos que es necesario.

Capítulo 3: Análisis de alternativas filtrado armónico

3.1 Aspectos generales y consideraciones

Si bien el objetivo de esta memoria es analizar nuevas alternativas de filtrado armónico, como política de Outotec hacia sus clientes, también se ha simulado el comportamiento de la planta en el software ETAP. Esto, para corroborar el cumplimiento de las exigencias y recomendaciones, referentes al nivel de armónicos en operación normal, impuestos por la normativa correspondiente.

El desarrollo del estudio recién mencionado se encuentra disponible Apéndice G, donde se ha detallado la modelación de la planta y todo el proceso de simulación efectuado. Además, se ha incluido el análisis de resultados correspondiente.

Como bien es sabido, la naturaleza de los dispositivos de electrónica de potencia presentes en el Área Húmeda, hace imprescindible la implementación de técnicas de filtrado armónico [2][3], lo que también es comprobado por las simulaciones realizadas. En el caso de media tensión, el filtrado se requiere para cumplir con los niveles de armónicos en el punto de acople común. Para el caso de baja tensión, el filtrado se hace necesario para garantizar la seguridad y calidad en el suministro eléctrico de la planta, evitando problemas de: calentamiento de equipos y máquinas, protección, interferencia en dispositivos de comunicación, etc.

Dicho lo anterior, el siguiente análisis se llevará a cabo dando por hecho, la necesidad de implementar técnicas para la mitigación de armónicos.

3.2 Análisis en media tensión

3.2.1 Método de filtrado

El método actual de filtrado, para armónicos provenientes del sistema de rectificación para electro-obtención y con el cual se cumplen todos los requerimientos técnicos exigidos, corresponde a utilizar filtros de carácter pasivo. Para este caso en particular, se utiliza un banco de cinco etapas, donde cada una es sintonizada en la armónica 5,1, 7,1, 11,1, 13,1 y 16,6 respectivamente⁵.

Por otra parte, en el presente no existen tecnologías de filtrado activo propiamente tal, sino que se implementan filtros activos de baja tensión en conjunto con transformadores elevadores [10][11]. Esta solución, puede llegar a ser dos o tres veces más costosa que la utilización de filtros pasivos, de manera que solo se justifica en casos que el comportamiento de la carga es variable, como por ejemplo: el filtrado armónico en hornos de inducción.

Además, la operación del proceso de electro-obtención es constante (para eso está diseñado) y por consiguiente, los rectificadores funcionan a plena carga prácticamente en todo momento, de esta manera, la inyección de armónicos al sistema es casi invariable. Por ende, la implementación de filtros pasivos, no conllevaría a la aparición de fenómenos de “sobre-filtrado” o “sobre-compensación”⁶. Así, no existe algún incentivo técnico-económico, para sustituir el filtrado pasivo por alguna solución de tipo activa (o híbrida).

⁵ Ver Apéndice I más información sobre el cálculo de filtros armónicos

⁶ El caso de “sobre-compensación” producto de una pequeña pérdida de carga, podría no ser de importancia. Pero en situaciones en que existen fluctuaciones de carga de consideración, podría conllevar a “sobre-tensiones” significativas

3.3 Análisis en baja tensión

3.3.1 Métodos de filtrado

A diferencia de la operación del proceso de electro-obtención, los consumos del sistema de baja tensión no necesariamente funcionan en forma constante. De manera que en este caso, la implementación de bancos de filtrado pasivo podría conllevar a un fenómeno de “sobre-compensación”⁷.

Para dar solución al problema recién planteado, se propone la implementación de filtros activos o filtros híbridos, que si bien puede ser una alternativa más costosa, evitarían un posible sobredimensionamiento de los filtros cuando algunos sectores operen con menos carga. De todos modos, idealmente se deberían definir o estudiar las cargas que podrían no operar en forma constante, para que solo estas fueran filtradas en forma activa o híbrida, pues un filtro activo puede ser hasta dos o tres veces más costoso que uno pasivo [10][11].

3.3.2 Agrupación de filtros armónico

En la actualidad y tal como se mencionó en la parte 2.3.2 de este trabajo, se implementa un filtro armónico por cada variador de frecuencia (ambos elementos se sitúan en una misma sala eléctrica), independiente de la metodología de filtrado utilizada. Una alternativa a esto, es agregar un único filtro armónico a un grupo de variadores con comportamiento similar, que podría ser incluso todo un centro de control de motores (CCM). Con esto, se reducen costos en el precio de los equipos de filtrado, además de costos en el sistema de ventilación de la sala eléctrica, al tener una carga térmica un tanto menor [11].

Como se dijo en la parte 2.3.2, el comportamiento de las cargas de cada sub-sector es similar. Por lo tanto y desde este punto de vista, se propone implementar en cada sala eléctrica de baja tensión, un filtro armónico común para todos los consumos.

3.3.3 Distribución de variadores de frecuencia

La operación de los variadores de frecuencia conlleva a una gran carga térmica que debe ser extraída de la sala eléctrica que los alberga, elevando significativamente el precio del sistema de ventilación y aire acondicionado de la sala [10][11]. Una alternativa que permitiría disminuir considerablemente los costos, corresponde a retirar los variadores y los respectivos filtros armónicos de las salas eléctricas, para situarlos en gabinetes a la intemperie y fuera de áreas clasificadas⁸ [8]. De esta manera, el tamaño de la sala eléctrica y su respectivo sistema de ventilación, se reduce considerablemente y solo es necesario agregar un gabinete adecuado (por ejemplo: de tipo 3X [8]), para albergar los variadores junto con los filtros.

Desde el punto de vista de la superficie (o tamaño) de las salas eléctricas, el sub-sector EW-1 no experimentaría mayores cambios. Pues como se puede ver en el respectivo plano (ver Apéndice

⁷ En este caso, la “sobre-compensación” podría ser a nivel de equipo, o bien, a nivel de alguna barra alimentadora, pero no implica necesariamente que toda la planta quede “sobre-compensada”. De todos modos, una pérdida de carga de consideración: podría implicar una “sobre-tensión”, no despreciable, en la barra alimentadora involucrada

⁸ Dentro del Área Húmeda existen áreas Clase 1 (División 1 y 2) y Clase 2 (División 1 y 2). Estas se encuentran detalladas en la norma NEC 2008 [8]

F), al retirar los variadores de frecuencia, las dimensiones de la sala no podrían ser reducidas en forma significativa. No así desde el punto de vista del sistema de climatización, pues el retirar los variadores de la sala, permitiría prescindir del equipo de aire acondicionado y presurización (también aplica para los demás sub-sectores) [10][11].

La siguiente tabla, muestra las dimensiones, carga térmica y precio que podrían tener las salas eléctricas, en caso de instalar los variadores de frecuencia fuera de estas.

Tabla 3.1: Posibles dimensiones, carga térmica y precio de salas eléctricas de baja tensión

Código sala eléctrica	Dimensiones [mm]			Carga térmica	Precio		
					Sala	Equipo climatización	Total
	Largo	Ancho	Alto	[kW]	[USD]	[USD]	[USD]
300-ERS-001	6000	4000	3500	5,57	75.000	N/A	75.000
300-ERS-002	6000	4000	3500	5	75.000	N/A	75.000
400-ERS-001	10000	4000	3500	7,75	125.000	N/A	125.000
500-ERS-001	30000	6500	3500	10,25	390.000	N/A	390.000
810-ERS-001	6000	4000	3500	4,15	75.000	N/A	75.000
820-ERS-001	6000	4000	3500	3,4	75.000	N/A	75.000
830-ERS-001	6000	4000	3500	4,45	75.000	N/A	75.000

De la Tabla 3.1, se extrae que para este caso en estudio, el valor total de las salas eléctricas de baja tensión, es igual a US\$890.000. Lo que se traduce en un ahorro equivalente a US\$1.026.462⁹, con respecto al valor calculado en el punto 2.3.2.

3.3.4 Distancias entre variadores de frecuencia y respectivos motores

Otra consideración que se debe tener en cuenta y que depende de la topología de la planta, es la necesidad de utilizar filtros dv/dt (a la salida de los variadores) y cables especiales para alimentar los motores (que pueden costar hasta un 50% más que un cable estándar para el mismo propósito). Esto, con el fin de evitar problemas por la transposición de armónicas, producto del reflejo de ondas en bornes de los motores alimentados por cables de gran longitud [9].

Según las tecnologías actuales, las consideraciones recién mencionadas solo deben aplicarse para motores alimentados por cables con longitud mayor a 150 [m] [10][11]. De esta forma, otra manera de disminuir los costos de instalación de la planta, es situando los variadores de frecuencia a distancias no mayores a 150 [m], permitiendo así, la utilización de cables estándar en la canalización. De esta manera, se vuelve a justificar la posibilidad de posicionar los variadores de frecuencia fuera de las salas eléctricas, pues aparte de ahorrar en el tamaño y el equipo de ventilación (como se mostró en el punto 3.3.3), se reducen costos en los cables alimentadores de los motores.

Finalmente y resumiendo sobre las recomendaciones anteriormente realizadas, se podría establecer una suerte de procedimiento que permita encontrar la mejor solución técnico-económica, para la instalación del equipamiento eléctrico en la Planta:

⁹ El valor mostrado, considera una estimación equivalente a US\$100.000 en gabinetes (para la instalación de variadores fuera de salas eléctricas)

1. Determinar el tipo de filtrado armónico a utilizar. Esto, luego de determinar las cargas que operan en forma constante y las que no.
2. Definir grupos de variadores con el fin de poder realizar el filtrado en conjunto, en vez de hacerlo por separado. Luego de la evaluación efectuada, se propone aplicar un filtro común en cada sala eléctrica
3. Posicionar los variadores de frecuencia y sus respectivos filtros (en caso de no hacer filtrado común), fuera de las salas eléctricas y en gabinetes adecuados. El emplazamiento de estos puede ser en base a los grupos definidos en el punto anterior
4. Situar los gabinetes de manera de minimizar las distancias entre los variadores y motores, para así poder minimizar la utilización de filtros dv/dt y cables especiales¹⁰

¹⁰ Según lo mencionado en párrafos anteriores y de acuerdo a la información entregada por proveedores de equipos, dichas distancias deben ser menores a 150 [m]

Capítulo 4: Conclusiones

La planta húmeda en estudio, cumple con los estándares especificados en la normativa IEEE 519: tanto para las exigencias de conexión al sistema eléctrico en el punto de acople común (PCC), como para las recomendaciones de operación en las barras alimentadoras. Lo anterior, se logra implementando filtros armónicos en las barras de rectificación (MT) y en las barras alimentadoras de baja tensión respectivamente.

En las barras de media tensión, el filtrado armónico debe ser de tipo pasivo. Lo que se encuentra justificado, por la continuidad de la operación del proceso de electro-obtención y por las restricciones técnico-económicas de la tecnología disponible en la actualidad. Para las barras alimentadoras de baja tensión, la implementación de filtros activos (o híbridos), podría justificarse desde el punto de vista del comportamiento de la carga, no así desde el punto de vista económico.

Fue posible, proponer ciertos criterios que permitan disminuir los costos de instalación de los equipos eléctricos en la planta. Los cuales cumplen el cometido sin sacrificar la seguridad, o bien, la calidad del suministro eléctrico.

Una primera propuesta, para la reducción de costos de instalación de la planta, es implementar el filtrado armónico a un conjunto de variadores de frecuencia (que tengan un ciclo de operación similar). Particularmente, se sugiere aplicar un filtro armónico común, en cada sala eléctrica de baja tensión.

Por otra parte, la instalación de los equipos variadores de frecuencia fuera de las salas eléctricas, permite rebaja costos en el precio de estas. Ahorrando por concepto de tamaño, así como al poder prescindir del respectivo equipo de climatización.

La disposición en forma distribuida de los variadores de frecuencia, también da pie para el ahorro en relación las canalizaciones. Esto, ya que al reducir las distancias entre variadores y sus respectivas cargas, se minimiza la utilización de cables especiales y la implementación de filtros dv/dt .

Es posible dejar propuesto como trabajo a futuro, la elaboración de algún algoritmo: que podría ser implementado en forma computacional y que permita minimizar los costos de instalación de la planta. Esto, tomando como variables de decisión: el tipo de filtrado en baja tensión (pasivo, activo o híbrido), la definición de los grupos de variadores para el filtrado en conjunto y la posición de los gabinetes con variadores (fuera de la sala eléctrica), que minimice las distancias a los motores.

Por último, dada la inexistencia de variadores de frecuencia para operación en áreas clasificadas, surge la interrogante si la aparición de esta tecnología (a costos razonables), permitiría disminuir aún más los costos de instalación del equipamiento eléctrico en Áreas Húmedas.

Bibliografía

- [1] CODELCO Chile. (2009). *Proceso Productivo de Minerales Oxidados*.
Obtenido de <http://www.codelco.cl>
- [2] Rashid, M. (2007). *Power Electronics Handbook* (2nd ed.). Academic Press.
- [3] Skvarenina, T. (2002). *The Power Electronics Handbook (Industrial Electronics Series)*.
CRC Press.
- [4] Aycaguer, A. (2009). *Electrónica de Potencia (Guía de Clases)*.
- [5] IEEE Std 519. (1992). *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in
Electrical Power Systems*. IEEE.
- [6] De La Rosa, F. (2006). *Harmonics and Power Systems*. CRC Press.
- [7] IEEE Std 18. (2002). *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*. IEEE.
- [8] NFPA 70. (2008). *National Electrical Code*. NFPA.
- [9] *Motor Insulation Voltage Stresses Under PWM Inverter Operation* (3rd ed.). (2006).
GAMBICA/REMA.
- [10] ABB. (2009).
Obtenido de <http://www.abb.com>
- [11] *Schneider Electric*. (2009).
Obtenido de <http://www.schneider-electric.com>

Apéndice A: Proceso productivo del cobre por lixiviación

En los siguientes párrafos, se mostrará una pequeña reseña sobre el proceso de producción de cobre por lixiviación. Si bien, el proceso que se describirá no corresponde exclusivamente al método productivo implementado por OUTOTEC, este dará una idea de las técnicas utilizadas para la obtención de cobre a partir de minerales oxidados, así como también, permitirá dar una visión de la naturaleza no lineal del equipamiento eléctrico que se encuentra presente en este tipo de faenas mineras.

Cabe mencionar que desde el punto de vista eléctrico, el proceso productivo de cobre por lixiviación, sin considerar lo que es bio-lixiviación, no ha presentado mayores avances en los últimos años (no así desde el punto de vista de la Ingeniería de Procesos). Lo que no quiere decir que la tecnología se encuentre estancada, si no que para la disciplina eléctrica: las cargas han mantenido su naturaleza no-lineal. De esta manera, es bueno recalcar que si bien la información que se mostrará puede no ser la más actualizada, no deja de ser útil para el entendimiento del proceso de obtención de cobre y corresponde a metodologías de producción totalmente vigentes.

Proceso de chancado

Aspectos generales

El proceso de chancado, también llamado trituración, corresponde a la instancia de preparación del mineral derivado de la explotación: ya sea a cielo abierto o subterránea, o bien, proveniente de vertederos asignados para programas de aprovechamiento. Su propósito, es el reducir el tamaño del material hasta obtener un producto de una granulometría adecuada, que permita el desarrollo eficiente de la lixiviación en pilas o depósitos.

La realización del proceso implica consumos energéticos significativos y por ende, tiene gran impacto económico en el desarrollo de un proyecto de hidrometalurgia.

Etapas de proceso de chancado

El proceso de trituración se encuentra constituido por dos etapas principales: Trituración o chancado primario o grueso y trituración o chancado fino.

En el chancado grueso, se reduce el tamaño de la roca a fragmentos de diámetro máximo igual a 8 pulgadas. Mientras que el chancado fino comprende a 2 sub-etapas: en donde primero se llega a fragmentos de roca con un tamaño no superior a 3 pulgadas y posteriormente, se logra obtener un material mineralizado con un tamaño menor a ½ pulgada.

Cabe mencionar que para lixiviación en pilas, el mineral se suele triturar a tamaños entre 100 y 250 milímetros, mientras que para la lixiviación en depósitos, entre 1 y 50 milímetros. Lo que requiere llevar a cabo una cuarta etapa de molienda.

Existen equipos apropiados para cada una de las etapas mencionadas. Las características principales de abertura de alimentación, capacidad a distintos cierres, tamaños de productos, potencia, etc., suelen ser tabuladas por los fabricantes de trituradoras en función de una densidad y dureza media del material.

Proceso de aglomeración

Aspectos generales

El proceso de aglomeración tiene como propósito el preparar el material, proveniente del proceso de chancado, para la lixiviación; garantizando un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

La permeabilidad corresponde a un factor crítico, que no ha sido muy estudiado y que en algunos casos puede inducir a fallas e incluso, puede significar el cierre de plantas en operación. Depende del método de formación de las pilas o depósitos y de las características físicas del material en cuanto a la formación de poros.

Si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no existe: percolación, contactos, disolución y tampoco extracción de valores. Esto porque los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación. Al mismo tiempo, esto favorece la compactación al momento de formar las pilas, existiendo la posibilidad de que estas partículas se depositen en el fondo de la pila, imposibilitando el flujo uniforme de la solución enriquecida. Por consiguiente, la proporción inadecuada de finos puede significar un aumento innecesario del tiempo que demora la lixiviación y del consumo de soluciones reactivas, lo que podría incidir hasta en la viabilidad del proyecto. Por lo tanto, es de suma importancia la eliminación de finos para así poder llevar a cabo un buen proceso de lixiviación.

