

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RECTIFICADORES DE
POTENCIA PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE UNA
PLANTA DE REFINERIA DE COBRE”**

INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTADO POR

JOSE LUIS HUANAY PALOMINO

PROMOCION 2004-I

LIMA-PERU

2010

Agradecer a mis padres por darme esta profesión en especial a mi madre Valeria que es un ejemplo de mujer, a Dios que siempre está ahí guiando mis pasos, y a la familia Ramos Castillo que estuvieron apoyándome en los momentos más difíciles.

CONTENIDO

PRÓLOGO	1
CAPITULO I	3
Introducción	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	4
1.3 Planteamiento del Problema	4
1.4 Objetivo	5
1.5 Metodología del Trabajo	5
1.6 Alcances	6
1.7 Limitaciones	6
CAPITULO II	8
El Proceso de Refinación del Cobre	8
2.1 Refinación a Fuego	8
2.1.1 El Proceso	9
2.2 Refinación Electrolítica	10
2.2.1 La Electrolisis	11
2.2.2 Cosecha de Cátodos	12

CAPITULO III	14
Fundamento Teórico	14
3.1 Requerimientos de grandes Corrientes	14
3.2 Configuraciones de Rectificadores	15
3.2.1 El Rectificador Trifásico puente de 6 pulsos con Transformador Estrella-Estrella	15
3.2.2 El Rectificador Trifásico puente de 6 pulsos con Transformador Delta-Estrella	16
3.3 Armónicas en Rectificadores	17
3.3.1 El Rectificador puente monofásico	17
3.3.2 El Rectificador de 6 pulsos	18
3.4 Normas de Armónicas	19
3.5 Uso de Filtros de Armónicas	22
3.5.1 Tipos de Filtro	23
3.5.2 Aplicación de Filtros	25
3.6 Semiconductores de Alta Corriente	26
3.6.1 El Tiristor	26
3.6.2 Diodo Rectificador	28
3.7 Protecciones de Semiconductores	29
3.7.1 Protección de Sobrevoltaje	29
3.7.2 Protección de Sobrecorriente	32
3.8 Aplicaciones	33
3.8.1 Obtención Electrolítica del Cobre	33
3.9 Refrigeración	35

III

3.10 Transformadores	38
3.11 Protección de Instalaciones con Rectificadores	41
CAPITULO IV	43
Diseño de los Rectificadores	43
4.1 Diagrama Unifilar	44
4.2 Estudio de Flujo de Potencia, Análisis de Cortocircuito y Coordinaciones	45
4.2.1 Estudio de Flujo de Potencia y Análisis de Cortocircuito	45
4.2.2 Estudio de Coordinación de Protecciones	49
4.3 Estudio de Armónicas, Resonancia y Evaluación de Filtros	54
4.3.1 Introducción	54
4.3.2 Metodología de Análisis-Modelo Unifilar ETAP	56
4.3.3 Alcances del Estudio	58
4.3.4 Escenarios	59
4.3.5 Estándares	60
4.3.6 Resultados de los Cálculos	66
4.3.7 Armónicos	75
4.3.8 Conclusiones y Recomendaciones	89
4.4 Arquitectura de Control	92
4.4.1 Área de Subestación Eléctrica	93
4.4.2 Área de Rectificadores	96
CAPITULO V	99
Implementación de los Rectificadores	99

5.1	El Circuit Switcher	99
5.1.1	Características Técnicas	102
5.1.2	Partes del Seccionador	102
5.1.3	Funcionamiento de Apertura	106
5.1.4	Funcionamiento de Cierre	108
5.2	El Transformador de Potencia	111
5.2.1	Características Técnicas	111
5.2.2	Protecciones	111
5.3	El Switchgear	119
5.3.1	Características Técnicas	119
5.3.2	Descripción y Operación	120
5.3.3	Unidad del Interruptor	122
5.3.4	Mecanismo para Almacenar Energía	130
5.4	El Rectificador de Potencia	135
5.4.1	Características Técnicas	135
5.4.2	Características Generales	136
5.4.3	Tiristor del Rectificador	137
5.4.4	Panel de Control	139
5.4.5	Sistema de Regulación	140
5.4.6	Protecciones del Rectificador	142
CAPITULO VI		146
Propuesta Económica		146
6.1	Lista de Equipos	146

6.2	Cronograma de la Implementación	147
6.3	Organigrama	147
6.4	Costos Estimados	148
6.4.1	Costos del Proyecto	148
	CONCLUSIONES	149
	BIBLIOGRAFIA	151
	APÉNDICE	152

PROLOGO

El presente informe consta de seis capítulos, a través de los cuales se describe el análisis que se debe de realizar cuando se ingresa una potencia considerable al sistema, como también la implementación de la arquitectura de control.

En el primer capítulo se realiza una descripción acerca de los antecedentes, la justificación, el planteamiento del problema, el objetivo principal, la metodología del trabajo, los alcances y limitaciones que se presentaron para realizar el proyecto.

En el segundo capítulo, se explica el proceso de refinación del cobre, indicando el proceso de electro refinación donde se indica el tiempo que tarda un ánodo en convertirse en cátodo de cobre al 99,999% de pureza.

En el tercer capítulo, se menciona las diferentes configuraciones de los rectificadores indicando en el tiempo costos, perdidas, eficiencia y las características de sus diversos componentes. Así como también se describe los tipos de filtros utilizados en la industria para disminuir el problema de armónicos y las protecciones que se requiere para su instalación.

En el cuarto capítulo, empezaremos con el diseño de los rectificadores realizando un estudio de coordinación de protecciones, armónicas, resonancia, evaluación de filtros y analizando su implementación. Así como también el diseño de la arquitectura de control que involucra los distintos componentes eléctricos que van ser monitoreados y controlados desde la sala de control.

En el quinto capítulo, se desarrolla la implementación de los rectificadores de potencia detallando las características de cada equipo, como también los componentes de la arquitectura para el control de los rectificadores.

En el sexto capítulo, se realiza el costo estimado del proyecto para la implementación de los nuevos rectificadores de potencia.

Para finalizar, se dará las conclusiones del informe de ingeniería. En los anexos, adjuntaremos el diagrama unifilar y la arquitectura de control diseñado para implementar el proyecto.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Este proyecto se ejecuta en una empresa Minera productora de cobre y otros sub-productos que procesa y refina sus minerales en la planta de Refinería, que tiene una capacidad actualmente de 283,000 TM de cátodos de cobre de alta pureza. El Rectificador Westinghouse de 2x15 KA es uno de los principales equipos de Refinería que incide directamente en la producción de cátodos de cobre y fue adquirido durante el Proyecto de Ampliación de la Refinería de Cobre a 248,000 TM., en el año 1996.

Este equipo inició su operación con una corriente de 23 KA y en la actualidad la producción de la Refinería, ha ido incrementando su carga hasta un valor actual de 29.2KA y una capacidad de producción mayor a 283,000 TM, esta carga es asumida en su totalidad por el rectificador Westinghouse de 2x15KA, el cual se encuentra trabajando al límite de la carga nominal de diseño. Además hasta la fecha se han presentado fallas eléctricas en uno de los transformadores de potencia que alimenta al rectificador de 2x15KA, en dicho transformador se

quemaron en 02 ocasiones las bobinas internas, las mismas que han sido reparadas también en 02 oportunidades, provocando paradas inesperadas con pérdida de producción. La reparación mayor de estos transformadores tiene un tiempo aproximado de 06 a 08 meses y para poder mantener la producción, entra a trabajar el rectificador de 1x21KA, que tiene una antigüedad de más de 30 años. Entonces, lo que se requiere es instalar estos nuevos rectificadores de 2x20KA y 1x25 kA para poder cubrir la producción de cátodos de cobre.

1.2 Justificación

Mantener la producción de cátodos de cobre y poder optimizar el proceso, esto se adiciona el actual incremento del precio de los metales que requiere que en el futuro poder realizar una ampliación incrementando la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de los equipos.

1.3 Planteamiento del Problema

Instalar rectificadores de potencia de última tecnología para no ver afectada la producción de la refinería y mejora del sistema de eléctrico, teniendo un sistema de control automático supervisado desde la sala de control.