Tipos de aglomeración

Aglomeración por humedad

Corresponde al proceso más simple de aglomeración. Consiste en humedecer el material, hasta alcanzar un contenido de agua, que produzca una tensión superficial suficiente como para adherir los finos a los gruesos cuando estos colisionen. Esta aglomeración es bastante débil y solo se utiliza en casos con bajo contenido de finos.

Aglomeración por adherentes

Consiste en la utilización de materiales que permiten mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como en el proceso de lixiviación. El estudio de los adherentes o aglomerantes, ha determinado tres parámetros principales para el proceso: El tipo y cantidad de aglomerante agregado a la alimentación seca, la humedad requerida en la mezcla mineral-aglomerante y el período necesario para la formación de los puentes de silicato cálcico.

Proceso de lixiviación

Aspectos generales

La lixiviación corresponde a un proceso hidro-metalúrgico que permite extraer el cobre de minerales oxidados. Se lleva a cabo aplicando una solución de ácido sulfúrico diluido con agua y se basa en que los minerales que contienen óxido de cobre, son sensibles al ataque de soluciones ácidas¹¹.

Para llevar a cabo el proceso se requiere disponer de un patio o superficie impermeabilizada, en donde se deposita la pila con mineral. Cuando el patio es recuperado para ser reutilizado con nuevo material, se trata de lixiviación en pilas. Si el patio no se recupera y el mineral agotado permanece en la pila como vertedero que se restaura, se trata de lixiviación en depósitos.

Tal como se mencionó anteriormente, el éxito del proceso de lixiviación depende enormemente de la permeabilidad de la masa a lixiviar. Esto, para que el líquido lixivante pase a través de todo el mineral y que el contacto entre estos sea óptimo.

Formación y clasificación de pilas

El mineral aglomerado es transportado, mediante correas, al lugar donde se formará la pila. Estas se acomodarán formando módulos de riego con superficie, ángulo de reposo del materia y alturas determinadas, y con pendiente en dos sentidos: inclinación lateral para el drenaje e inclinación en sentido longitudinal para la evacuación de las soluciones.

El apilamiento del material puede ser realizado por distintos métodos, ya sea mediante correas, o bien, mediante apiladores móviles.

De acuerdo a la utilización de las pilas, se tienen los siguientes tipos:

- Pilas dinámicas: Denominadas también de tipo “on-off”, se caracterizan porque el mineral se remueve y se envía a botaderos luego de la lixiviación, dejando la base para futura reutilización. Para este tipo de pilas, se puede elegir cualquier configuración que permita la operación de los equipos de carga y descarga, aunque generalmente se prefiere un rectángulo alargado. En el caso particular de las operaciones mayores, que presentan limitación con los equipos de transferencia de minerales, se prefiere una configuración rectangular doble con semicírculos en los extremos, en donde se forma la pista de giro de los equipos de carguío y descarga
- Pilas permanentes: Corresponden a las pilas que se cargan sobre las anteriores, aprovechando, o no, la impermeabilización existente. La geometría es según la disponibilidad de espacio de cada lugar. En el caso de no tener restricciones topográficas, generalmente se usa una configuración rectangular, en donde solo se podrá colocar una nueva capa, cuando la lixiviación de la capa inferior haya concluido

¹¹ A diferencia de los procesos de lixiviación estándar, la lixiviación bacteriana permite el lixiviado de sulfuros de cobre de baja ley

Riego de pilas

El material acomodado en las pilas debe ser regado por una solución lixivante. Por tal motivo, se tiende una malla de riego que debe cubrir toda el área. Esta malla permite la distribución de las soluciones a base de agua y ácido sulfúrico y puede hacerse por medio de un sistema por goteo o por medio de aspersores. Desde el punto de vista eléctrico, este corresponde a un proceso contaminante en armónicos, lo que se debe a la utilización de flujos variables y puede ser en media o baja tensión (dependiendo del caso).

La solución debe infiltrarse en la pila hasta su base, permitiendo que el cobre contenido en los minerales oxidados se disuelva. Formando una solución de sulfato de cobre que es recogida por un sistema de drenaje y dirigida fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas.

El riego de las pilas, también considerada como lixiviación, se mantiene por 50 días aproximadamente, luego de que se ha agotado prácticamente todo el cobre lixivante. El material restante, también llamado ripio, se transporta a botaderos donde podría realizarse un segundo proceso de lixiviación para extraer el resto de cobre existente.

Del proceso de riego de las pilas, se obtienen soluciones de sulfato de cobre con concentraciones de hasta 9 gramos de cobre por cada litro de solución. Estas soluciones se denominan PLS, y luego de ser recolectadas, se llevan a distintos estanques donde se limpian y eliminan las partículas sólidas que podrían haber sido arrastradas. Posteriormente, la solución se lleva al proceso de extracción por solventes.

Recolección de soluciones

Al costado de cada pila se sitúan canaletas que permiten la recolección de las soluciones por gravedad. Como se mencionó anteriormente, las soluciones recogidas son llevadas inicialmente a piscinas desarenadoras y posteriormente fluyen a distintas piscinas según la calidad de la solución: piscinas de solución rica (PLS) y piscinas de solución intermedia (ILS).

En la base de todas las pilas, se instalan membranas impermeables que permiten capturar todas las soluciones que escurren desde lo alto y conducir las a las respectivas canaletas de recolección. Sobre dichas membranas, se instalan cañerías perforadas de drenaje que son las que permiten conducir las soluciones hacia las canaletas.

Proceso de extracción por solventes

Aspectos generales

El objetivo de este proceso es liberar de impurezas y elevar la concentración de cobre de las soluciones recolectadas en la lixiviación. Particularmente, se quiere pasar de una concentración de 9 gramos por litro, a una de 45 gramos por litro, mediante una extracción iónica.

El proceso se lleva a cabo mezclando la solución PLS con una solución de parafina y resina orgánica. Con esto, la resina orgánica captura los iones de cobre en forma selectiva, obteniéndose un complejo resina-cobre y una solución empobrecida en cobre que se llama refino. La solución refino es posteriormente reutilizada en el proceso de lixiviación.

El compuesto resina-cobre se trata con una solución electrolito rica en ácido, que produce una descarga del cobre desde la resina hacia el electrolito, obteniéndose una concentración de hasta 45 gramos de cobre por litro.

Método y etapas de extracción por solventes

Tal como se mencionó en el punto anterior, la extracción por solventes corresponde a un proceso de purificación y concentración de soluciones, basada en la separación del cobre desde las soluciones de lixiviación. Para ello, se emplea un medio extractante líquido de alta selectividad, pero inmiscible en dicha solución.

Los sistemas de extracción por solventes tienen tres componentes básicos, que corresponden a: un soluto a extraer, un solvente acuoso y un extractante orgánico. El proceso se basa en la reacción de intercambio iónico que ocurre entre dos fases inmiscibles; la fase orgánica, que corresponde al reactivo extractante y la fase acuosa, que corresponde a la solución. La solución de lixiviación o fase acuosa, se pone en contacto con el reactivo orgánico o fase orgánica y son mezclados fuertemente por agitación.

Las moléculas extractantes del reactivo orgánico, poseen una alta afinidad con el ión metálico que se quiere recuperar. El ión es transferido desde la solución de lixiviación, a través de la interface de los líquidos no inmiscibles. La mezcla obtenida producto de la agitación, se deja decantar para que se separe en dos capas o fases. La fase superior corresponde a la capa orgánica, en donde se encuentra retenido el ión metálico de cobre. La capa inferior, denominada fase acuosa o de refino, es de carácter estéril respecto de iones metálicos.

En el proceso de extracción por solventes, generalmente se reconocen dos etapas fundamentales: la etapa de extracción y la etapa de re-extracción o stripping (también llamada descarga).

- Etapa de extracción o carga del reactivo: En esta etapa se hace el contacto entre la solución impura proveniente de la lixiviación (rica en iones de cobre y con una baja acidez) y la fase orgánica. Como ambas fases son inmiscibles, es necesario aplicar una acción mecánica de elementos externos que proporcionen la energía necesaria, lo que se lleva a cabo por medio de mezcladores especiales. Al mezclarse la fase acuosa y la orgánica, ocurre una transferencia de los iones metálicos hasta alcanzar el respectivo equilibrio químico. Generándose una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una solución acuosa descargada o refino
- Etapa de re-extracción o descarga de reactivo: Consiste en la etapa de recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, regenerando las capacidades reactivas de la fase para que pueda ser reutilizada en otra extracción. En resumen, en esta etapa se obtiene una solución de orgánico sin cobre, que se reutiliza en la etapa de extracción y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, que es enviada a la etapa de electro-obtención

Proceso de electro-obtención

Aspectos generales

Corresponde a un proceso electro-metalúrgico, en donde se recupera el cobre disuelto en una solución electrolito concentrada, obteniendo cátodos con un 99,99% de pureza.

El proceso se lleva a cabo depositando la solución electrolítica, que contiene el cobre en forma de sulfato de cobre, en celdas de electro-obtención que poseen ánodos y cátodos en orden alternado. Los ánodos corresponden a placas de plomo que hacen las veces de polo positivo, mientras que los cátodos, son placas de acero inoxidable y corresponden al polo negativo.

En cada celda se aplica una corriente eléctrica continua y de alta intensidad, la que entra por el ánodo y sale por el cátodo. El cobre de la solución de sulfato de cobre es atraído por la carga negativa del cátodo, migrando y depositándose permanentemente en la placa de acero inoxidable.

Transcurrido un tiempo entre 6 y 7 días, se da por finalizada la etapa de obtención de cobre y se procede a la etapa de cosecha de cátodos. En dicho tiempo, se ha depositado una capa de cobre con una pureza de 99,99% y un espesor de 1 a 2 centímetros, en ambos lados de cada lámina de acero inoxidable, lo que significa un peso total de 70 a 80 kilogramos por cátodo.

Cada celda de electro-obtención contiene 60 cátodos y la cosecha se efectúa de a 20 unidades por maniobra. Luego de ser extraídos de la celda, los cátodos son lavados con agua caliente para eliminar cualquier impureza de la superficie. Posteriormente, son llevados a la máquina despegadora, donde se separan las hojas de cobre de ambos lados, dejándolos limpios y en condiciones para reintegrarse el proceso de electro-obtención.

Una vez que las láminas de cobre son despegadas de las placas de acero inoxidable, se apilan y pesan para poder ser enzunchados para el transporte final al puerto de embarque, que se realiza mediante camiones o ferrocarril. Previamente, se efectúa un muestreo sistemático de algunos cátodos para determinar su contenido de cobre: que debe ser de 99,99% (presencia de impurezas debe ser menor al 0,01%, principalmente azufre).

A modo de resumen, la siguiente figura ejemplifica el proceso de producción del cobre, descrito en los puntos anteriores.

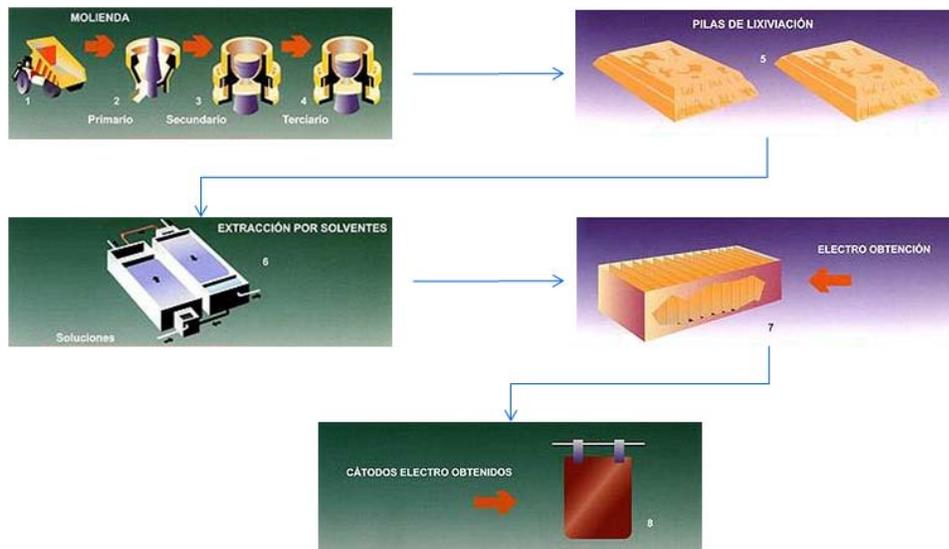


Figura A.1: Esquema del proceso productivo del cobre por lixiviación

Apéndice B: Límites de contaminación armónica

En las siguientes líneas, se procederá a describir los límites de contaminación armónica que deberán cumplir los equipos eléctricos de la planta. Cabe destacar, que para el caso de las plantas húmedas de OUTOTEC, no es recomendable basar su operación según una normativa nacional, pues la instalación de estas plantas puede hacerse tanto en Chile como en cualquier otro país del mundo: como es el caso del Proyecto Tía María de la empresa Southern Peru Copper Corporation.

Aspectos generales

Existen normativas que permiten establecer responsabilidades entre los consumidores y distribuidores de energía eléctrica. La normativa vigente más conocida, a la cual la mayoría de las legislaciones hacen alusión (incluyendo la Chilena), corresponde a la norma IEEE 519-1992. Esta, estipula límites para los niveles armónicos de corriente y tensión, los que no deben ser sobrepasados.

Para poder establecer los límites mencionados anteriormente, se define el Índice de Distorsión Armónica o THD. Este, es válido tanto para el caso de armónicas de tensión (THD_v), como el caso de armónicas de corriente (THD_I). Los respectivos índices se escriben de la siguiente manera:

$$THD_v [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1} \cdot 100$$

$$THD_I [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_1} \cdot 100$$

Donde THD corresponde al cociente entre el valor eficaz de las armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental, expresado en valores porcentuales.

La norma IEEE 519 Agrupa a las fuentes emisoras de armónicas en tres categorías diferentes:

- Dispositivos electrónicos de potencia
- Dispositivos productores de arcos eléctricos
- Dispositivos ferromagnéticos

La regulación exige el cumplimiento de niveles máximos de distorsión armónica en el punto de acoplamiento común (PCC). Este corresponde al punto en que se puede alimentar a varios clientes y es el punto de menor impedancia y mayor porcentaje de dilución de armónicas. Por ende, para los distribuidores es muy fácil cumplir con dichos niveles. La normativa no se preocupa lo suficiente de los consumidores, ya que no exige el cumplimiento de límites en puntos “aguas abajo” del PCC.

Limites de distorsión de tensión

La Tabla B.1 muestra los límites de distorsión de voltaje definidos por la norma IEEE 519 [5].

Tabla B.1: Límites de distorsión de tensión

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

Límites de distorsión de corriente

Para establecer el límite de armónicos de corriente, inyectados por el usuario, se debe conocer el valor de la corriente de cortocircuito (I_{CC}) en el empalme del usuario y la demanda media de corriente utilizada por la instalación (I_L).

La corriente de cortocircuito depende del valor de los transformadores de la compañía de distribución (deben ser entregados por esta) y debe ser medida en el empalme de distribución en condiciones normales de funcionamiento. Luego de hacer mediciones, será aquella corriente que resulte mínima en el empalme. La corriente I_L depende del usuario y es calculada como el valor medio de las demandas máximas de corriente (componente fundamental), leídas durante los 12 meses precedentes a la medición.

La Tabla B.2 muestra los límites de distorsión de corriente definidos en la norma IEEE 519 [5].

Tabla B.2: Límites de distorsión de corriente

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Para sistemas que operen a un nivel de tensión superior a 69 [kV], los límites son un 50% mayor que los indicados.

Apéndice C: Diagrama unilineal

Apéndice D: Especificación de equipos considerados en la definición del Área Húmeda

Tabla D.1: Detalle sub-sector SX-1

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal HP	Carga Conectada					Carga Demandada			
				Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW	kVAr
300-PPC-001	Bomba de Orgánico Tratado	Intermitente	3	0,88	2,54	0,79	3,22	1,97	0,10	0,70	0,18	0,14
300-PPC-002	Bomba de Orgánico Tratado	Standby	3	0,88	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-004	Bombas Impulsión Diluyente	Intermitente	3	0,88	2,54	0,79	3,22	1,97	0,10	0,70	0,18	0,14
300-PPC-005	Bombas Impulsión Diluyente	Standby	3	0,88	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-006	Bombas Traspaso Orgánico entre grumos 1° y Trat. Org.	Intermitente	3	0,85	2,02	0,79	2,56	1,57	0,10	0,70	0,14	0,11
300-PPC-007	Bombas Traspaso Orgánico entre grumos 1° y Trat. Org.	Standby	3	0,85	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-008	Bombas Traspaso Orgánico entre grumos 2° y Trat. Org.	Intermitente	2	0,85	1,40	0,78	1,80	1,13	0,10	0,70	0,10	0,08
300-PPC-009	Bombas Traspaso Orgánico entre grumos 2° y Trat. Org.	Standby	2	0,85	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-012	Bombas Traspaso Orgánico de TK Org. Rec. de tridecanter a TK Trat. Org.	Intermitente	0,5	0,72	0,52	0,50	1,04	0,90	0,10	0,70	0,04	0,06
300-PPC-013	Bombas Traspaso Orgánico de TK Org. Rec. de tridecanter a TK Trat. Org.	Standby	0,5	0,72	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-014	Bombas Traspaso Acuoso de TK Acu. Rec. de tridecanter a ES	Intermitente	5	0,88	3,39	0,79	4,29	2,63	0,10	0,70	0,24	0,18
300-PPC-015	Bombas Traspaso Acuoso de TK Acu. Rec. de tridecanter a ES	Standby	5	0,88	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-101	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren A	Operada por VDF	60	0,94	41,13	0,88	46,73	22,20	1,00	0,90	37,01	19,98
300-PPC-102	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren A	Operada por VDF	60	0,94	41,13	0,88	46,73	22,20	1,00	0,90	37,01	19,98
300-PPC-103	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren A	Standby	60	0,94	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-104	Bomba Recirculación Acuoso POC Tren A	Operada por VDF	25	0,92	15,24	0,83	18,37	10,24	1,00	0,90	13,72	9,22
300-PPC-105	Bomba Recirculación Acuoso POC Tren A	Standby	25	0,92	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-106	Bomba Descarte Acuoso POC Tren A	Operada por VDF	7,5	0,91	6,15	0,84	7,32	3,97	1,00	0,90	5,53	3,57
300-PPC-107	Bomba Descarte Acuoso POC Tren A	Standby	7,5	0,91	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-CWR-001	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-CWR-004	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-CWR-005	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-CTS-001	Alimentador Tricanter	2 Turnos (16 h)	20	0,93	16,04	0,85	18,87	9,94	0,60	0,75	7,22	4,47
300-FLF-001	Filtro Placa	2 Turnos (16 h)	10	0,92	8,11	0,86	9,43	4,81	0,60	0,75	3,65	2,17
300-AGA-001-M	Agitador Tanque Grumos Primarios	Intermitente	30	0,94	23,91	0,87	27,48	13,55	0,10	0,70	1,67	0,95
300-AGA-002-M	Agitador Tanque Grumos Primarios	Intermitente	30	0,94	23,91	0,87	27,48	13,55	0,10	0,70	1,67	0,95
300-AGA-003-M	Agitador Tanque Tratamiento Organico	Intermitente	30	0,94	23,91	0,87	27,48	13,55	0,10	0,70	1,67	0,95
300-AGA-006-M	Agitador Tanque Grumos Secundarios	Intermitente	20	0,92	14,60	0,83	17,59	9,81	0,10	0,70	1,02	0,69
300-AGA-009-M	Agitador Tanque Pre-Capa	Intermitente	5	0,89	4,19	0,83	5,05	2,82	0,10	0,70	0,29	0,20
300-AGA-101-M	Motor Turbina DOP Etapa E-1 Tren A	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-104-M	Motor Turbina DOP Etapa E-2 Tren A	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-107-M	Motor Turbina DOP Etapa E-3 Tren A	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-110-M	Motor Turbina DOP Etapa D Tren A	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-113-M	Motor Turbina DOP Etapa L Tren A	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-102-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-1 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-103-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-1 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-105-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-2 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-106-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-2 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-108-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-3 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-109-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-3 Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-111-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa D Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-112-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa D Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-114-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa L Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-115-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa L Tren A	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-SSAA-001	Servicios Auxiliares		125	0,95	83,89	0,90	93,21	40,63	1,00	0,95	79,70	38,60

Tabla D.2: Detalle sub-sector SX-2

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
300-PPC-201	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren B	Operada por VDF	60	0,94	41,13	0,88	46,73	22,20	1,00	0,90	37,01	19,98
300-PPC-202	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren B	Operada por VDF	60	0,94	41,13	0,88	46,73	22,20	1,00	0,90	37,01	19,98
300-PPC-203	Bomba de Orgánico Cargado POC Tren B	Standby	60	0,94	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-204	Bomba Recirculación Acuoso POC Tren B	Operada por VDF	25	0,92	15,24	0,83	18,37	10,24	1,00	0,90	13,72	9,22
300-PPC-205	Bomba Recirculación Acuoso POC Tren B	Standby	25	0,92	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPC-206	Bomba Descarte Acuoso POC Tren B	Operada por VDF	7,5	0,91	6,15	0,84	7,32	3,97	1,00	0,90	5,53	3,57
300-PPC-207	Bomba Descarte Acuoso POC Tren B	Standby	7,5	0,91	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-CWR-006	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-CWR-009	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-CWR-010	Carro tracción extracción borras	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
300-PPD-401	Bomba alimentación tanque petróleo diesel	Intermitente	7,5	0,89	4,61	0,83	5,55	3,10	0,10	0,70	0,32	0,22
300-PPD-402	Bomba alimentación tanque petróleo diesel	Standby	7,5	0,89	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-PPD-403	Bomba alimentación tanque petróleo diesel	Intermitente	3	0,88	2,54	0,79	3,22	1,97	0,10	0,70	0,18	0,14
300-PPD-404	Bomba alimentación tanque petróleo diesel	Standby	3	0,88	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300-AGA-201-M	Motor Turbina DOP Etapa E-1 Tren B	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-204-M	Motor Turbina DOP Etapa E-2 Tren B	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-207-M	Motor Turbina DOP Etapa E-3 Tren B	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-210-M	Motor Turbina DOP Etapa D Tren B	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-213-M	Motor Turbina DOP Etapa L Tren B	Operada por VDF	75	0,95	59,21	0,88	67,28	31,96	1,00	0,90	53,29	28,76
300-AGA-202-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-1 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-203-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-1 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-205-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-2 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-206-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-2 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-208-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa E-3 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-209-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa E-3 Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-211-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa D Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-212-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa D Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-214-M	Motor Mezclador Primario Spirok Etapa L Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-AGA-215-M	Motor Mezclador Secundario Spirok Etapa L Tren B	Operada por VDF	50	0,94	39,85	0,88	45,28	21,51	1,00	0,90	35,87	19,36
300-SSAA-002	Servicios Auxiliares		108	0,95	72,48	0,90	80,54	35,10	1,00	0,95	68,86	33,35

Tabla D.3: Detalle sub-sector TF-1

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
400-PPC-001	Bombas Electrolito Rico (Alimentación a Filtros de Electrolito)	Operada por VDF	150	0,95	115,26	0,84	137,21	74,45	1,00	0,90	103,73	67,00
400-PPC-002	Bombas Electrolito Rico (Alimentación a Filtros de Electrolito)	Operada por VDF	150	0,95	115,26	0,84	137,21	74,45	1,00	0,90	103,73	67,00
400-PPC-003	Bombas Electrolito Rico (Alimentación a Filtros de Electrolito)	Standby	150	0,95	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPC-008	Bombas Recirculación Electrolito Sector 1 y 2 EW	Operada por VDF	300	0,93	218,18	0,89	245,15	111,78	1,00	0,90	196,37	100,60
400-PPC-009	Bombas Recirculación Electrolito Sector 1 y 2 EW	Operada por VDF	300	0,93	218,18	0,89	245,15	111,78	1,00	0,90	196,37	100,60
400-PPC-010	Bombas Recirculación Electrolito Sector 1 y 2 EW	Operada por VDF	300	0,93	218,18	0,89	245,15	111,78	1,00	0,90	196,37	100,60
400-PPC-011	Bombas Recirculación Electrolito Sector 1 y 2 EW	Standby	300	0,93	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPC-015	Bombas Electrolito Pobre Retrolavado Filtros	Operada por VDF	60	0,94	46,23	0,88	52,53	24,95	1,00	0,90	41,60	22,46
400-PPC-016	Bombas Electrolito Pobre Retrolavado Filtros	Standby	60	0,94	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPC-018	Bombas de Retrolavado Etapa D Tren A / B	22 h	25	0,93	17,65	0,85	20,76	10,94	0,90	0,75	11,91	7,38
400-PPC-019	Bombas de Retrolavado Etapa D Tren A / B	Standby	25	0,93	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPC-021	Bomba Tanque de Retención	22 h	10	0,92	8,11	0,86	9,43	4,81	0,90	0,75	5,47	3,25
400-PPC-022	Bomba Tanque de Retención	Standby	10	0,92	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPC-023	Bombas de Orgánico Recuperado	22 h	20	0,92	14,60	0,83	17,59	9,81	0,90	0,75	9,85	6,62
400-PPC-024	Bombas de Orgánico Recuperado	Standby	20	0,92	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPD-001	Bomba Dosificación Guar	Operada por VDF	2	0,85	1,76	0,79	2,22	1,36	1,00	0,90	1,58	1,23
400-PPD-002	Bomba Dosificación Guar	Operada por VDF	2	0,85	1,76	0,79	2,22	1,36	1,00	0,90	1,58	1,23
400-PPD-003	Bomba Dosificación Guar	Standby	2	0,85	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPD-004	Bomba Dosificación Guar	Standby	2	0,85	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPD-043	Bomba de Dosificación Solución de Sulfato de Cobalto	Operada por VDF	2	0,85	1,76	0,79	2,22	1,36	1,00	0,90	1,58	1,23
400-PPD-044	Bomba de Dosificación Solución de Sulfato de Cobalto	Standby	2	0,85	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400-PPV-001	Bombas Recolección Orgánico Tanque Colector Drenajes	Intermitente	1	0,85	0,88	0,72	1,22	0,85	0,10	0,70	0,06	0,06
400-PPV-003	Bombas Tranferencias Drenajes	Intermitente	20	0,92	12,57	0,83	15,14	8,45	0,10	0,70	0,88	0,59
400-VBC-001	Unidad Vibradora Tanque Borrás Anódicas	Intermitente	2	0,85	1,76	0,79	2,22	1,36	0,10	0,70	0,12	0,10
	CALENTADORES		208	0,95	139,60	0,90	155,11	67,61	1,00	0,95	132,62	64,23
400-SSAA-001	Servicios Auxiliares		175	0,95	117,45	0,90	130,50	56,88	1,00	0,95	111,58	54,04

Tabla D.5: Detalle sub-sector EW-1

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
500-CNB-001	Grúa Automática de Cosecha	3 Turnos (24 h)	87	0,95	68,68	0,88	78,04	37,07	1,00	0,75	51,51	27,80
500-CNB-002	Grúa Automática de Cosecha	3 Turnos (24 h)	87	0,95	68,68	0,88	78,04	37,07	1,00	0,75	51,51	27,80
500-CNB-003	Grúa de Mantenimiento	Intermitente	10	0,92	8,11	0,86	9,43	4,81	0,10	0,70	0,57	0,34
500-EMS-001	Maquina Deshojadora	3 Turnos (24 h)	402	0,94	319,03	0,87	366,71	180,80	1,00	0,75	239,28	135,60
500-FAN-001	Ventilador Extracción Centrifugo	Operada por VDF	250	0,93	200,54	0,89	225,32	102,74	1,00	0,90	180,48	92,46
500-FAN-002	Ventilador Extracción Centrifugo	Operada por VDF	250	0,93	200,54	0,89	225,32	102,74	1,00	0,90	180,48	92,46
500-FAN-003	Ventilador Extracción Centrifugo	Operada por VDF	250	0,93	200,54	0,89	225,32	102,74	1,00	0,90	180,48	92,46
500-FAN-004	Ventilador Extracción Centrifugo	Operada por VDF	250	0,93	200,54	0,89	225,32	102,74	1,00	0,90	180,48	92,46
500-PCM-001	Equipo de Reparación Bordes Cátodos	Intermitente	80	0,95	63,15	0,88	71,77	34,09	0,10	0,70	4,42	2,39
500-PPC-005	Bomba de Agua Desmineralizada	Operada por VDF	5	0,88	3,73	0,79	4,72	2,89	1,00	0,90	3,36	2,61
500-PPC-006	Bomba de Agua Desmineralizada	Standby	5	0,88	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500-PPC-007	Bomba de Agua Desmineralizada	Operada por VDF	10	0,91	7,95	0,84	9,47	5,14	1,00	0,90	7,16	4,62
500-PPC-008	Bomba de Agua Desmineralizada	Standby	10	0,91	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500-SSAA-001	Servicios Auxiliares		400	0,95	268,45	0,90	298,28	130,02	1,00	0,95	255,03	123,52
500-SSAA-002	Servicios Auxiliares		120	0,95	80,54	0,90	89,48	39,01	1,00	0,95	76,51	37,05
500-SSAA-003	Servicios Auxiliares		120	0,95	80,54	0,90	89,48	39,01	1,00	0,95	76,51	37,05

Tabla D.8: Detalle sub-sector Refino

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
810-PPV-001	Bombas de Impulsión Refino a Pila Dinámica	Operada por VDF	500	0,95	378,50	0,89	425,28	193,91	1,00	0,90	340,65	174,52
810-PPV-002	Bombas de Impulsión Refino a Pila Dinámica	Operada por VDF	500	0,95	378,50	0,89	425,28	193,91	1,00	0,90	340,65	174,52
810-PPV-003	Bombas de Impulsión Refino a Pila Dinámica	Operada por VDF	500	0,95	378,50	0,89	425,28	193,91	1,00	0,90	340,65	174,52
810-PPV-004	Bombas de Impulsión Refino a Pila Dinámica	Operada por VDF	500	0,95	378,50	0,89	425,28	193,91	1,00	0,90	340,65	174,52
810-PPV-005	Bombas de Impulsión Refino a Pila Dinámica	Standby	500	0,95	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
810-PPV-009	Motor Bomba Recolección Orgánico Poza Refino	Standby	0,75	0,72	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
810-PPC-001	Bomba impulsión Orgánico recuperado de Poza Refino a Planta Tratamiento Orgánico	Intermitente	1,5	0,85	1,32	0,78	1,69	1,06	0,10	0,70	0,09	0,07
810-PPC-002	Bomba impulsión Orgánico recuperado de Poza Refino a Planta Tratamiento Orgánico	Standby	1,5	0,85	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
810-SSAA-001	Servicios Auxiliares		80	0,95	53,69	0,90	59,66	26,00	1,00	0,95	51,01	24,70

Tabla D.9: Detalle sub-sector PLS

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
820-PPV-001	Bomba de Impulsión de Pozo a PLSLX A Pozo PLSES	Operada por VDF	200	0,96	155,42	0,86	180,72	92,22	1,00	0,90	139,88	83,00
820-PPV-002	Bomba de Impulsión de Pozo a PLSLX A Pozo PLSES	Operada por VDF	200	0,96	155,42	0,86	180,72	92,22	1,00	0,90	139,88	83,00
820-PPV-003	Bomba de Impulsión de Pozo a PLSLX A Pozo PLSES	Operada por VDF	200	0,96	155,42	0,86	180,72	92,22	1,00	0,90	139,88	83,00
820-PPV-004	Bomba de Impulsión de Pozo a PLSLX A Pozo PLSES	Operada por VDF	200	0,96	155,42	0,86	180,72	92,22	1,00	0,90	139,88	83,00
820-PPV-005	Bomba de Impulsión de Pozo a PLSLX A Pozo PLSES	Standby	200	0,96	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
820-PPV-006	Motor Bomba Achique Pozo Detección Fugas PLS LX	Intermitente	3	0,88	2,54	0,79	3,22	1,97	0,10	0,70	0,18	0,14
820-PPV-007	Motor Bomba Achique Pozo Detección Fugas PLS ES	Intermitente	3	0,88	2,54	0,79	3,22	1,97	0,10	0,70	0,18	0,14
810-PPV-006	Bombas de impulsión de poza emergencia a Poza de Refino	Operada por VDF	125	0,95	90,78	0,87	104,35	51,45	1,00	0,90	81,70	46,30
810-PPV-007	Bombas de impulsión de poza emergencia a Poza de Refino	Standby	125	0,95	0,00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
820-SSAA-001	Servicios Auxiliares		87	0,95	58,39	0,90	64,88	28,28	1,00	0,95	55,47	26,86

Tabla D.10: Detalle sub-sector ILS

N° Equipo	Descripción	Obs.	Carga Nominal	Carga Conectada					Carga Demandada			
				HP	Ef.	kW	F.P.	kVA	kVAr	F.O	F.C.	kW
830-PPV-001	Bomba de Impulsión de Pozo de ILS a Pila	Operada por VDF	500	0,94	349,99	0,87	402,28	198,35	1,00	0,90	314,99	178,51
830-PPV-002	Bomba de Impulsión de Pozo de ILS a Pila	Operada por VDF	500	0,94	349,99	0,87	402,28	198,35	1,00	0,90	314,99	178,51
830-PPV-003	Bomba de Impulsión de Pozo de ILS a Pila	Operada por VDF	500	0,94	349,99	0,87	402,28	198,35	1,00	0,90	314,99	178,51
830-PPV-004	Bomba de Impulsión de Pozo de ILS a Pila	Operada por VDF	500	0,94	349,99	0,87	402,28	198,35	1,00	0,90	314,99	178,51
830-PPV-005	Bomba de Impulsión de Pozo de ILS a Pila	Standby	500	0,94	0,00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
830-SSAA-001	Servicios Auxiliares		87	0,95	58,39	0,90	64,88	28,28	1,00	0,95	55,47	26,86

Tabla D.11: Factor de potencia y eficiencia según potencia nominal

HP	Factor de potencia	Eficiencia
0,25	0,50	0,72
0,50	0,50	0,72
0,75	0,54	0,72
1,00	0,72	0,85
1,50	0,78	0,85
2,00	0,79	0,85
3,00	0,79	0,88
5,00	0,83	0,89
7,50	0,84	0,91
10,00	0,86	0,92
15,00	0,83	0,92
20,00	0,85	0,93
25,00	0,86	0,93
30,00	0,87	0,94
40,00	0,86	0,94
50,00	0,88	0,94
60,00	0,84	0,94
75,00	0,88	0,95
100,00	0,87	0,95
125,00	0,84	0,95
150,00	0,85	0,96
200,00	0,86	0,96
250,00	0,89	0,93
300,00	0,89	0,94
350,00	0,88	0,94
400,00	0,87	0,94
450,00	0,89	0,95
500,00	0,89	0,95