1.4 Objetivo

Implementar nuevos rectificadores con tecnología de tiristores, para cubrir los requerimientos actuales de producción con la finalidad de no ver comprometida la producción de cátodos de cobre.

1.5 Metodología del Trabajo

La alimentación eléctrica a la Refinería de Cobre, se efectúa desde la subestación eléctrica principal, cuenta con 02 transformadores de potencia de 15 y 22.4 MVA, respectivamente. Para el desarrollo de la instalación de 02 nuevos rectificadores, se está proyectando cambiar el transformador de 15MVA, por uno de 42MVA, en 138/10.5 KV. Para instalar estos 02 nuevos rectificadores, es necesario evaluar el impacto que ocasionará en el sistema eléctrico de Refinería, la operación de dichos rectificadores de Potencia, ya que actualmente también disponemos de Rectificadores de potencia en operación.

Con tal motivo requerimos realizar un estudio de armónicos, fenómenos de resonancia, compensación de energía reactiva, coordinaciones de tal manera que se defina la mejor alternativa de operación, implementación de filtros, condensadores, etc., con la finalidad de no tener disturbios y anomalías en nuestro sistema eléctrico.

1.6 Alcances

El presente trabajo contempla el cambio de los dos rectificadores de la planta electrolítica de la Refinería el rectificador Fuji 1X12KA y rectificador Westinghouse 2X15 KA y sus respectivos transformadores, por dos nuevos Rectificadores 1X25 KA y 2X20 KA con sus respectivos transformadores. Adicionalmente se ampliará y modificará la subestación de la Refinería existente mediante el reemplazo del transformador Fuji de 15 MVA por un transformador Toshiba de 42 MVA, lo que hará necesario remodelar toda esa zona de la subestación, También se modificarán todos los equipos auxiliares del transformador como Switchgear y otros, así como los cables, barras de cobre y demás complementos para lograr la operatividad del sistema.

El trabajo en la zona de los nuevos rectificadores de potencia así como en la subestación es de bastante cuidado dado que ambos equipos comprometen directamente la producción de la Refinería, una falla puede dejar sin operación a la Refinería por un tiempo importante; asimismo la seguridad durante la etapa de construcción es muy importante por los peligros eléctricos existentes ya que se ejecutaran trabajos junto a equipos de alta tensión energizados.

1.7 Limitaciones

La información necesaria para la implementación es confidencial por ser políticas de la empresa.

Para la ejecución de los trabajos se requiere que el personal técnico tenga experiencia en obras eléctricas y alta tensión.

El atraso del tiempo de entrega de equipos afecta el cronograma de la construcción.

CAPÍTULO II

EL PROCESO DE REFINACIÓN DEL COBRE

La Refinación es una etapa que consiste básicamente en la purificación de un material impuro, en este caso, un metal. Se distingue de los otros procesos, como por ejemplo la fundición y calcinación, en que esos dos implican un cambio químico de la materia prima, mientras que en la refinación, el material resultante es químicamente idéntico al original, sólo que más puro. Los procesos utilizados durante la refinación son de muchos tipos, incluyendo técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas.

2.1 Refinación a Fuego

Uno de los procesos más antiguos para la refinación del metal es el acendrado. El producto inicial del cobre de fundición era un cobre negro e impuro, que era entonces derretido en varias ocasiones para purificarlo, oxidándolo alternadamente y reduciéndolo. En una de las etapas de fundición, se le agregaba plomo. El oro y la plata son preferentemente disueltas en este proceso, abasteciendo así de medios para poder recuperar aquellos metales preciosos. Para poder producir un cobre más puro y propicio para fabricar

placas de cobre o recipientes de cocina, fueron emprendidos procesos de fundición más efectivos utilizando el carbón de leña como combustible. La aplicación constante y repetitiva de tales procesos de acendrado permitió producir un 99.25% de cobre puro.

2.1.1 El Proceso

La refinación a fuego, por ejemplo del cobre blíster, puede ser parcial o total. En la refinación parcial, se elimina el azufre mediante una oxidación controlada para generar SO_2 , y el oxígeno se elimina mediante la reducción por la inyección de un reductor gaseoso, generando CO_2 . El producto es un cobre que se moldea en forma de ánodos y se envía a una refinería electrolítica donde se obtendrá finalmente un cátodo de cobre.

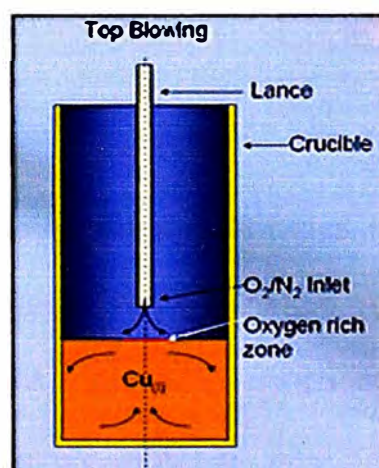


Figura 2.1. Oxidación del Cobre

y entonces las distintas empresas que compren estos minerales refinados le darán el uso que estimen conveniente. Chile es uno de los principales productores y refinadores de cobre en el mundo, pero lamentablemente no manufactura sus recursos y el mismo cobre que exportamos y tratamos, lo compramos a empresas extranjeras en forma de productos.



Figura 2.2. Proceso de Electrorefinación

2.2.1 La Electrólisis

Este proceso de electrorefinación se basa en las características y beneficios que ofrece el fenómeno químico de la electrólisis, que permite refinar el cobre anódico (ánodo) mediante la aplicación de la corriente eléctrica, obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza.

La electrorefinación se realiza en celdas electrolíticas, donde se colocan en forma alternada un ánodo (que es una plancha de cobre obtenido de la fundición), y un cátodo, (que es una plancha muy delgada de cobre puro), hasta completar 30 ánodos y 31 cátodos en cada celda.

La electrólisis consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por una solución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso es continuo durante 20 días. El día 10, se extraen los cátodos y se reemplazan por otros y los ánodos se dejan 10 días más y se reemplazan por otros. De esta forma, al final del día 20, nuevamente se extraen los cátodos y se renuevan los ánodos. Los otros componentes del ánodo que no se disuelven, se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas, formando lo que se conoce como barro anódico el cual es bombeado y almacenado para extraerle su contenido metálico (oro, plata, selenio, platino y paladio).

2.2.2 Cosecha de Cátodos

El objetivo aquí es obtener cuidadosamente los cátodos y asegurar su calidad para el despacho. Una vez terminado el proceso de refinación del cobre por electrólisis, cada 10 días los cátodos son sacados de las

celdas y se examinan cuidadosamente para asegurar la calidad, descartándose todos aquellos que tengan algún defecto.

Los cátodos seleccionados son pesados y embalados para su posterior despacho.

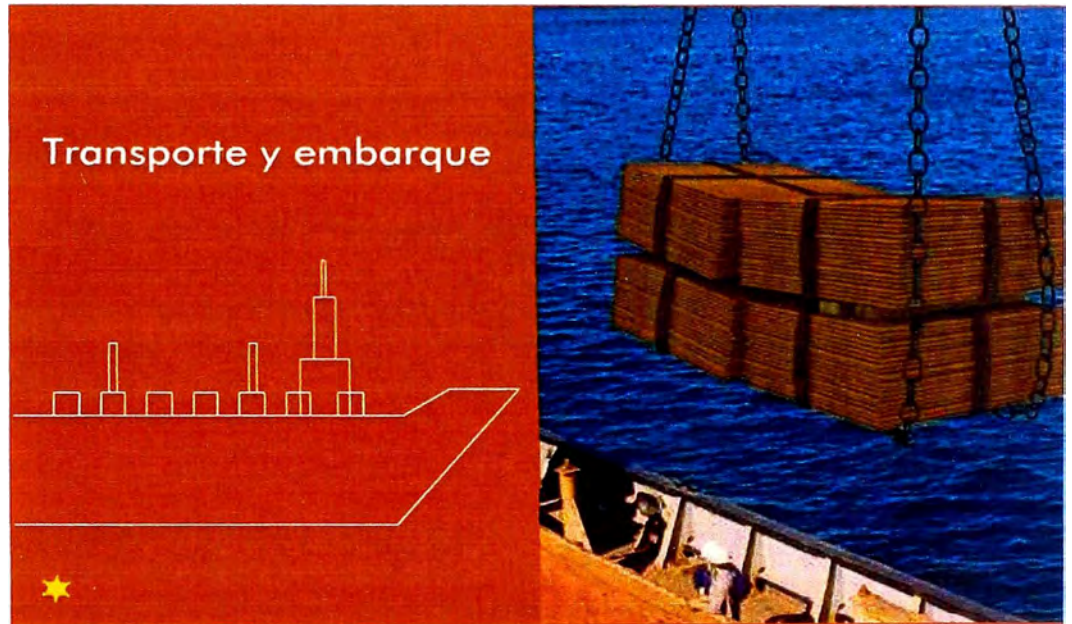


Figura 2.3. Transporte y Embarque de los Cátodos

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO TEORICO

A continuación se describirá los conceptos de los diferentes configuraciones de rectificadores, tipos de filtros y las normas que requieren los armónicos.