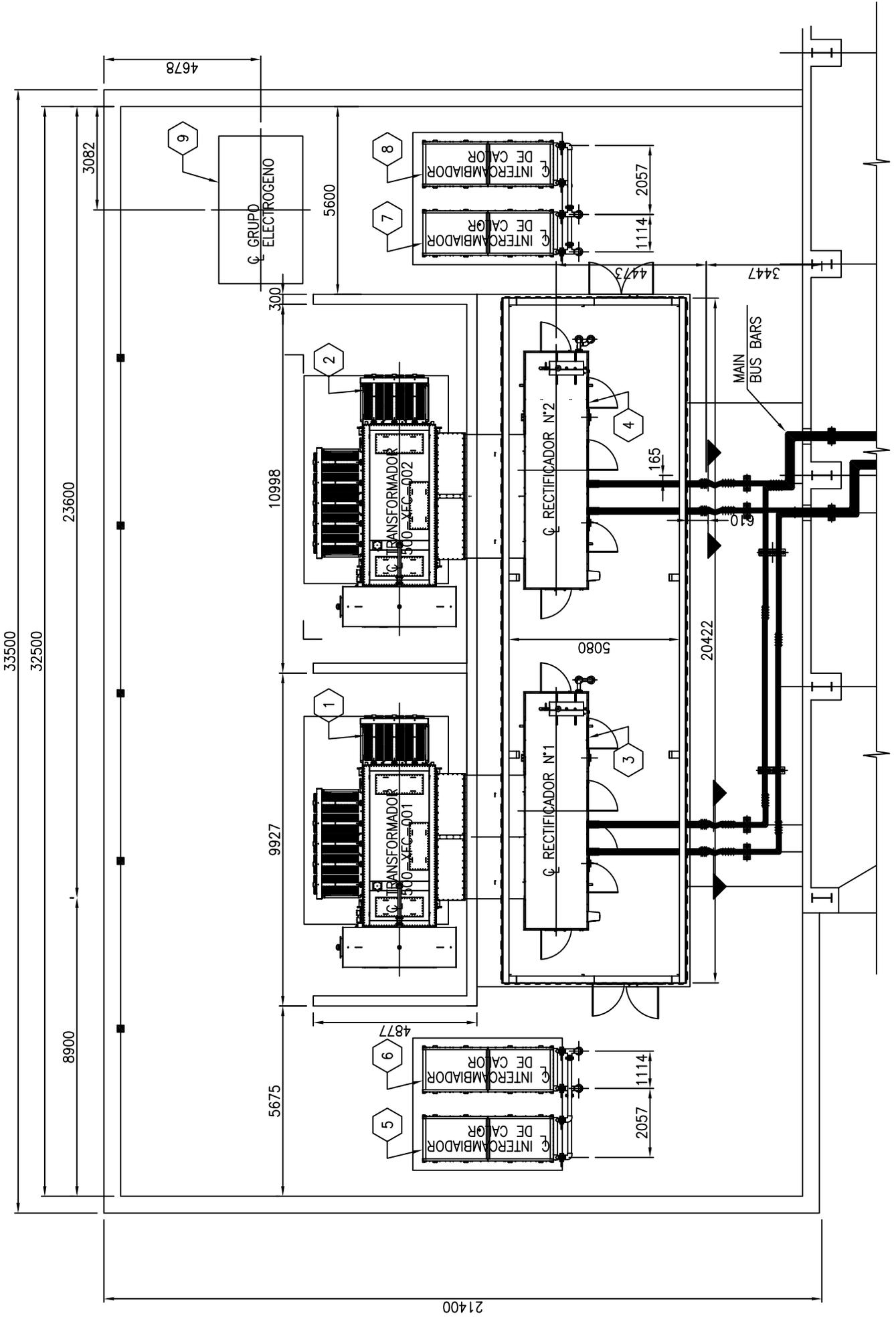
Tabla D.12: Factores de carga y operación según características de la carga

Características carga	Factor de operación	Factor de carga
3 Turnos (24 h)	1,00	0,75
2 Turnos (16 h)	0,60	0,75
22 h	0,90	0,75
CALENTADORES	1,00	0,95
Intermitente	0,10	0,70
Operada por VDF	1,00	0,90
Standby	0,00	0,00
Trafo-Rectificador	0,86	0,85

Apéndice E: Plano de disposición general de equipos del sistema de rectificación

Sub-sector Rectificadores A

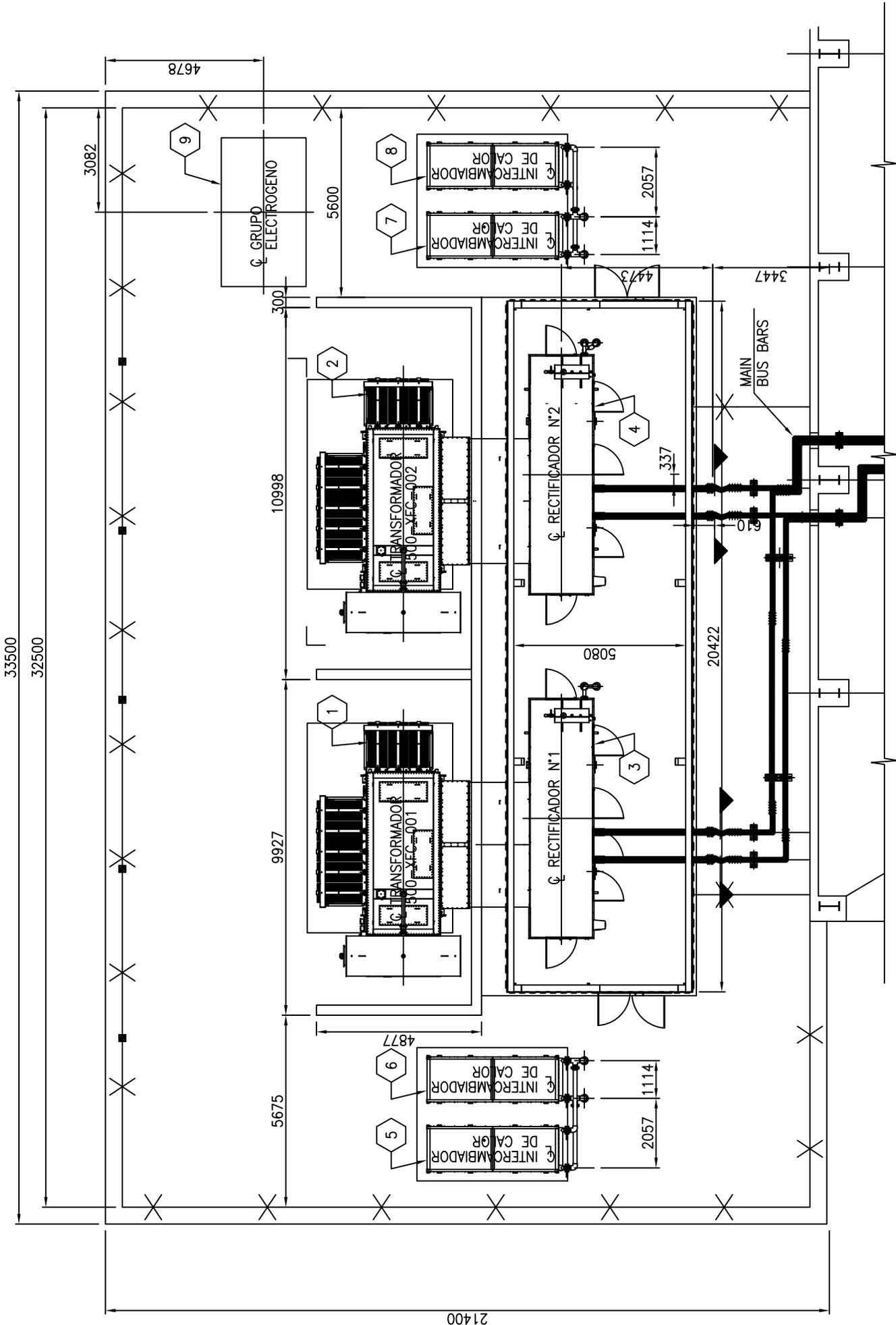
LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	500-XFC-001	TRANSFORMADOR RECTIFICADOR 10,9/2x7,7 MVA	-	-	-
2	500-XFC-002	TRANSFORMADOR RECTIFICADOR 10,9/2x7,7 MVA	-	-	-
3	500-RCC-001	RECTIFICADOR N°1	-	-	-
4	500-RCC-002	RECTIFICADOR N°2	-	-	-
5	500-HXD-001	INTERCAMBIADOR DE CALOR 1	-	-	-
6	500-HXD-002	INTERCAMBIADOR DE CALOR 2	-	-	-
7	500-HXD-003	INTERCAMBIADOR DE CALOR 3	-	-	-
8	500-HXD-004	INTERCAMBIADOR DE CALOR 4	-	-	-
9	500-GED-001	GRUPO ELECTROGENO 350 KVA	-	-	-



SALA ELECTRICA 500-ERS-001
 ESC. 1:150

Sub-sector Rectificadores B

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	500-XFC-003	TRANSFORMADOR RECTIFICADOR 10,9/2x7,7 MVA	-	-	-
2	500-XFC-004	TRANSFORMADOR RECTIFICADOR 10,9/2x7,7 MVA	-	-	-
3	500-RCC-003	RECTIFICADOR N°1	-	-	-
4	500-RCC-004	RECTIFICADOR N°2	-	-	-
5	500-HXD-005	INTERCAMBIADOR DE CALOR 1	-	-	-
6	500-HXD-006	INTERCAMBIADOR DE CALOR 2	-	-	-
7	500-HXD-007	INTERCAMBIADOR DE CALOR 3	-	-	-
8	500-HXD-008	INTERCAMBIADOR DE CALOR 4	-	-	-
9	500-GED-002	GRUPO ELECTROGENO 350 KVA	-	-	-



SALA ELECTRICA 500-ERS-002
 ESC. 1:150

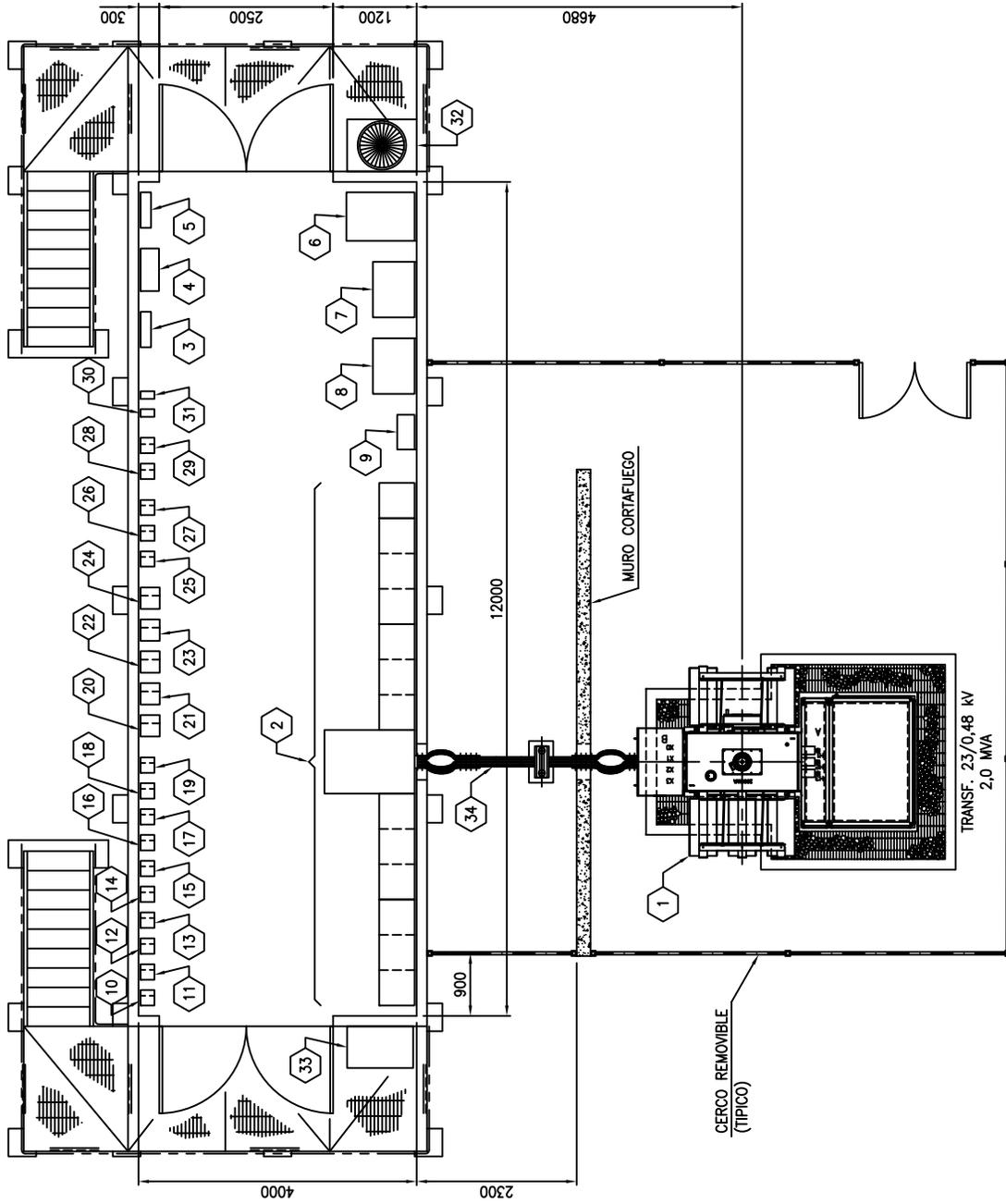
Apéndice F: Plano de disposición general de salas eléctricas de baja tensión

Sub-sector SX-1

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	300-XFU-001	TRANSFORMADOR DE PODER SX	-	-	-
2	300-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES SX	7518	1295	2440
3	300-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO	510	150	915
4	300-SBL-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA	610	265	1500
5	300-LPA-001	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN ALUMBRADO	510	150	915
6	300-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 50KVA	700	980	650
7	300-COA-001	DCS	800	600	2100
8	300-UPS-001	UPS	-	-	-
9	300-DPI-001	TABLERO FUERZA INSTRUMENTACION	500	250	750
10	300-AGA-102-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
11	300-AGA-103-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
12	300-AGA-105-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
13	300-AGA-106-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
14	300-AGA-108-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
15	300-AGA-109-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
16	300-AGA-111-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
17	300-AGA-112-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
18	300-AGA-114-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
19	300-AGA-115-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
20	300-AGA-101-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
21	300-AGA-104-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
22	300-AGA-107-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
23	300-AGA-110-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
24	300-AGA-113-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
25	300-PPC-101-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
26	300-PPC-102-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
27	300-PPC-103-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
28	300-PPC-104-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 20 HP	222	200	342.5
29	300-PPC-105-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 20 HP	222	200	342.5
30	300-PPC-106-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 7.5 HP	110	200	336
31	300-PPC-107-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 7.5 HP	110	200	336
32		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
33		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
34	300-BSC-001	DUCTO DE BARRAS	-	-	-
35					
36					
37					
38					
39					
40					

NOTA :

1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



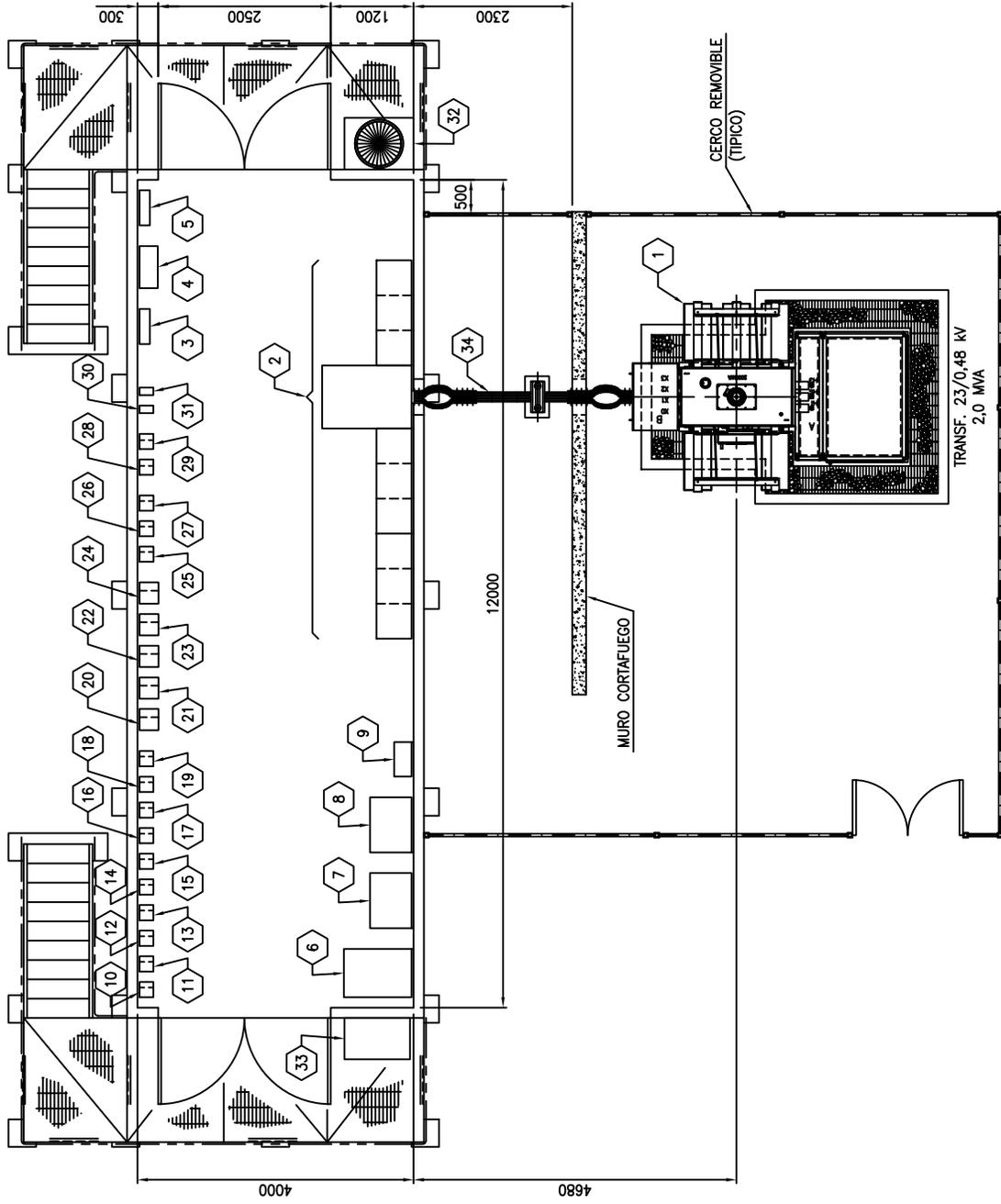
SALA ELECTRICA 300-ERS-001
 ESC. 1:100

Sub-sector SX-2

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	300-XFU-002	TRANSFORMADOR DE PODER SX	-	-	-
2	300-MCL-002	CENTRO CONTROL MOTORES SX	5486	1295	2440
3	300-DPA-002	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO	510	150	915
4	300-SBL-002	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA	610	265	1500
5	300-LPA-002	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN ALUMBRADO	510	150	915
6	300-XFD-002	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 50KVA	700	980	650
7	300-COA-002	DCS	800	600	2100
8	300-UPS-002	UPS	-	-	-
9	300-DPI-002	TABLERO FUERZA INSTRUMENTACION	500	250	750
10	300-AGA-202-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
11	300-AGA-203-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
12	300-AGA-205-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
13	300-AGA-206-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
14	300-AGA-208-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
15	300-AGA-209-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
16	300-AGA-211-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
17	300-AGA-212-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
18	300-AGA-214-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
19	300-AGA-215-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 50 HP	222	200	517.5
20	300-AGA-201-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
21	300-AGA-204-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
22	300-AGA-207-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
23	300-AGA-210-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
24	300-AGA-213-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 75 HP	308.9	275.4	644.5
25	300-PPC-201-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
26	300-PPC-202-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
27	300-PPC-203-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
28	300-PPC-204-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 20 HP	222	200	342.5
29	300-PPC-205-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 20 HP	222	200	342.5
30	300-PPC-206-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 7.5 HP	110	200	336
31	300-PPC-207-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 7.5 HP	110	200	336
32		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
33		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
34	300-BSC-001	DUCTO DE BARRAS	-	-	-
35					
36					
37					
38					
39					
40					

NOTA :

1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



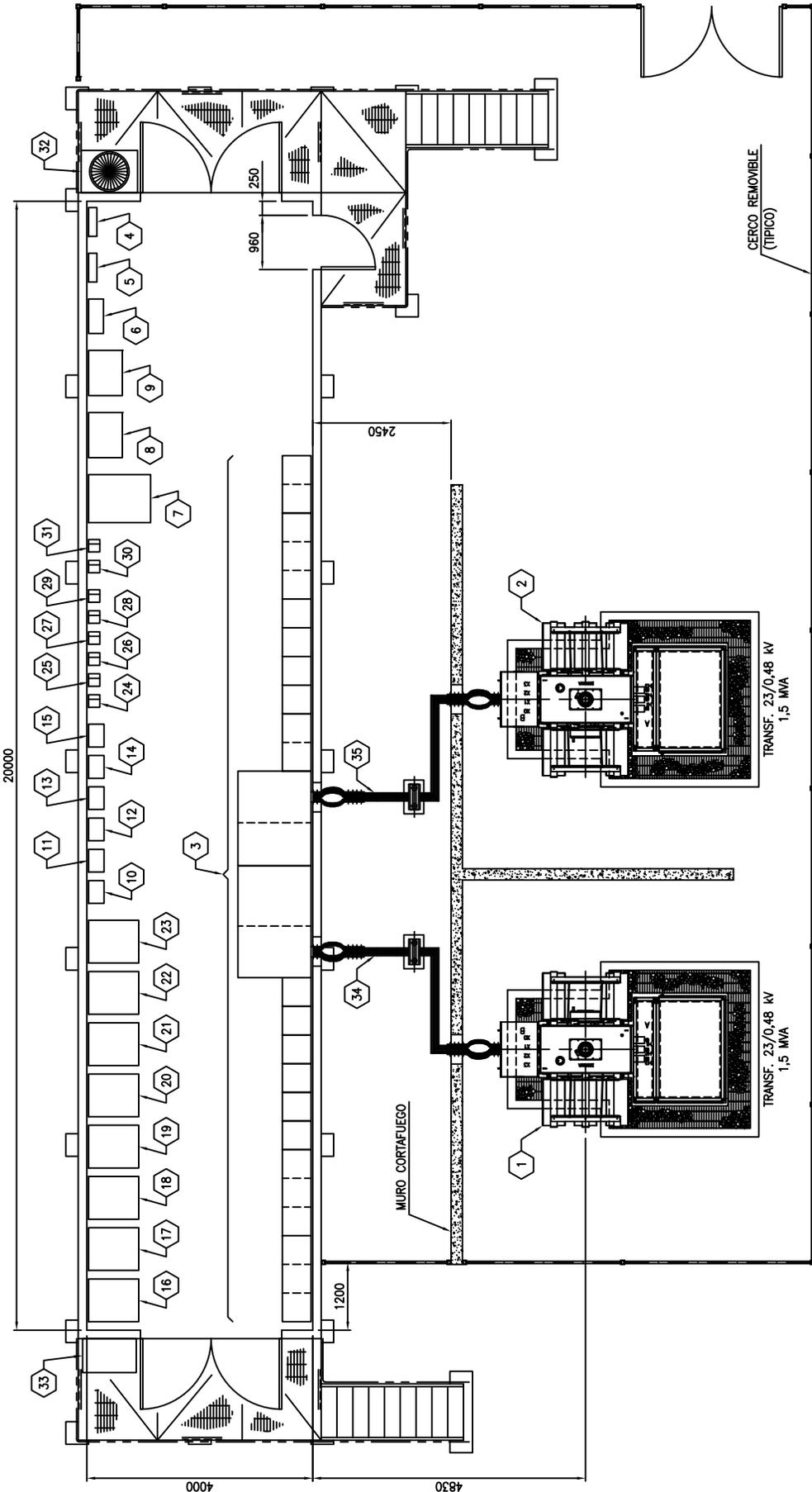
SALA ELECTRICA 300-ERS-002
 ESC. 1:100

Sub-sector TF

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	400-XFU-001	TRANSFORMADOR DE PODER TF PATIO DE TANQUES	-	-	-
2	400-XFU-002	TRANSFORMADOR DE PODER TF	-	-	-
3	400-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES TF	15342	1295	2440
4	400-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO SALA	510	150	915
5	400-LPA-001	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN ALUMBRADO PLANTA	510	150	915
6	400-SBL-001	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN FUERZA	610	265	1500
7	400-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 50KVA	850	1100	650
8	300-COA-001	DCS	800	600	2100
9	300-UPS-001	UPS	-	-	-
10	400-PPC-001-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
11	400-PPC-002-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
12	400-PPC-003-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
13	400-PPV-012-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
14	400-PPC-013-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
15	400-PPC-014-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 150 HP	403.9	275.5	850
16	400-PPC-004-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
17	400-PPC-005-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
18	400-PPC-006-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
19	400-PPC-007-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
20	400-PPC-008-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
21	400-PPC-009-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
22	400-PPC-010-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
23	400-PPV-011-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 300 HP	757.7	889	2373.9
24	400-PPD-001-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
25	400-PPD-002-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
26	400-PPD-003-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
27	400-PPD-004-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
28	400-PPD-043-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
29	400-PPD-044-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 2.5 HP	222	200	517.5
30	400-PPC-015-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
31	400-PPC-016-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 60 HP	220	201.7	758.8
32		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
33		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
34	400-BSC-001	DUCTO DE BARRAS	-	-	-
35	400-BSC-002	DUCTO DE BARRAS	-	-	-
36					
37					
38					
39					
40					

NOTA :

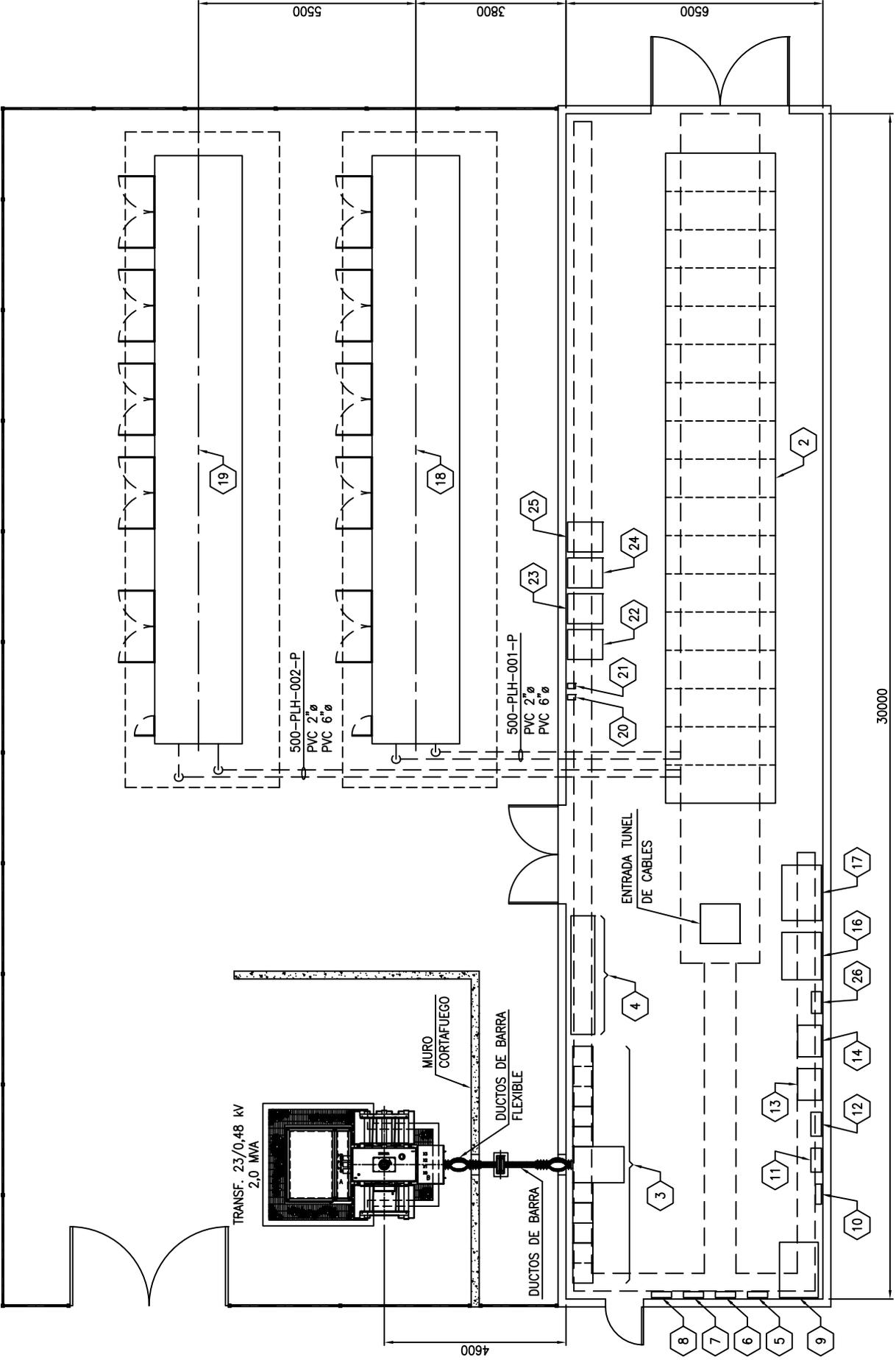
1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



SALA ELECTRICA 400-ERS-001
 ESC. 1:110

Sub-sector EW-1

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	500-XFU-001	SUBESTACION UNITARIA, 2.0 MVA, 23/0,48 kV	—	—	—
2	500-SCM-001	SWITCHGEAR MEDIA TENSION 23 kV	15545	2781	2416
3	500-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES 480 V EW	5994	1295	2440
4	500-MCL-002	CENTRO CONTROL MOTORES MAQUINA DESHOJADORA	3000	600	2100
5	500-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO SALA	510	150	915
6	500-DPA-002	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA PLANTA	510	150	915
7	500-LPA-001	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN ALUMBRADO PLANTA	510	150	915
8	500-LPA-002	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN ALUMBRADO PLANTA	510	150	915
9	500-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN	980	1400	650
10	500-DPD-001	TABLERO DISTRIBUCIÓN 125 VDC	510	150	915
11	500-SBL-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA PLANTA DEP. ELECTROLITICA	610	265	1500
12	500-SBL-002	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA PLANTA DEP. ELECTROLITICA	610	265	1500
13	500-COA-001	DCS	800	600	2100
14	500-UPS-001	UPS	—	—	—
15	500-BSC-001	DUCTO DE BARRA	—	—	—
16	500-BAB-001	BANCO DE BATERIAS SWITCHGEAR	1200	1000	1000
17	500-BAC-001	CARGADOR DE BATERIAS SWITCHGEAR	1400	1000	1200
18	500-PLH-001	FILTROS ARMONICOS PLANTA DEP. ELECTROLITICA	4000	14900	2950
19	500-PLH-002	FILTROS ARMONICOS PLANTA DEP. ELECTROLITICA	4000	14900	2950
20	500-PPC-007-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 10 HP	135	200	336
21	500-PPC-008-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 10 HP	135	200	336
22	500-FAN-001-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 250 HP	757.7	889	2373.9
23	500-FAN-002-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 250 HP	757.7	889	2373.9
24	500-FAN-003-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 250 HP	757.7	889	2373.9
25	500-FAN-004-V	VDF CON FILTRO du/dt MOTOR DE 250 HP	757.7	889	2373.9
26	500-TDI-004-V	TABLERO DE FUERZA INSTRUMENTACION	550	250	750
27					
28					
29					
30					



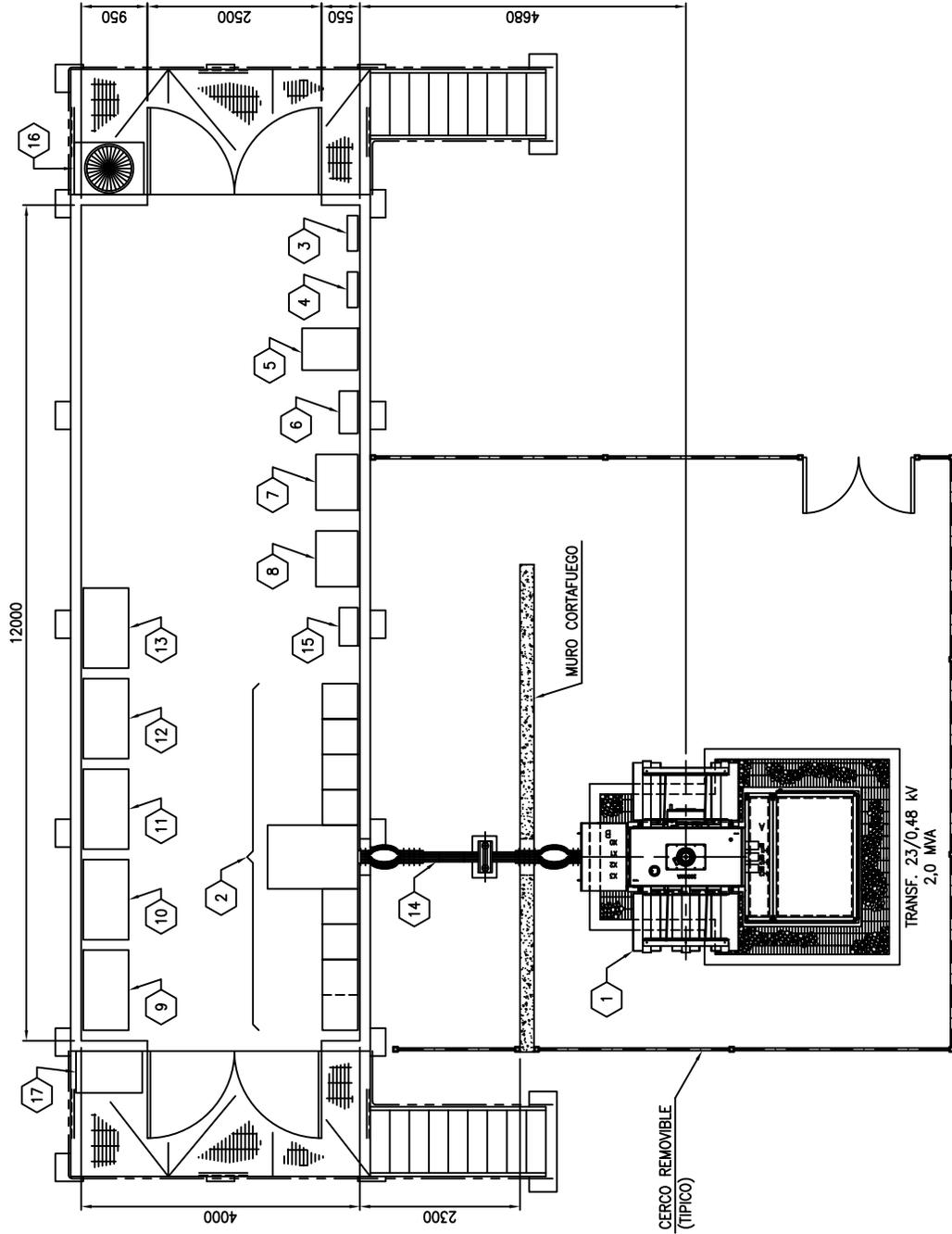
SALA ELECTRICA 500-ERC-001
 ESC. 1:140

Sub-sector Refino

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	810-XFU-001	TRANSFORMADOR DE PODER	-	-	-
2	810-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES	4978	1295.2	2400
3	810-COA-001	DCS	800	600	2100
4	810-UPS-001	UPS	-	-	-
5	810-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO	510	150	915
6	810-LPA-001	TABLERO GRAL. DISTRIBUCION ALUMBRADO	510	150	915
7	810-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 30KVA	600	800	650
8	810-PPV-001	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
9	810-PPV-002	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
10	810-PPV-003	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
11	810-PPV-004	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
12	810-PPV-005	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
13	810-BSC-001	DUCTOS DE BARRA	-	-	-
14		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
15		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
16	810-SBL-001	CENTRO DE DISTRIBUCION DE FUERZAS	610	265	1500
17	810-TDI-001	TABLERO DE FUERZA INSTRUMENTACION	550	250	750
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