3.1 Requerimiento de grandes Corrientes

Industry	Product	DC current range	DC voltage range
A) Metals	Aluminium electrolysis	70 – 300 kA	500 – 1300 V
	Copper electrolysis	10 – 40 kA	160 – 200 V
	Zinc electrolysis	20 – 80 kA	300 – 700 V
	Magnesium electrolysis	100 – 120 kA	300 – 600 V
	Nickel electrolysis	15 – 30 kA	100 – 600 V
	Lead electrolysis	4 – 6 kA	50 – 150 V
	Manganese electrolysis	30 – 40 kA	150 – 200 V
B) Chemicals	Chlorine electrolysis		
	- Monopolar membrane cells	50 – 250 kA	100 – 900 V
	- Bipolar membrane cells	5 – 12 kA	300 – 450 V
	Hydrogen electrolysis	3 – 20 kA	140 – 900 V
	Hydrochlorid acid	5 – 15 kA	400 – 700 V
Hypochlorite	3 – 6 kA	100 – 200 V	
C) Speciality	Graphitization plants	20 – 140 kA	160 – 300 V
	Reduction furnaces	120 kA	350 V
	for carbide, phosphorus, silicon carbide, ferromanganese, etc.		

Tabla 3.1. Altas corrientes en diferentes procesos industriales

3.2 Configuraciones de Rectificadores

3.2.1 El Rectificador Trifásico puente de 6 pulsos con Transformador Estrella-Estrella

La figura 3.1 muestra el circuito de potencia del rectificador puente trifásico totalmente controlado, el que emplea 6 tiristores. Este convertidor es conocido también bajo el nombre de rectificador de 6 pulsos, porque el voltaje que genera en la carga contiene 6 pulsos en un periodo de la tensión de la red.

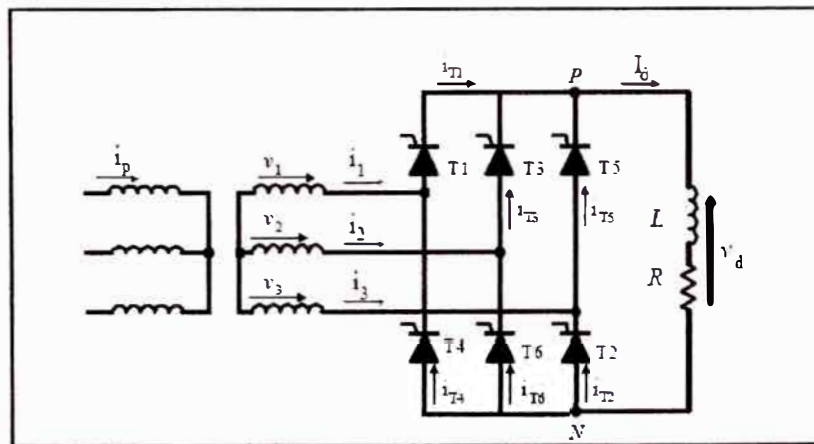


Figura 3.1. Circuito Básico Estrella-Estrella

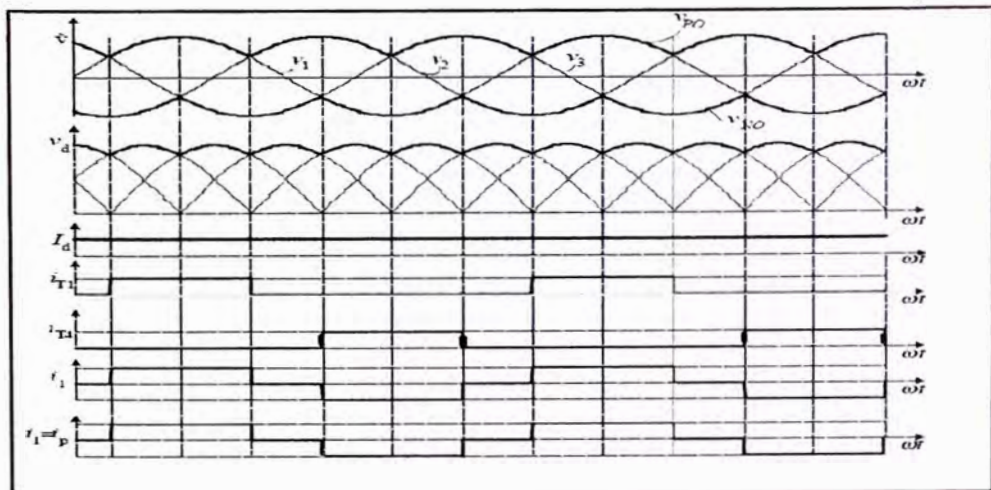


Figura 3.2. Formas de Onda Estrella-Estrella

3.2.2 El Rectificador Trifásico puente de 6 pulsos con Transformador

Delta-Estrella

La figura 3.3 muestra al rectificador puente trifásico alimentado por un transformador con conexión estrella en el secundario y conexión triángulo en el primario.