NOTA :

1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



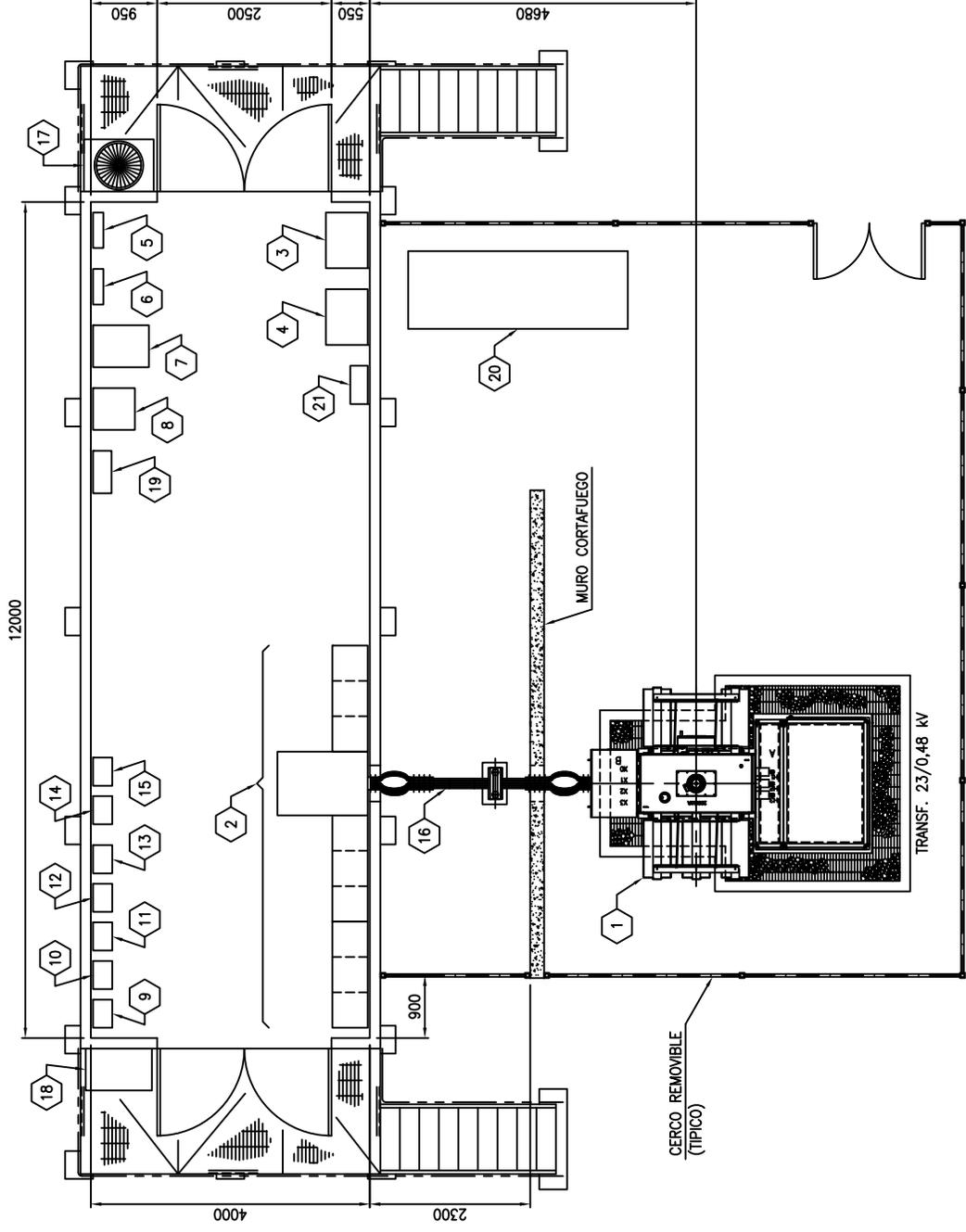
SALA ELECTRICA 810-ERS-001
 ESC. 1:100

Sub-sector PLS

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	820-XFU-001	TRANSFORMADOR DE PODER PLS	-	-	-
2	820-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES PLS	5486	1295	2286
3	820-COA-001	DCS	800	600	2100
4	820-UPS-001	UPS	-	-	-
5	820-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO	510	150	915
6	820-LPA-001	TABLERO GRAL. DISTRIBUCION ALUMBRADO	510	150	915
7	820-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION 30KVA	600	800	650
8	820-XFD-002	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION PLS ED	600	600	1400
9	820-PPV-001	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 200 HP	403.9	275.5	850
10	820-PPV-002	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 200 HP	403.9	275.5	850
11	820-PPV-003	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 200 HP	403.9	275.5	850
12	820-PPV-004	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 200 HP	403.9	275.5	850
13	820-PPV-005	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 200 HP	403.9	275.5	850
14	810-PPV-006	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 125 HP	403.9	275.5	850
15	810-PPV-007	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 125 HP	403.9	275.5	850
16	820-BSC-001	DUCTOS DE BARRA	-	-	-
17		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
18		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
19	820-SBL-001	CENTRO DE DISTRIBUCION DE CARGAS	610	265	1500
20	820-GED-001	GRUPO ELECTROGENO PLS	3150	1115	1850
21	820-TDI-001	TABLERO DE FUERZA INSTRUMENTACION	550	250	750
22					
23					
24					
25					
26					

NOTA :

1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



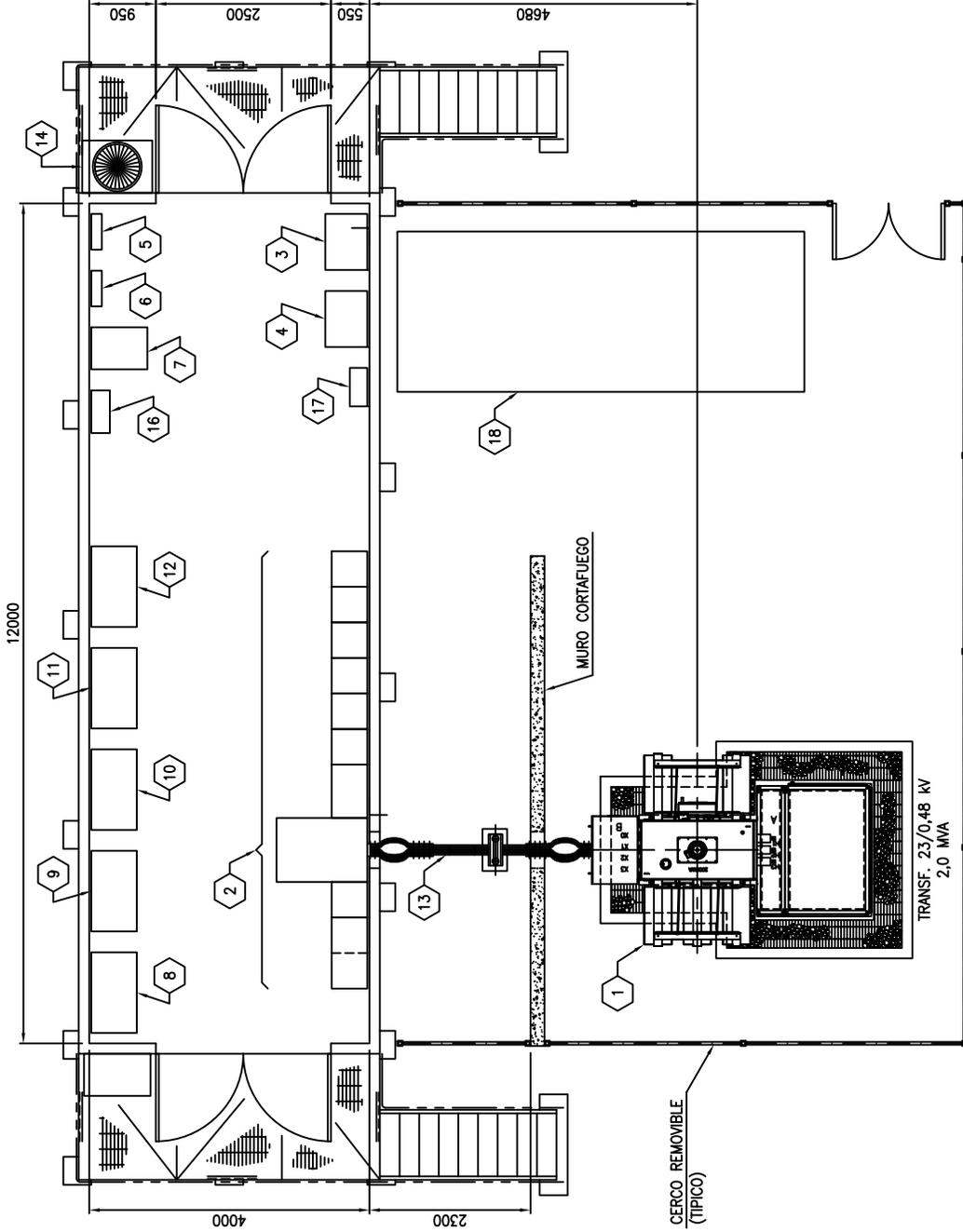
SALA ELECTRICA 820-ERS-001
 Esc. 1:100

Sub-sector ILS

LISTADO DE EQUIPOS					
N°	TAG N°	NOMBRE DE EQUIPO	ANCHO[mm]	PROF.[mm]	ALTURA[mm]
1	830-XFU-001	TRANSFORMADOR DE PODER	-	-	-
2	830-MCL-001	CENTRO CONTROL MOTORES	6248	1295	2440
3	830-COA-001	DCS	800	600	2100
4	830-UPS-001	UPS	-	-	-
5	830-DPA-001	TABLERO GRAL. DIST. FUERZA Y ALUMBRADO	510	150	915
6	830-LPA-001	TABLERO GRAL. DISTRIBUCION ALUMBRADO	510	150	915
7	830-XFD-001	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 30KVA	600	800	650
8	830-PPV-001	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
9	830-PPV-002	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
10	830-PPV-003	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
11	830-PPV-004	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
12	830-PPV-005	VDF CON FILTRO du/dt BOMBA DE 500 HP	1150	650	2000
13	830-BSC-001	DUCTOS DE BARRA	-	-	-
14		EQUIPO DE PRESURIZACION SALA	-	-	-
15		EQUIPO DE CLIMATIZACION SALA	-	-	-
16	830-SBL-001	CENTRO DE DISTRIBUCION DE FUERZAS	610	265	1500
17	830-TDI-001	TABLERO DE FUERZA INSTRUMENTACION	550	250	750
18	830-GED-001	GRUPO ELECTROGENO ILS	5810	2290	1450
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

NOTA :

1.- DIMENSIONES INDICADAS EN mm. S.I.C.



SALA ELECTRICA 830-ERS-001
 ESC. 1:100

Apéndice G: Modelación y simulaciones en el software ETAP

Modelación del Área Húmeda

Aspectos generales

Una vez que se ha definido el Área Húmeda a considerar, especificando las cargas y sus respectivos modos de operación, se procederá a elaborar el modelo de esta. Antes, es necesario recalcar, que el propósito de las simulaciones es medir el nivel de contaminación armónica: tanto en el PCC, como en las barras alimentadoras aguas abajo. Esto, bajo condiciones normales de operación y tomando en consideración distintos escenarios de filtrado. En otras palabras, se quiere calcular los índices de distorsión armónica, de tensión y corriente, con la planta funcionando en régimen permanente y sin la presencia de contingencias (con y sin bancos de filtrado armónico). Así, se busca conocer el nivel de contaminación de la planta, con el fin de afirmar (o negar) la necesidad de utilizar métodos para la mitigación de armónicas.

Para todos los efectos de simulaciones de esta memoria, se utilizó el software ETAP versión 6.0.0. Donde se emplearon los módulos de “Análisis de Flujo de Potencia” y “Análisis Armónico”. Dicho lo anterior, se procederá a describir la forma en que el Área Húmeda, definida anteriormente, fue modelada.

Se partió utilizando un archivo existente, que fue desarrollado en la empresa, al cual se le fueron haciendo modificaciones. A grandes rasgos, existen principalmente cinco tipos de equipos a considerar en el modelo de la planta¹²: motores de inducción, otros consumos en corriente alterna (motores con componente estática, tableros, etc.), variadores de frecuencia, rectificadores y cargas en corriente continua.

En los siguientes párrafos, se detallarán las características de importancia que fueron consideradas, para cada uno de los cinco grupos mencionados anteriormente, en la modelación de la planta.

Motores de inducción

Las máquinas de inducción, se modelaron con los valores nominales disponibles en las librerías del programa ETAP y según la potencia señalada en la columna “Carga Nominal”, de las tablas del Apéndice D. Por ende, los demás datos de placa considerados, corresponden a los especificados en la librería del programa.

Además, cabe mencionar que los consumos que fueron especificados en el Apéndice D con un servicio de tipo: Operada por VDF, 2 Turnos (16 h), 22 h y 3 turnos (24 h), se modelaron como cargas de operación continua y por consiguiente, se les asoció un factor de demanda igual a 1 [p.u.]. Asimismo, el factor de demanda para las cargas de tipo intermitente y standby, fue igual a 0,5 [p.u.] y 0 [p.u.] respectivamente.

¹² Existen otros dispositivos (cables, transformadores reductores, interruptores, barras, etc.) que no serán considerados en la descripción, debido a que su especificación no es relevante para el cumplimiento de esta memoria

Por otro lado, en la Tabla D.4 del Apéndice D, se especificaron tres compresores dentro del área TF-2, los que fueron modelados como motores de inducción de potencia nominal igual a 150 [HP].

Para información detallada sobre los datos de placa de los motores disponibles en la librería del programa, se recomienda ver la Tabla H.1 del Apéndice H.

Otros consumos en corriente alterna

Dentro de esta categoría, se reúnen todos los consumos de corriente alterna que no son fueron especificados como un motor de inducción propiamente tal.

La siguiente tabla, especifica que equipos han sido considerados en esta categoría, así como los valores nominales que se tomaron en cuenta.

Tabla G. 1: Modelación otros consumos en corriente alterna

N° Equipo	Descripción	Vnom [kV]	Carga demandada					Obs.
			[kVA]	F.P. [%]	[kW]	[kVAr]	[A]	
300-CTS-001	Alimentador Tricanter	0,48	8,5	85,02	7,22	4,47	10,21	
300-FLF-001	Filtro Placa	0,48	4,2	85,96	3,65	2,17	5,11	
	CALENTADORES	0,48	155,0	90,00	140	67,56	185,9	
500-CNB-001	Grúa Automática de Cosecha	0,48	58,5	88,00	51,51	27,8	70,4	10% de carga estática
500-CNB-002	Grúa Automática de Cosecha	0,48	58,5	88,00	51,51	27,8	70,4	10% de carga estática
500-EMS-001	Maquina Deshojadora	0,48	275	86,91	239	136	330,8	10% de carga estática
500-PCM-001	Equipo de Reparación Bordes Cátodos	0,48	5	87,96	4,42	2,39	6,04	10% de carga estática

En la tabla anterior, se aprecia que existen consumos con un 10% de carga estática y por lo tanto, un 90% de la potencia total, se comporta como motor.

Variadores de frecuencia

Al igual que en el caso de los motores, los variadores de frecuencia fueron modelados en base a los equipos disponibles en las librerías del programa. Escogiéndose dispositivos de tipo genérico y de seis pulsos.

Las siguientes tablas, muestran respectivamente, los datos de placa y las características armónicas, de los variadores considerados en el modelo de la planta.

Tabla G. 2: Características nominales de variadores de frecuencia

Clasificación			Carga nominal			
[HP]	[kV]	Ef. [%]	[kVA]	[kW]	[kVAr]	F.P. [%]
2	0,48	100	2,3	1,877	1,276	82,7
5	0,48	100	5,3	4,506	2,806	84,89
7,5	0,48	100	7,7	6,642	3,966	85,86
10	0,48	100	10,1	8,748	5,065	86,54
25	0,48	100	23,7	21,057	10,945	88,73
50	0,48	100	45,3	40,962	19,389	90,39
60	0,48	100	53,7	48,803	22,489	90,82
75	0,48	100	66,2	60,474	26,927	91,35
125	0,48	100	110	101	44,397	91,51
150	0,48	100	132	121	52,953	91,59
200	0,48	100	175	161	69,922	91,71
250	0,48	100	219	201	86,742	91,8
300	0,48	100	262	241	103	91,87
500	0,48	100	433	399	168	92,15

Tabla G. 3: Características armónicas de variadores de frecuencia

Orden de la armónica	Magnitud de la fundamental [%]	Desfase angular [°]
5	20	0
7	14,3	0
11	9,1	0
13	7,7	0
17	5,9	0
19	5,3	0
23	4,3	0
25	4	0
29	3,4	0
31	3,2	0
35	2,8	0
37	2,7	0
41	2,4	0
43	2,3	0
47	2,1	0
49	2	0

Rectificadores

Cada sistema de rectificación, se compone de dos rectificadores de 6 pulsos en configuración ANSI 45-46. Esto, para disponer de unidades rectificadoras de 12 pulsos.

Las siguientes tablas, muestran las características nominales, de los equipos considerados en los sistemas de rectificación.

Tabla G. 4: Características nominales de transformadores de tres enrollados

Primario		Secundario			Terciario		
Vnom	S	Vnom	S	Desfase con respecto al primario	Vnom	S	Desfase con respecto al primario
[kV]	[MVA]	[kV]	[MVA]	[°]	[kV]	[MVA]	[°]
23	11,9	0,48	7,7	0	0,48	7,7	-30

Tabla G. 5: Características nominales de rectificadores

Clasificación AC						Clasificación DC			
S	Ef.	Vnom	F.P.	I a plena carga	Ángulo de disparo	P	Vnom	I a plena carga	I _{max}
[MVA]	[%]	[kV]	[%]	[A]	[°]	[MW]	[V]	[A]	(magnitud de Inom) [%]
5,158	95	0,48	90	6204	25,8	4,41	315	14000	150

Las características armónicas de los rectificadores son idénticas a la de los variadores de frecuencia considerados (ver Tabla G. 3).

Cargas en corriente continua

Estos consumos, que corresponden al suministro eléctrico de las celdas de electro-obtención, fueron modelados como cargas en corriente continua equivalentes a 15 [MW] a un nivel de tensión de 315 [V].

Al hacer la comparación, entre los consumos eléctricos considerados al definir el Área Húmeda y las cargas consideradas en la modelación, se pueden observar ciertas diferencias en las magnitudes de estas, así como también, en los respectivos factores de potencia. Pese a lo anterior, el modelo confeccionado es totalmente válido, pues permitirá analizar sin pérdida de generalidad, el comportamiento de la planta y el de los equipos en estudio.

Simulación del comportamiento eléctrico del Área Húmeda en el software ETAP

Caso 1: Área Húmeda sin filtrado armónico

El primer caso a analizar, corresponde al estudio del comportamiento eléctrico de la planta, cuando no se considera ninguna técnica para la mitigación de armónicos, salvo la disposición de los rectificadores en configuración ANSI 45-46, para obtener dos grupos rectificadores de 12 pulsos.

Luego de haber validado el modelo de la Planta Húmeda en estudio, se procedió a simular el comportamiento de esta. Para ello, se implementaron los módulos de “Análisis de Flujo de Potencia” y “Análisis Armónico”, obteniéndose los resultados que se resumen en las siguientes tablas.

Tabla G. 6: Flujo de potencia de la componente fundamental para el caso 1

Barra	Tensión			Carga			
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	Ang. [°]	P [MW]	Q [MVA _r]	S [MVA]	F.P. [%]
300-MCL-001	0,48	0,9776	-31,9	1,018	0,473	1,123	90,69
300-MCL-002	0,48	0,9795	-31,7	0,944	0,435	1,039	90,82
400-MCL-001	0,48	0,9625	-33	1,157	0,520	1,268	91,21
400-MCL-001a	0,48	0,9538	-33,6	1,336	0,618	1,472	90,76
500-MCL-001	0,48	0,9902	-33	1,588	0,755	1,758	90,31
500-SGM-001	23	0,9997	0	22,704	12,577	25,955	87,48
500-SGM-001a	23	0,9997	0	25,081	13,650	28,555	87,83
500-SGM-002	23	0,9987	-0,1	18,713	10,436	21,426	87,34
500-SGM-003	23	0,9977	-0,1	18,713	10,439	21,428	87,33
810-MCL-001	0,48	0,9502	-33,3	1,647	0,697	1,788	92,09
820-MCL-001	0,48	0,9426	-33,1	0,801	0,352	0,875	91,55
830-MCL-001	0,48	0,9387	-33,2	1,649	0,698	1,791	92,09

Tabla G. 7: Información de armónicos del sistema para el caso 1

Barra	Tensión				Corriente		
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	RMS [p.u.]	THD [%]	Fund. [A]	RMS [A]	THD [%]
300-MCL-001	0,48	0,9776	0,9952	19,08	1381,37	1418,44	23,32
300-MCL-002	0,48	0,9795	0,9998	20,45	1276,21	1318,09	25,83
400-MCL-001	0,48	0,9625	1,0039	29,63	1585,55	1620,72	21,18
400-MCL-001a	0,48	0,9538	0,9864	26,37	1856,49	1894,78	20,42
500-MCL-001	0,48	0,9902	0,9982	12,79	2136,03	2154,07	13,02
500-SGM-001	23	0,9997	1,0027	7,71	651,70	656,92	12,68
500-SGM-001a	23	0,9997	1,0029	8,04	717,02	723,54	13,52
500-SGM-002	23	0,9987	1,0019	7,97	538,56	543,52	13,6
500-SGM-003	23	0,9977	1,0013	8,52	539,13	544,08	13,59
810-MCL-001	0,48	0,9502	1,0159	37,84	2264,00	2346,64	27,26
820-MCL-001	0,48	0,9426	0,9982	34,87	1116,66	1152,54	25,55
830-MCL-001	0,48	0,9387	1,0064	38,65	2294,50	2375,93	26,88

Al observar los resultados de la Tabla G. 7, es posible apreciar que en este caso de análisis, no se cumple con los requerimientos impuestos por la norma IEEE 519. De manera que se hace necesario, el implementar algún método de filtrado que permita alcanzar los límites impuestos por dicha norma.

Caso 2: Área húmeda con filtrado armónico en barras de rectificación

Con el fin de cumplir con los requerimientos de la norma IEEE 519, a cada barra de rectificación (500-SGM-002 y 500-SGM-003), del modelo actual de la planta, se le agregará un banco de filtros pasivos.

El cálculo de cada filtro mencionado, así como el detalle de sus respectivos parámetros, se encuentra disponible en el Apéndice I.

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones del comportamiento de la planta, al conectar los bancos de filtrado armónico en las respectivas barras rectificadoras.

Tabla G. 8: Flujo de potencia de la componente fundamental para el caso 2

Barra	Tensión			Carga			
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	Ang. [°]	P [MW]	Q [MVar]	S [MVA]	F.P. [%]
300-MCL-001	0,48	0,9777	-31,9	1,018	0,473	1,123	90,69
300-MCL-002	0,48	0,9796	-31,7	0,944	0,434	1,039	90,86
400-MCL-001	0,48	0,9626	-33	1,157	0,520	1,268	91,21
400-MCL-001a	0,48	0,9539	-33,6	1,336	0,618	1,472	90,76
500-MCL-001	0,48	0,9903	-33	1,588	0,755	1,758	90,31
500-SGM-001	23	0,9998	0	22,721	4,742	23,211	97,89
500-SGM-001a	23	0,9998	0	25,096	5,814	25,761	97,42
500-SGM-002	23	0,9992	-0,1	18,733	2,606	18,913	99,05
500-SGM-003	23	0,9986	-0,1	18,733	2,613	18,914	99,04
810-MCL-001	0,48	0,9503	-33,3	1,647	0,697	1,788	92,09
820-MCL-001	0,48	0,9427	-33,1	0,801	0,352	0,875	91,55
830-MCL-001	0,48	0,9389	-33,2	1,649	0,698	1,791	92,09

Tabla G. 9: Información de armónicos del sistema para el caso 2

Barra	Tensión				Corriente		
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	RMS [p.u.]	THD [%]	Fund. [A]	RMS [A]	THD [%]
300-MCL-001	0,48	0,9777	0,9885	14,89	1381,24	1419,05	23,56
300-MCL-002	0,48	0,9796	0,9914	15,53	1276,09	1318,39	25,96
400-MCL-001	0,48	0,9626	0,9926	25,15	1585,38	1622,80	21,85
400-MCL-001a	0,48	0,9539	0,9776	22,46	1856,36	1895,30	20,59
500-MCL-001	0,48	0,9903	0,9946	9,39	2135,94	2155,04	13,4
500-SGM-001	23	0,9998	1,0001	2,48	582,74	582,96	2,77
500-SGM-001a	23	0,9998	1,0001	2,38	646,78	647,03	2,75
500-SGM-002	23	0,9992	0,9995	2,56	475,15	476,01	6,01
500-SGM-003	23	0,9986	0,9989	2,53	475,47	478,47	11,24
810-MCL-001	0,48	0,9503	1,0016	33,3	2263,78	2346,75	27,32
820-MCL-001	0,48	0,9427	0,9844	30,08	1116,56	1152,70	25,65
830-MCL-001	0,48	0,9389	0,9920	34,13	2294,27	2376,05	26,94

A diferencia de los resultados obtenidos en el primer caso, al implementar un banco de filtros pasivos en cada barra de rectificación, se logra reducir los niveles de armónicos de corriente y tensión en las barras correspondientes al punto de acople común (barras 500-SGM-001 y 500-SGM-001a). Con esto, se cumplen con los requerimientos técnicos exigidos en la norma IEEE 519.

Si bien los bancos de filtrado implementados permiten cumplir con las exigencias de acople al respectivo sistema eléctrico, en la Tabla G. 9, se puede apreciar que la gran mayoría de las barras de la planta, presenta niveles de armónicos de corriente y tensión bastante elevados. Este problema, podría conllevar a la aparición de anomalías en el funcionamiento de los dispositivos

de protección de alimentadores, elevación significativa en la temperatura de equipos, posibles interferencias en sistemas de comunicación, etc. Producto de lo anterior, se deberán implementar bancos de filtrado armónico en las barras alimentadoras restantes.

Caso 3: Área húmeda con filtrado armónico en barras de rectificación y barras alimentadoras

Con la finalidad de evitar problemas en los equipos y dispositivos de la planta, producto de la contaminación armónica en las barras alimentadoras, se procederá a agregar un banco de filtros pasivos en cada una de las siguientes barras: 300-MCL-001, 300-MCL-002, 400-MCL-001, 400-MCL-001a, 500-MCL-001, 810-MCL-001, 820-MCL-002 y 830-MCL-003.

En forma análoga al caso 2, la información detallada sobre el cálculo de los parámetros de los filtros, puede ser revisada en el Apéndice I.

Una vez ingresados los parámetros de los distintos filtros armónicos, se procedió a repetir las simulaciones efectuadas en los casos anteriores. En la Tabla G. 10 y la Tabla G. 11, se encuentran los resultados tras realizar esta tarea.

Tabla G. 10: Flujo de potencia de la componente fundamental para el caso 3

Barra	Tensión			Carga			
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	Ang. [°]	P [MW]	Q [MVar]	S [MVA]	F.P. [%]
300-MCL-001	0,48	0,9905	-32	1,022	0,103	1,027	99,50
300-MCL-002	0,48	0,9912	-31,8	0,947	0,098	0,952	99,47
400-MCL-001	0,48	0,9820	-33,2	1,158	0,132	1,165	99,36
400-MCL-001a	0,48	0,9774	-33,8	1,349	0,158	1,358	99,32
500-MCL-001	0,48	0,9903	-33	1,588	0,755	1,758	90,31
500-SGM-001	23	0,9998	0	22,752	3,248	22,983	99,00
500-SGM-001a	23	0,9998	0	25,083	3,625	25,344	98,97
500-SGM-002	23	0,9992	-0,1	18,733	2,606	18,913	99,05
500-SGM-003	23	0,9986	-0,1	18,733	2,613	18,914	99,04
810-MCL-001	0,48	0,9728	-33,6	1,651	0,143	1,657	99,63
820-MCL-001	0,48	0,9659	-33,6	0,804	0,070	0,807	99,62
830-MCL-001	0,48	0,9619	-33,7	1,653	0,154	1,660	99,57

Tabla G. 11: Información de armónicos del sistema para el caso 3

Barra	Tensión				Corriente		
	Nom. [kV]	Fund. [p.u.]	RMS [p.u.]	THD [%]	Fund. [A]	RMS [A]	THD [%]
300-MCL-001	0,48	0,9905	0,9912	3,84	1247,30	1249,37	5,77
300-MCL-002	0,48	0,9912	0,9920	4,12	1155,38	1158,31	7,13
400-MCL-001	0,48	0,9820	0,9831	4,76	1427,69	1428,71	3,79
400-MCL-001a	0,48	0,9774	0,9783	4,32	1671,09	1671,67	2,63
500-MCL-001	0,48	0,9903	1,0127	2,27	1920,69	1921,14	2,16
500-SGM-001	23	0,9998	1,0001	2,34	577,00	577,18	2,49
500-SGM-001a	23	0,9998	1,0001	2,22	636,29	636,44	2,17
500-SGM-002	23	0,9992	0,9995	2,43	475,14	475,40	3,27
500-SGM-003	23	0,9986	0,9989	2,4	475,46	475,76	3,55
810-MCL-001	0,48	0,9728	0,9742	5,39	2048,76	2050,06	3,56
820-MCL-001	0,48	0,9659	0,9671	4,98	1005,49	1005,99	3,16
830-MCL-001	0,48	0,9619	0,9633	5,4	2075,93	2077,18	3,47

Los resultados de las últimas simulaciones, mostrados en la Tabla G. 10 y la Tabla G. 11, revelan que al igual que en el caso 2, se cumplen con los requisitos, en el punto de acople común, necesarios para conectarse al respectivo sistema eléctrico [5]. Pero a diferencia del caso anterior, los niveles de contaminación armónica de todas las barras se redujeron significativamente (ver Tabla G. 11). Por consiguiente, el sistema además de cumplir la normativa vigente en las barras 500-SGM-001 y 500-SGM-001a, también ha alcanzado niveles seguros de operación en las barras alimentadoras y con esto, se estarían minimizando las probabilidades de fallas (por: resonancia, calentamiento, interferencia, vibración, etc.), en los equipos de la planta.

Análisis de resultados

Validación de resultados

Antes de proceder con el análisis propiamente tal, es necesario validar los resultados obtenidos en las respectivas simulaciones.

Como bien se sabe, se han realizado simulaciones con tres escenarios distintos. El primero, considerando únicamente los equipos de la planta. El segundo, aplicando filtros para la reducción de armónicos sólo en las barras de rectificación (500-SGM-002 y 500-SGM-003). Y el último, implementando filtros de armónicos en las barras alimentadoras: 300-MCL-001, 300-MCL-002, 400-MCL-001, 400-MCL-001a, 500-MCL-001, 810-MCL-001, 820-MCL-002 y 830-MCL-003.

Para el primer caso, los niveles de distorsión armónica, sobrepasan los respectivos límites en todas las barras de la planta y a su vez, son los más altos entre todos los escenarios. Lo anterior, era totalmente esperado, pues en la planta se encuentran operando: dos rectificadores de poder de 12 pulsos, que representan aproximadamente el 80% de la demanda total y un conjunto de variadores de frecuencia 6 pulsos. Todos, dispositivos conocidos por inyectar armónicos.

Por otro lado, si bien los niveles de armónicos sobrepasan los límites de operación de la norma IEEE 519, cabe destacar que estos no alcanzan valores anormales y son absolutamente concordantes con el funcionamiento normal de dispositivos de electrónica de potencia, que no utilizan algún método de reducción de armónicos [11].

En el segundo caso y al igual que en el primero, los resultados obtenidos eran íntegramente esperados. Luego de aplicar una solución para la reducción de armónicos, en las barras 500-SGM-002 y 500-SGM-003, los niveles de contaminación en el PCC disminuyeron por debajo de los límites exigidos en la normativa. Lo que es perfectamente entendible, pues como bien se ha mencionado, la demanda de las barras de rectificación representa casi el 80% de la demanda total, por lo tanto, es lógico que al reducir los niveles de armónicos en estas (por debajo de los límites de la norma), también disminuyan significativamente en las barras conectadas el resto del sistema eléctrico.

En forma análoga a los casos anteriores, es evidente que la implementación de filtros de armónicos en las demás barras alimentadoras: permitirá disminuir, aun más, los niveles de armónico en las barras 500-SGM-001 Y 500-SGM-001a.