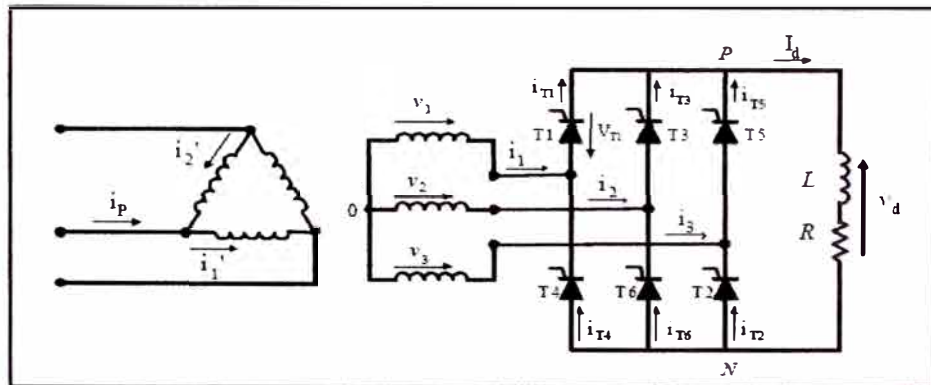


Figura 3.3. Circuito Básico Delta-Estrella

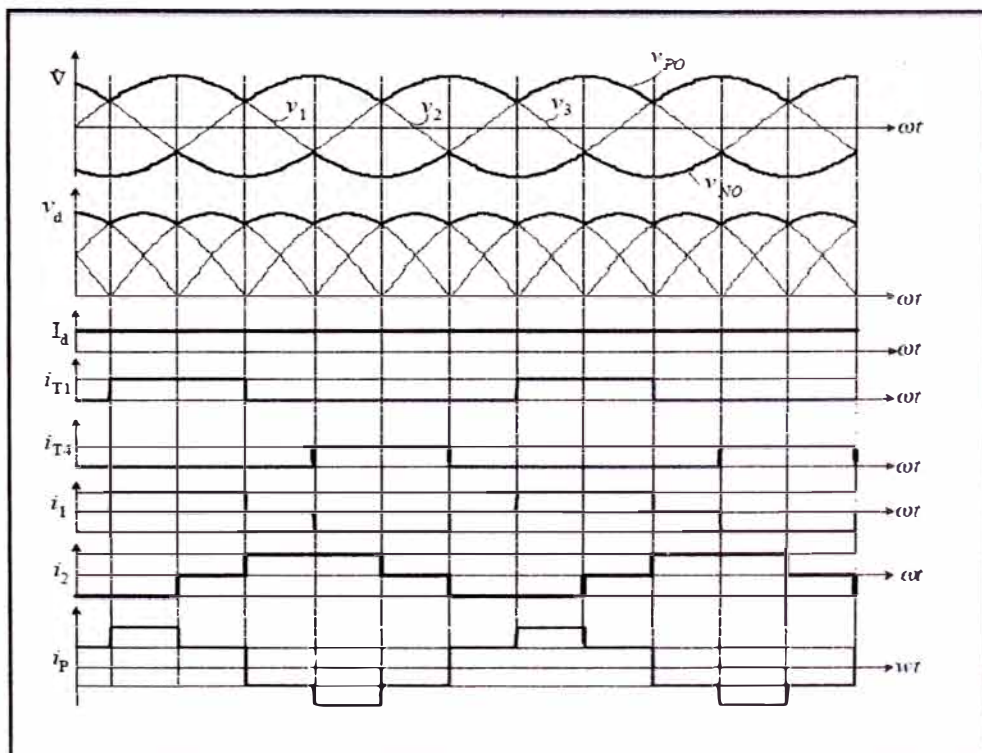


Figura 3.4. Formas de Onda Delta-Estrella

3.3 Armónicas en Rectificadores

3.3.1 El rectificador puente monofásico

Este rectificador emplea cuatro diodos y por esa razón no tiene la capacidad de controlar el flujo de energía desde la carga hacia la red.

Las corrientes armónicas inyectadas por el rectificador puente monofásico con corriente perfectamente filtrada en la carga son:

$$i_s(t) = I_d \frac{4}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t \dots \right]$$

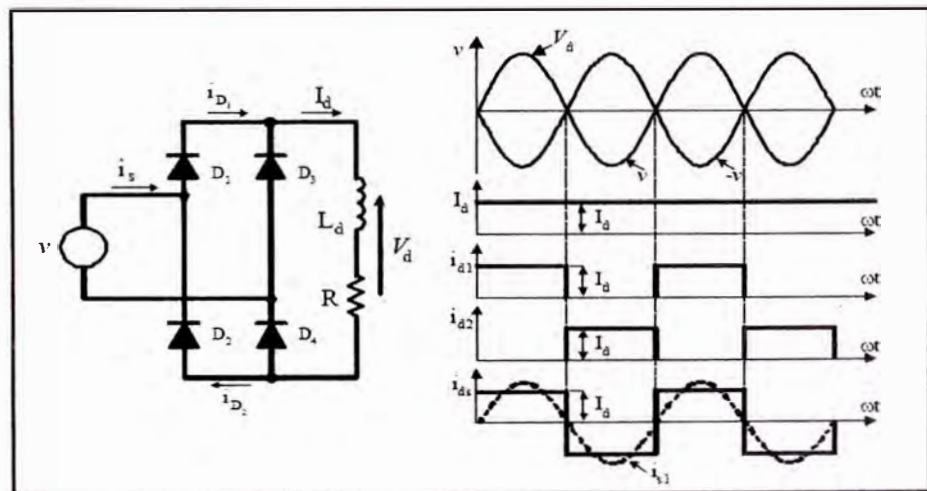


Figura 3.5. Rectificador puente monofásico

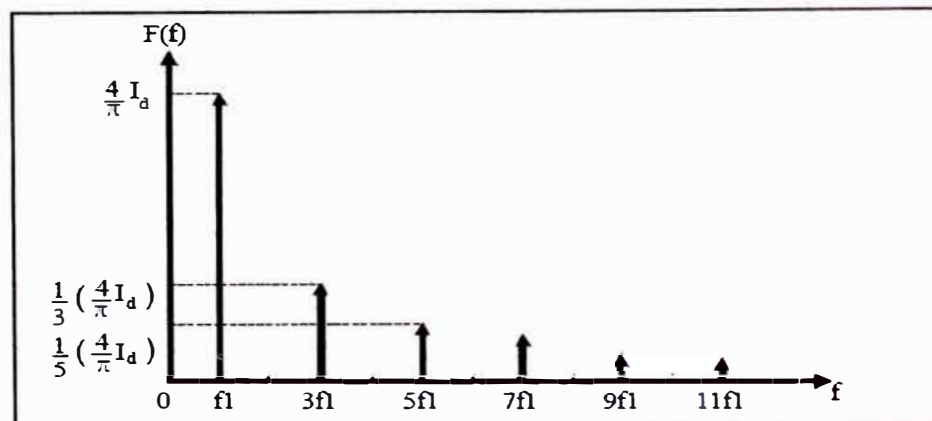


Figura 3.6. Armónicas inyectadas por el rectificador puente monofásico

3.3.2 El Rectificador de 6 Pulsos

Este convertidor es conocido también bajo el nombre de rectificador de 6 pulsos, porque el voltaje que genera en la carga contiene 6 pulsos en un periodo de la tensión de la red.

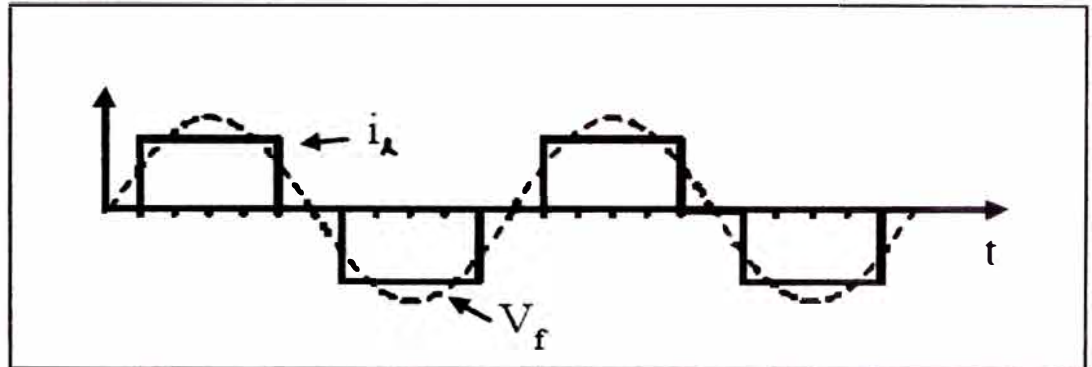


Figura 3.7. Conexión tipo Estrella

$$i_a(t) = I_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos wt - \frac{1}{5} \cos 5wt + \frac{1}{7} \cos 7wt - \frac{1}{11} \cos 11wt \dots \right]$$

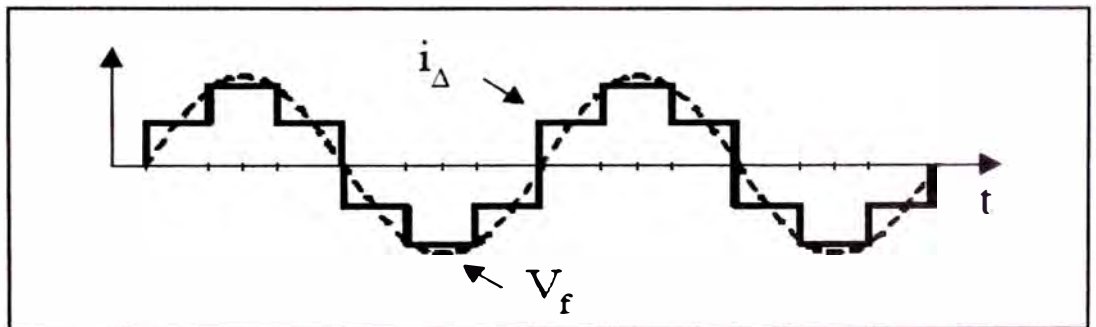


Figura 3.8. Conexión tipo Delta

$$i_a(t) = I_d \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos wt + \frac{1}{5} \cos 5wt - \frac{1}{7} \cos 7wt - \frac{1}{11} \cos 11wt \dots \right]$$

3.4 Normas de Armónicas

En Suecia se tiene los siguientes parámetros.

Número de pulsos	Porcentaje de la capacidad de cortocircuito del sistema (%)
< 6	0.5
6	1.0
12	2.0
> 12	3.0

Tabla 3.2. Capacidad de convertidores que pueden ser conectados

Las restricciones para la distorsión armónica total (THDV) dependen de la tensión del sistema de acuerdo a la siguiente tabla:

Tensión del sistema	Porcentaje THDV (%)
430 / 250 V	4.0
3.3 [kV] a 24 [kV]	3.0
hasta 84 [kV]	1.0

Tabla 3.3. Distorsión armónica total de voltaje (THDV)

En estados unidos se sigue las recomendaciones dadas por IEEE:

- Los condensadores para corregir el factor de potencia o filtros de armónicas no sean sobrecargados por un exceso de armónicas.
- Las perjudiciales resonancias series o paralelas, no están presentes.
- El nivel de armónicas en PCC y en los puntos de utilización no sea excesivo.

Armónicas individuales (impares)						
$I_{c\>I_L}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
< 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

Tabla 3.4. Límite de distorsión de corriente para sistemas de distribución general (de 120V a 69 kV)

Armónicas individuales (impares)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
< 20	2.0	3.5	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	2.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 3.5. Límite de distorsión de corriente para sistemas de subtransmisión general (de 69.001 kV a 161 kV)

Armónicas individuales (impares)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 3.6. Límite de distorsión de corriente para sistemas de transmisión general (>161 kV)

- Las armónicas pares están limitadas al 25% de los valores para armónicas impares mostrados en los cuadros.
- No son admisibles distorsiones de corriente que generan corriente continua.
- I_{sc} : Máxima corriente de cortocircuito en el PCC. El PCC es el punto de acoplamiento común (Point of Common Coupling) y corresponde al lugar en que se interconectan el convertidor (carga no lineal) con los otros consumidores.
- I_L : Máxima corriente demandada por la carga en el PCC (componente de frecuencia fundamental).

En Finlandia se presenta de la siguiente manera:

Tensión del Sistema	THD de tensión (%)	Nivel de armónicas Individuales (%)
1 [kV]	5	4
3 – 20 [kV]	4	3
30 - 45 [kV]	3	2
110 [kV]	1.5	1

Tabla 3.7. Límites de armónicas para tensión

En Chile:

Armónicas Impares no Múltiplo de 3			Armónicas Impares Múltiplo de 3			Pares		
Orden	Armónica voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)	
	≤110kV	> 110kV		≤110kV	> 110kV		≤110kV	> 110kV
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.2
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.2
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
>25	0.2+1.3*25/h	0.2-0.5*25/h						

Tabla 3.8. Armónicas de voltaje, permitidas por la norma chilena

$$IDT = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=50} V_k^2}}{V_1} = THD$$

THD_v < 8% para V ≤ 110 [kV]

THD_v < 3% para V > 110 [kV]

Máxima distorsión de armónica de corriente expresada como % de la fundamental						
Orden de la armónica (armónicas impares)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	Índice D1
≤ 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

Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares.

Todos los equipos de generación de potencia están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente de la razón I_{sc}/I_L .

Donde:
 I_{sc} = Máxima corriente de cortocircuito en el Punto Común de conexión (PCC).
 I_L = Corriente nominal de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC.

- Para el caso de Clientes en Puntos Comunes de Conexión comprendidos entre 69 kV y 154 kV, los límites establecidos en la tabla.
- Para el caso de Clientes en PCC superiores a 154 kV se aplicarán los límites de 110 kV en tanto el ministerio a proposición de la Comisión no fije la norma respectiva.

Tabla 3.9. Corrientes armónicas permitidas por la norma chilena

El índice de distorsión de corriente se calculará según la expresión:

$$IDT = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=50} I_k^2}}{I_1}$$

3.5 Uso de Filtros de Armónicas

Los filtros presentan un camino de menor impedancia que la red, para la frecuencia de la armónica que se desea eliminar.

De este modo la corriente armónica se va por el filtro preferente y la impedancia total equivalente del sistema a esa frecuencia determinada es menor.

Como la corriente armónica produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, ello significa que la distorsión de tensión disminuye.

$$I_{sh} = I_h \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}}$$

$$V_h = I_h \frac{Z_{fh} Z_{sh}}{Z_{fh} + Z_{sh}}$$

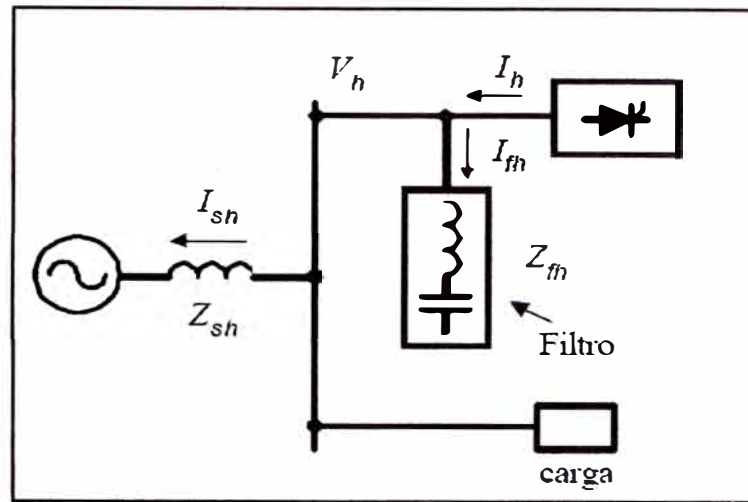


Figura 3.9. Mecanismo de Acción de los Filtros.

3.5.1 Tipos de Filtros

a. Filtro sintonizado simple:

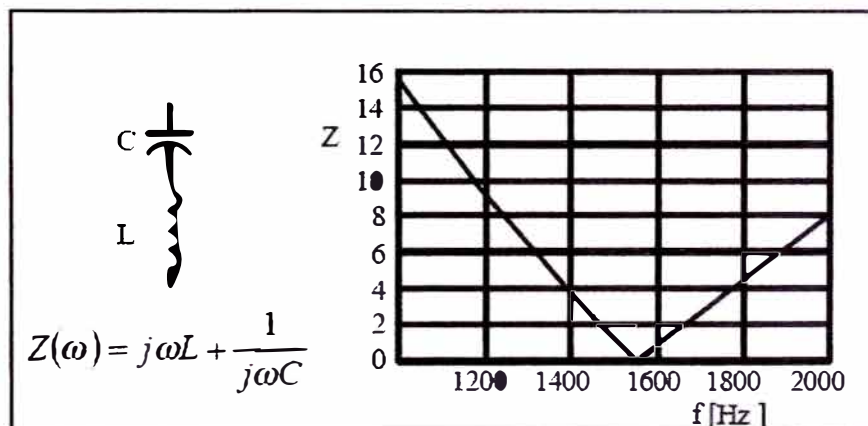


Figura 3.10. Configuración y comportamiento en frecuencia de un filtro sintonizado simple.

Características Generales:

- Eliminar armónica determinada.
- El Filtro se sintoniza a aquella frecuencia que se desea eliminar.
- A la frecuencia de sintonía la impedancia del filtro es mínima.

- El factor de calidad del filtro $Q_0 = X_0/R$ es alto [30 - 60] y hace que la característica de impedancia sea más o menos estrecha o abrupta.
- Es utilizado en instalaciones con rectificadores, inversores PWM y hornos de arco en casos específicos.

Ventajas:

- Proporciona máxima atenuación para una armónica individual.
- Bajas pérdidas asociadas a la resistencia del inductor.

Desventajas:

- Vulnerable a la desintonía.
- Interactúan con la red originando resonancia paralela.

b. Filtro pasa altos de segundo orden:

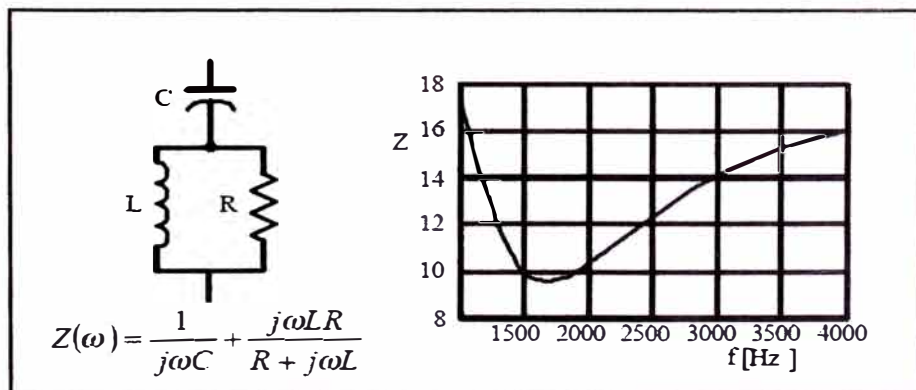


Figura 3.11. Configuración y comportamiento en frecuencia de un filtro Pasa-altos de 2° orden

Características Generales:

- Se usan para eliminar un amplio rango de armónicas.