Mitigación de armónicos en media tensión

Como se muestra en la Tabla G. 7, la operación de la planta sin filtrado armónico, no cumple con los requisitos de conexión al sistema eléctrico en el punto de acople común [5]. De manera que se hace imprescindible, la implementación de alguna técnica de mitigación de armónicos.

Como solución preliminar, se decidió conectar bancos de filtrado armónico de tipo pasivo en las barras de rectificación (500-SGM-002 y 500-SGM-003). Con esto, la operación de la planta cumple con todos los requerimientos impuestos en la normativa vigente (Tabla G. 9).

Al observar la Tabla 2.21, se aprecia que el proceso de electro-obtención propiamente tal, representa aproximadamente el 76% de la carga total del área húmeda¹³ y por ende, las armónicas aportadas por los demás procesos no influyen mayormente en las armónicas del punto de acople común. Lo que justifica el que: conectando filtros únicamente en las barras de rectificación, ya se está cumpliendo con la norma IEEE 519.

Mitigación de armónicos en baja tensión

En la Tabla G. 9, es posible apreciar que luego de filtrar armónicos en las barras de rectificación (MT), la planta puede ser conectada al respectivo sistema eléctrico (cumpliendo con los requisitos referentes a contaminación armónica). Pero también puede observarse que en las demás barras alimentadoras (BT), los índices de distorsión armónica: THD_v y THD_I , pueden llegar a alcanzar valores incluso mayores al 30% y 25% respectivamente. Lo que hizo necesario, la utilización de alguna técnica que permita reducir los niveles de armónicos. Esto, con el fin de garantizar la seguridad y calidad en el suministro eléctrico de la planta, evitando problemas de calentamiento de equipos y máquinas, protección, interferencia en dispositivos de comunicación, etc.

¹³ Este valor es considerando solo las cargas conectadas a las barras de media tensión. Al considerar las cargas de media y baja tensión, el proceso de electro-obtención representa aproximadamente el 80% de la carga total

Para cumplir con lo planteado en el párrafo anterior, se agregaron bancos de filtrado armónico pasivos en las barras alimentadoras restantes (300-MCL-001, 300-MCL-002, 400-MCL-001, 400-MCL-001a, 500-MCL-001, 810-MCL-001, 820-MCL-002 y 830-MCL-003). De esta forma, se obtuvieron índices de distorsión armónica menores al 5%, salvo en algunos casos en que fueron levemente mayores (ver Tabla G. 11). Con esto, se asegura una calidad de suministro eléctrico en la planta, que es concordante con las recomendaciones establecidas en la norma respectiva.

Las simulaciones realizadas, se hicieron utilizando filtros pasivos y asumiendo que el funcionamiento de las cargas era constante, lo que permitió demostrar la necesidad de llevar a cabo algún filtrado armónico a este nivel de tensión. Ahora bien, a diferencia de la operación del proceso de electro-obtención, estas cargas no necesariamente funcionan en forma constante. De manera que en este caso, la implementación de bancos de filtrado pasivo podría conllevar a un fenómeno de “sobre-compensación”¹⁴.

Para dar solución al problema recién planteado, se propone la implementación de filtros activos o filtros híbridos, que si bien puede ser una alternativa más costosa, evitarían un posible sobredimensionamiento de los filtros cuando algunos sectores operen con menos carga. De todos modos, idealmente se deberían definir o estudiar las cargas que podrían no operar en forma constante, para que solo estas fueran filtradas en forma activa o híbrida, pues un filtro activo puede ser hasta dos o tres veces más costos que uno pasivo [10][11].

¹⁴ En este caso, la “sobre-compensación” podría ser a nivel de equipo, o bien, a nivel de alguna barra alimentadora, pero no implica necesariamente que toda la planta quede “sobre-compensada”. De todos modos, una pérdida de carga de consideración: podría implicar una “sobre-tensión”, no despreciable, en la barra alimentadora involucrada

Apéndice H: Librería de motores en el programa ETAP

Tabla H.1: Librería de motores en programa ETAP

HP	Vnom [kV]	fnom [Hz]	Frame Size	Design Letter	Poles	Syn speed [r.p.m.]	S [kVA]	Phase	Service Factor	LRC [% of FLC]	FLC [A]	PF _{lr} [%]	PF			Eff		
													50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,5	0,48	60	Other	A	4	1800	0,61	3	1	600	0,738	81,48	80,21	80,21	80,21	75,72	75,72	75,72
0,75	0,48	60	Other	A	4	1800	0,91	3	1	600	1,09	79,68	80,63	80,63	80,63	76,34	76,34	76,34
1	0,48	60	Other	A	4	1800	1,2	3	1	600	1,4	77,88	81,04	81,04	81,04	76,96	76,96	76,96
1,5	0,48	60	Other	A	4	1800	1,7	3	1	600	2,1	74,29	81,87	81,87	81,87	78,21	78,21	78,21
2	0,48	60	Other	A	4	1800	2,27	3	1	600	2,7	70,69	82,7	82,7	82,7	79,45	79,45	79,45
3	0,48	60	Other	A	4	1800	3,3	3	1	600	4	66,48	83,67	83,67	83,67	80,91	80,91	80,91
4	0,48	60	Other	A	4	1800	4,32	3	1	600	5,2	63,49	84,35	84,35	84,35	81,94	81,94	81,94
5	0,48	60	Other	A	4	1800	5,31	3	1	600	6,4	61,18	84,89	84,89	84,89	82,75	82,75	82,75
7,5	0,48	60	Other	A	4	1800	7,74	3	1	600	9,3	56,97	85,86	85,86	85,86	84,2	84,2	84,2
10	0,48	60	Other	A	4	1800	10,11	3	1	600	12,2	54	86,54	86,54	86,54	85,24	85,24	85,24
15	0,48	60	Other	A	4	1800	14,74	3	1	600	17,7	49,77	87,51	87,51	87,51	86,7	86,7	86,7
20	0,48	60	Other	A	4	1800	19,27	3	1	600	23,2	46,78	88,2	88,2	88,2	87,73	87,73	87,73
25	0,48	60	Other	A	4	1800	23,73	3	1	600	28,5	44,47	88,73	88,73	88,73	88,53	88,53	88,53
30	0,48	60	Other	A	4	1800	28,13	3	1	600	33,8	42,57	89,17	89,17	89,17	89,19	89,19	89,19
35	0,48	60	Other	A	4	1800	32,48	3	1	600	39,1	40,97	89,53	89,53	89,53	89,74	89,74	89,74
40	0,48	60	Other	A	4	1800	36,79	3	1	600	44,3	39,59	89,85	89,85	89,85	90,22	90,22	90,22
45	0,48	60	Other	A	4	1800	41,07	3	1	600	49,4	38,36	90,13	90,13	90,13	90,64	90,64	90,64
50	0,48	60	Other	A	4	1800	45,32	3	1	600	54,5	37,27	90,39	90,39	90,39	91,02	91,02	91,02
60	0,48	60	Other	A	4	1800	53,74	3	1	600	64,6	35,38	90,82	90,82	90,82	91,68	91,68	91,68
75	0,48	60	Other	A	4	1800	66,2	3	1	600	79,6	33,06	91,35	91,35	91,35	92,48	92,48	92,48
80	0,48	60	Other	A	4	1800	70,32	3	1	600	84,6	32,39	91,51	91,51	91,51	92,71	92,71	92,71
100	0,48	60	Other	A	4	1800	86,64	3	1	600	104,2	30,07	92,04	92,04	92,04	93,52	93,52	93,52
125	0,48	60	Other	A	4	1800	110,12	3	1	600	132,4	27,73	91,51	91,51	91,51	92,5	92,5	92,5
150	0,48	60	Other	A	4	1800	131,89	3	1	600	158,6	26,37	91,59	91,59	91,59	92,6	92,6	92,6
175	0,48	60	Other	A	4	1800	153,64	3	1	600	184,8	25,26	91,65	91,65	91,65	92,68	92,68	92,68
200	0,48	60	Other	A	4	1800	175,35	3	1	600	210,9	24,35	91,71	91,71	91,71	92,75	92,75	92,75
225	0,48	60	Other	A	4	1800	197,03	3	1	600	237	23,56	91,75	91,75	91,75	92,81	92,81	92,81
250	0,48	60	Other	A	4	1800	218,69	3	1	600	263	22,89	91,8	91,8	91,8	92,86	92,86	92,86
300	0,48	60	Other	A	4	1800	261,95	3	1	600	315,1	21,76	91,87	91,87	91,87	92,96	92,96	92,96
500	0,48	60	Other	A	4	1800	433	3	1	600	521,3	17,24	92,15	92,15	92,15	93,36	93,36	93,36

Apéndice I: Detalle del cálculo de los respectivos filtros armónicos

Información en detalle sobre el diseño de filtros armónicos pasivos aparece perfectamente descrita en mucha bibliografía. Por lo que a continuación, solo se detallará en forma resumida, el procedimiento efectuado para el cálculo de los parámetros de cada banco de filtros.

A modo de resumen, los pasos para sintonizar un banco de filtros armónicos son los que se muestran a continuación [6]:

1. Calcular el valor de la capacitancia requerida para corregir el factor de potencia y así eliminar cualquier penalización por parte de la empresa distribuidora
2. Escoger un reactor que permite sintonizar la capacitancia en serie, a la frecuencia armónica deseada
3. Calcular el voltaje máximo aplicado en los terminales de los capacitores y la corriente rms de cada reactor
4. Escoger componentes estándar para el filtro y verificar que estos operarán cumpliendo con los límites de la norma IEEE 18 [7]

Las recomendaciones anteriores, podrían requerir varias iteraciones para encontrar los valores adecuados de cada filtro que se desea diseñar. Para el caso particular de esta memoria, el filtro se implementará únicamente en el software ETAP, donde no se realizarán simulaciones de cortocircuito, calentamiento, etc., por lo que solo se considerarán los primeros dos pasos mencionados recientemente.

Conociendo el factor de potencia actual, de la barra donde se desea agregar el filtro, la compensación capacitiva puede ser calculada como:

$$\Delta Q = |S \cdot \frac{FP_a}{FP_d} \cdot \sin(\arccos(FP_d)) - S \cdot \sin(\arccos(FP_a))|$$

Donde FP_a corresponde al factor de potencia actual en “por unidad” y FP_d al factor de potencia deseado en “por unidad”.

La siguiente tabla, muestra los valores calculados de compensación capacitiva, para cada una de las barras alimentadoras.

Tabla I. 1: Cálculo compensación capacitiva de barras alimentadoras

Barra	Valor Actual		Valor deseado	Compensación capacitiva
	S [MVA]	F.P. [%]	F.P. [%]	[MVar]
500-SGM-002	21,426	87,34	97,5	6,171
500-SGM-003	21,428	87,33	97,5	6,174
300-MCL-001	1,123	90,69	98,5	0,295
300-MCL-002	1,039	90,86	98,5	0,269
400-MCL-001	1,268	91,21	98,5	0,317
400-MCL-001a	1,472	90,76	98,5	0,384
500-MCL-001	1,758	90,31	98,5	0,477
810-MCL-001	1,788	92,09	99	0,462
820-MCL-001	0,875	91,55	99	0,238
830-MCL-001	1,791	92,09	99	0,463

Una vez que se conoce el total de la compensación requerida en cada barra, se calcula el valor de la compensación que se le asignará a cada armónica. Para ello, se emplearon los siguientes ponderadores:

Tabla I. 2: Ponderadores según orden de la armónica

Orden	Ponderador
5	0,351
7	0,251
11	0,160
13	0,135
17	0,351

En la Tabla I. 2, se puede observar que la suma de los ponderadores es mayor a la unidad. De todos modos, esto no invalida el procedimiento, pues la compensación capacitiva que se obtiene no traspasa el factor de potencia de inductivo a capacitivo. Además, cabe mencionar que el filtro de la armónica 17 será de tipo “pasa-alto”, lo que justifica la utilización de su respectivo ponderador.

Conociendo el valor, de la compensación capacitiva asignada a cada orden de armónica, se procede a calcular los reactores que permitan sintonizar cada uno de los filtros. Para ello, se parte escogiendo las respectivas frecuencias de sintonización, las que se recomiendan que se encuentren levemente desplazadas de la frecuencia armónica que se desea filtrar, para evitar que el filtro entre en resonancia. Luego, el valor de los respectivos reactores puede ser calculado de la siguiente manera:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} = \frac{(V_{nom}^2 / Q_{ch})}{h^2} = \frac{(V_{nom}^2 / (P_h \cdot \Delta Q))}{h_s^2}$$

Donde P_h corresponde al ponderador según el orden armónico (ver Tabla I. 2) y h_s corresponde a la sintonización deseada para el filtro, por ejemplo: 5.1, 7.1, 11.1, etc.

Finalmente, se debe escoger el valor de R (cuando corresponda), el cual se calcula escogiendo un valor de Q y empleando la siguiente relación:

$$R = Q \cdot X_{C1}$$

Según la literatura, para filtros sintonizados, Q toma valores entre 15 y 80, mientras que en filtros pasa-altos, toma valores entre 0,5 y 2 [6].

Las tablas que se muestran a continuación, muestran los parámetros para cada filtro dentro de los respectivos bancos (según el orden en que fueron calculados).

Tabla I. 3: Parámetros filtro armónico barra 500-SGM-002

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	23	2,167	244,12	10,87	9,5722	25,391	30	0
7	7,1	Single tuned	23	1,548	341,73	7,76	6,8755	18,238	30	0
11	11,1	Single tuned	23	0,985	537,06	4,94	4,3984	11,667	30	0
13	13,1	Single tuned	23	0,834	634,29	4,18	3,7245	9,880	30	0
17	16,6	High-pass damped	23	2,167	244,12	10,87	0,8859	2,350	0,5	122,06

Tabla I. 4: Parámetros filtro armónico barra 500-SGM-003

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	23	2,168	244,00	10,87	9,5678	25,379	30	0
7	7,1	Single tuned	23	1,549	341,51	7,77	6,8711	18,226	30	0
11	11,1	Single tuned	23	0,986	536,51	4,94	4,3939	11,655	30	0
13	13,1	Single tuned	23	0,834	634,29	4,18	3,7245	9,880	30	0
17	16,6	High-pass damped	23	2,168	244,00	10,87	0,8855	2,349	0,5	122,00

Tabla I. 5: Parámetros filtro armónico barra 300-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,104	2,22	1197,35	0,0869	0,230	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,074	3,11	851,96	0,0626	0,166	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,047	4,90	541,11	0,0401	0,106	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,040	5,76	460,52	0,0338	0,090	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,104	2,22	1197,35	0,0080	0,021	0,5	1,11

Tabla I. 6: Parámetros filtro armónico barra 300-MCL-002

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,094	2,45	1082,22	0,0961	0,255	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,067	3,44	771,37	0,0692	0,184	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,043	5,36	495,06	0,0439	0,116	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,036	6,40	414,47	0,0376	0,100	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,094	2,45	1082,22	0,0089	0,024	0,5	1,23

Tabla I. 7: Parámetros filtro armónico barra 400-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,111	2,08	1277,94	0,0814	0,216	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,080	2,88	921,04	0,0579	0,154	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,051	4,52	587,16	0,0370	0,098	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,043	5,36	495,06	0,0315	0,083	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,111	2,08	1277,94	0,0075	0,020	0,5	1,04

Tabla I. 8: Parámetros filtro armónico barra 400-MCL-001a

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,135	1,71	1554,25	0,0669	0,178	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,096	2,40	1105,24	0,0483	0,128	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,061	3,78	702,29	0,0309	0,082	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,052	4,43	598,67	0,0260	0,069	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,135	1,71	1554,25	0,0062	0,016	0,5	0,85

Tabla I. 9: Parámetros filtro armónico barra 500-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,168	1,37	1934,17	0,0538	0,143	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,120	1,92	1381,55	0,0386	0,102	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,076	3,03	874,98	0,0248	0,066	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,064	3,60	736,83	0,0211	0,056	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,168	1,37	1934,17	0,0050	0,013	0,5	0,69

Tabla I. 10: Parámetros filtro armónico barra 810-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,162	1,42	1865,10	0,0558	0,148	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,116	1,99	1335,50	0,0400	0,106	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,074	3,11	851,96	0,0255	0,068	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,062	3,72	713,80	0,0218	0,058	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,162	1,42	1865,10	0,0052	0,014	0,5	0,71

Tabla I. 11: Parámetros filtro armónico barra 820-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,084	2,74	967,09	0,1076	0,285	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,060	3,84	690,78	0,0773	0,205	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,038	6,06	437,49	0,0497	0,132	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,032	7,20	368,41	0,0423	0,112	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,084	2,74	967,09	0,0100	0,026	0,5	1,37

Tabla I. 12: Parámetros filtro armónico barra 830-MCL-001

Orden	Sintonización	Tipo	Vnom [kV]	Qch [MVar]	XC1 [Ohm]	C [uF]	XL1 [Ohm]	L [mH]	Q	R [Ohm]
5	5,1	Single tuned	0,48	0,163	1,41	1876,61	0,0554	0,147	30	0
7	7,1	Single tuned	0,48	0,116	1,99	1335,50	0,0400	0,106	30	0
11	11,1	Single tuned	0,48	0,074	3,11	851,96	0,0255	0,068	30	0
13	13,1	Single tuned	0,48	0,063	3,66	725,32	0,0215	0,057	30	0
17	16,6	High-pass damped	0,48	0,163	1,41	1876,61	0,0051	0,014	0,5	0,71