- Se emplean cuando las armónicas no tienen una frecuencia fija.
- Estos filtros también tienen una frecuencia de sintonía.
- Presentan una alta impedancia para frecuencias bajo la sintonía y una baja impedancia para frecuencias superiores a la de sintonía.
- En estos filtros el factor Q es bajo y se define como $Q = R/X_o$.
[0.5 – 4]

Ventajas:

- Atenúan un amplio espectro de armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia.
- Es muy robusto frente a desintonías.

Desventajas:

- Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red.
- Presenta pérdidas adicionales debido a la resistencia.

3.5.2 Aplicación de Filtros

a. Filtro para rectificadores de 6 pulsos:

Los rectificadores de 6 pulsos de alta potencia son cargas altamente contaminantes.

Los rectificadores de 6 pulsos inyectan las armónicas: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc.

Para atenuar las perturbaciones se usan normalmente filtros sintonizados simple para las armónicas 5, 7.

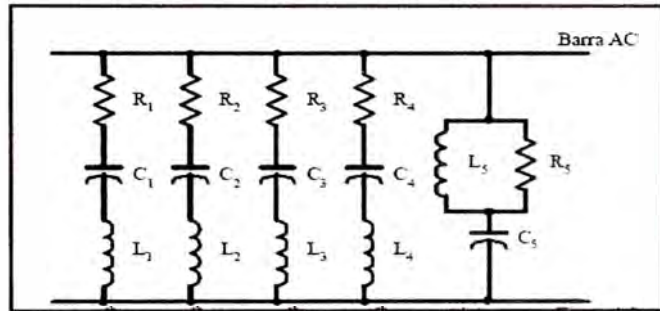


Figura 3.12. Banco de filtros para un rectificador de 6 pulsos

3.6 Semiconductores de Alta Corriente

3.6.1 El Tiristor

Las características son:

- Caja metálica hermética aislada con cerámica.
- Capsula empaquetada con refrigeración en ambas caras como indica la norma internacional.
- En estado apagado invierte la tensión hasta 2800V amplificando la compuerta.

Aplicaciones típicas:

- Control de motores DC.
- Control de Rectificadores.
- Control AC.

➤ Recomendado para amortiguar redes eléctricas.



Figura 3.13. Capsula del Tiristor

V_{TSM}	V_{RRM} V_{TSM}	$(dv/dt)_{cr}$	I_{TSM} (maximum values for continuous operation)	
			2300 A	2800 A
V	V	V/ps	I_{TAV} (sin. 180°; $T_{case} = 25^\circ C$; DSC)	
			1465 A (58 °C)	1780 A (55 °C)
500	400	500	SKT 1000/04 D	SKT 1200/04 D
900	800	500	SKT 1000/08 E	-
1300	1200	1000	SKT 1000/12 E	SKT 1200/12 E
1500	1400	1000	SKT 1000/14 E	SKT 1200/14 E
1700	1600	1000	SKT 1000/16 E	SKT 1200/16 E
1900	1800	1000	SKT 1000/18 E	SKT 1200/18 E
2300	2200	1000	SKT 1000/22 E L2	-
2700	2600	1000	SKT 1000/26 E L2	-
2900	2800	1000	SKT 1000/28 E L2	-

Tabla 3.10. Máxima Corriente para el Tiristor

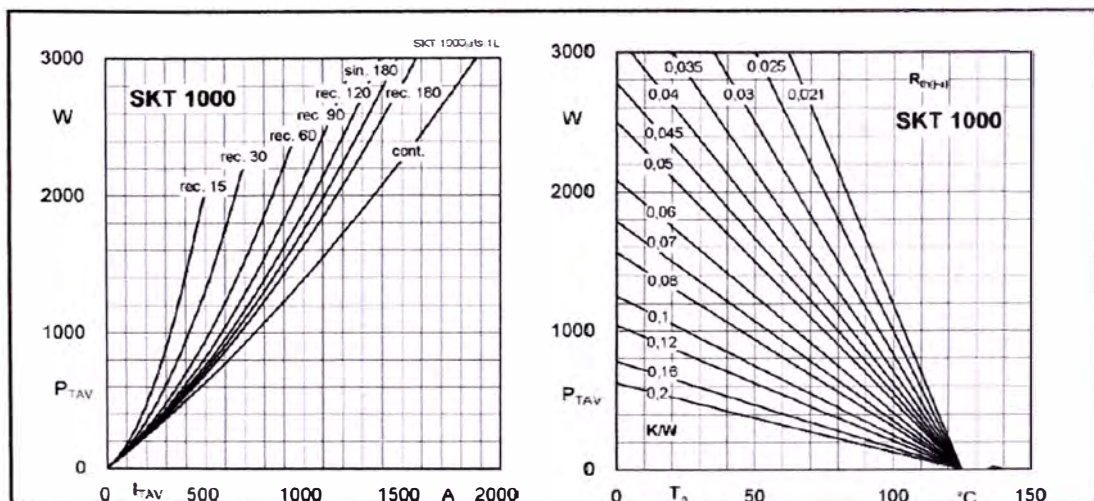


Figura 3.14. Disipación de Energía vs Corriente y Temperatura

3.6.2 Diodo Rectificador

Las características son:

- Capsula tipo metal-cerámico empaquetado con un metal precioso con contactos de presión.
- Disponible para altos voltajes.

Aplicaciones típicas:

- Uso múltiple para rectificadores de diodos de alta potencia.
- En aplicaciones industriales donde se maneje media y alta potencia.



Figura 3.15. Diodo Rectificador

V _{RSM} V _{RRM} V	I _{FAV} (sin. 180; T _{case} = 75 °C)	
	1550 A	2000 A
400	SKN 1500/04	-
600	-	SKN 2000/06
1200	SKN 1500/12	SKN 2000/12
1600	SKN 1500/16	SKN 2000/16
2000	SKN 1500/20	SKN 2000/20
2400	SKN 1500/24	SKN 2000/24
2900	SKN 1500/29	-

Tabla 3.11. Máxima Corriente para el Diodo Rectificador

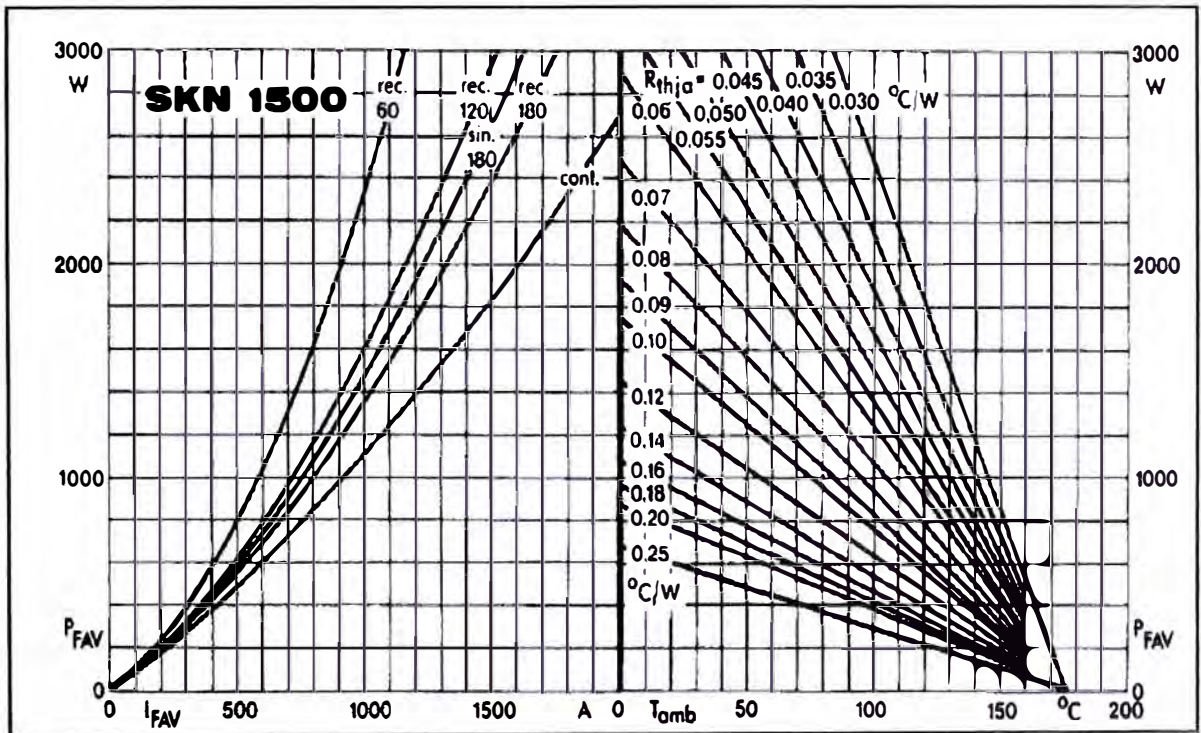


Figura 3.16. Disipación de Energía vs Corriente y Temperatura

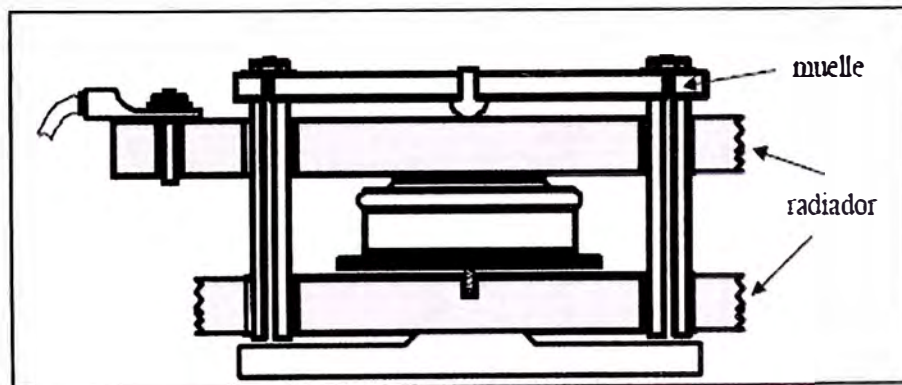


Figura 3.17. Montaje de Diodos utilizando las Abrazaderas

3.7 Protección de Semiconductores

3.7.1 Protección de Sobrevoltaje

La acción del circuito Snubber:

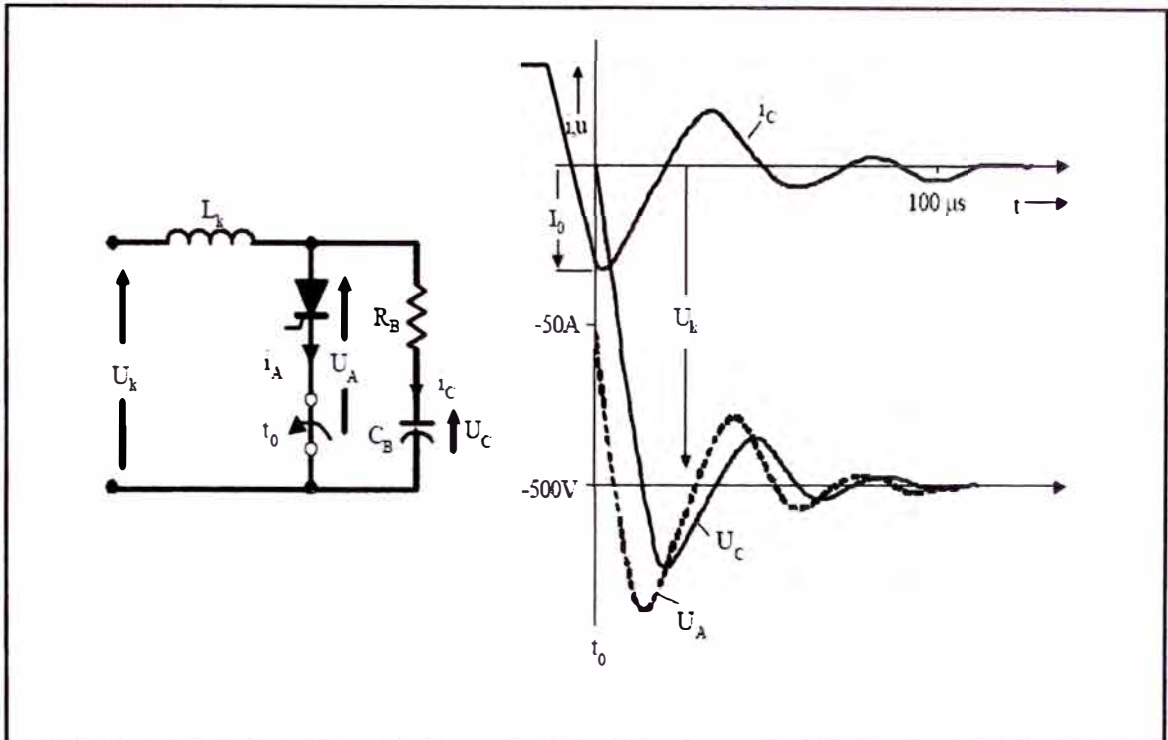


Figura 3.18. Circuito y Formas de Onda

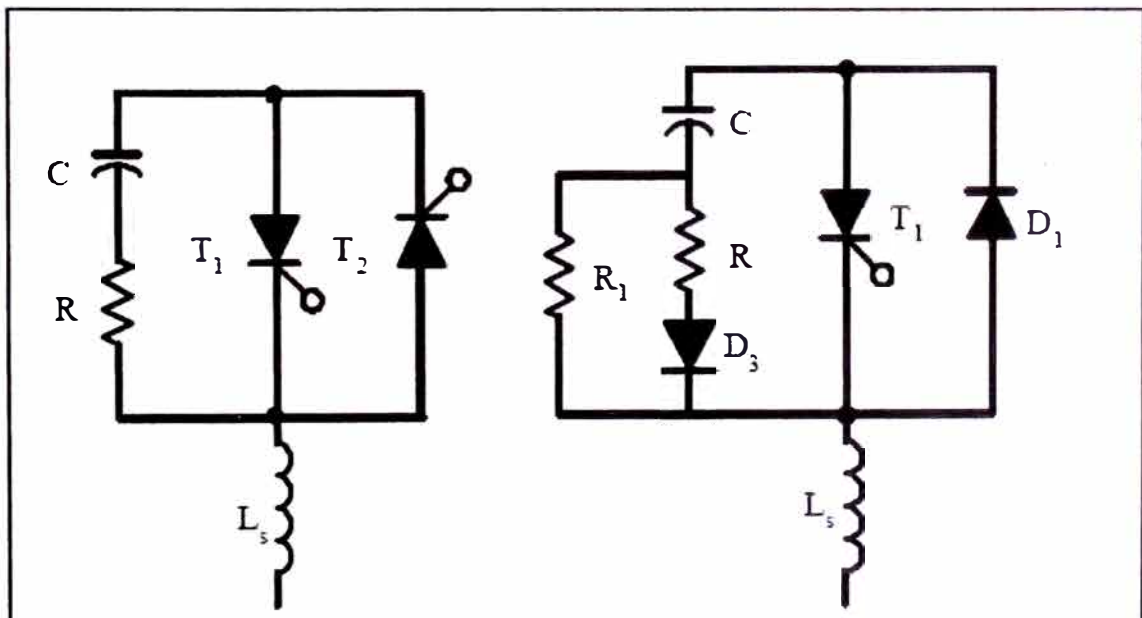


Figura 3.19. Circuito Snubbers No Polarizado y Polarizado

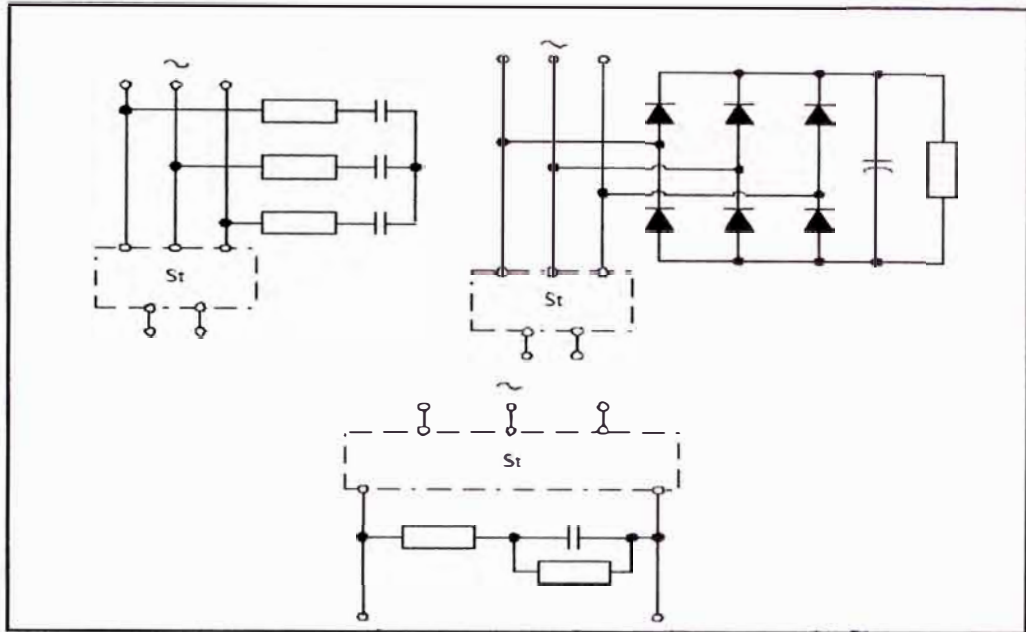


Figura 3.20. Protecciones contra Sobretensiones; Uso de Filtros

La acción de los varistores:

Los varistores tienen la ventaja sobre los diodos (supresores de transitorios) que, al igual que ellos pueden absorber energías transitorias (incluso más altas) pero además pueden suprimir los transitorios positivos y negativos.

- Amplia gama de voltajes desde 14 V a 550 V (RMS). Esto permite una selección fácil del componente correcto para una aplicación específica.
- Alta capacidad de absorción de energía respecto a las dimensiones del componente.
- Tiempo de respuesta de menos de 20 ns, absorbiendo el transitorio en el instante que ocurre.
- Bajo consumo (en stand-by) virtualmente nada.
- Valores bajos de capacidad, lo que hace al varistor apropiado para la protección de circuitería en conmutación digital.

- Alto grado de aislamiento.

3.7.2 Protección de Sobrecorriente

Se muestra gráficamente el funcionamiento del fusible.

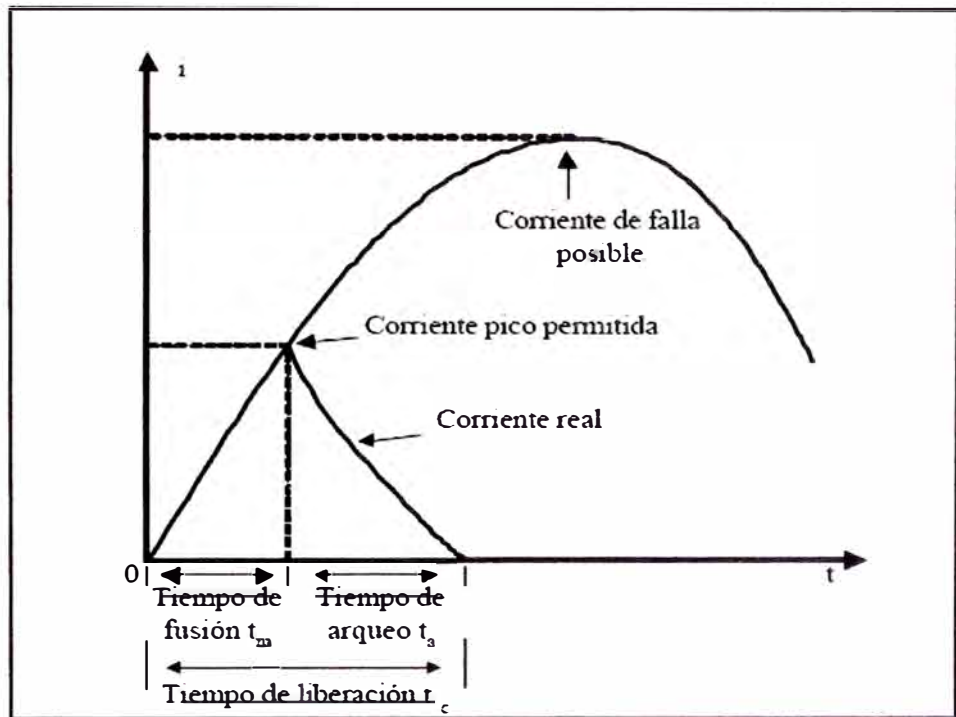


Figura 3.21. Respuesta de la Corriente

Los criterios para la selección del fusible son:

- Debe soportar la corriente del semiconductor.
- La energía permitida del fusible debe ser menor que la del semiconductor.
- Debe soportar el voltaje después de la extinción del arco.

3.8 Aplicaciones

3.8.1 Obtención Electrolytica del Cobre

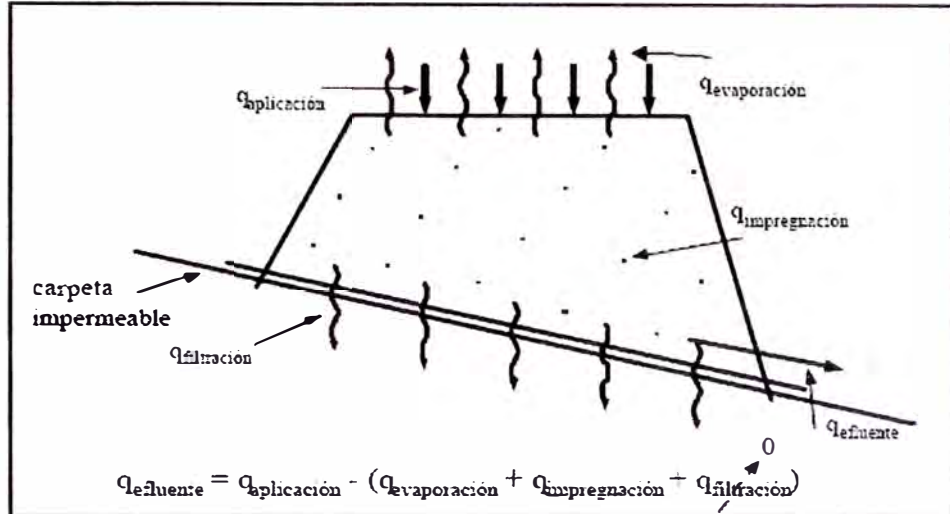


Figura 3.22. Pila de Lixiviación de Cobre

Ley de Faraday:

$$Q = K \times I \times S \times 2 \times t \times n$$

Q: [kg] cantidad de cobre depositado en el cátodo.

K: [kg/A-Hr] Equivalente electroquímico.

I: [A/m²] densidad de corriente electrolito.

S: [m²] Área del cátodo.

t: [Hr] tiempo de aplicación de corriente.

n: [%] eficiencia (0.85 – 0.95)

Extracción	3.0%
Chancado	18.0%
Aglomeración	1.5%
Lixiviación	0.5%
Solución Rica	5.0%
Extracción por Solvente	12.0%
Electroobtención	60.0%
TOTAL	100.0%

Tabla 3.12. Consumo de Energía Eléctrica

Posición de Chile en el Mercado Mundial de Cu EW			
Producción	1981	1991	2000
Producción Mundial de Cu	7.350.000	8.863.000	12.900.000
Producción de Cu Chileno			4.500.000
Producción Mundial de Cu electroobtenido	700.000 9.5%	950.000 10.7%	2.300.000 18%
Producción de Cu Chileno Electroobtenido	6%	11.2%	50%

Tabla 3.13. Producción mundial de cobre al año 2000

El 70% de la potencia instalada en Plantas Hidrometalúrgicas corresponde a convertidores estáticos:

- Rectificadores
- Variadores de frecuencia
- Partidores suaves

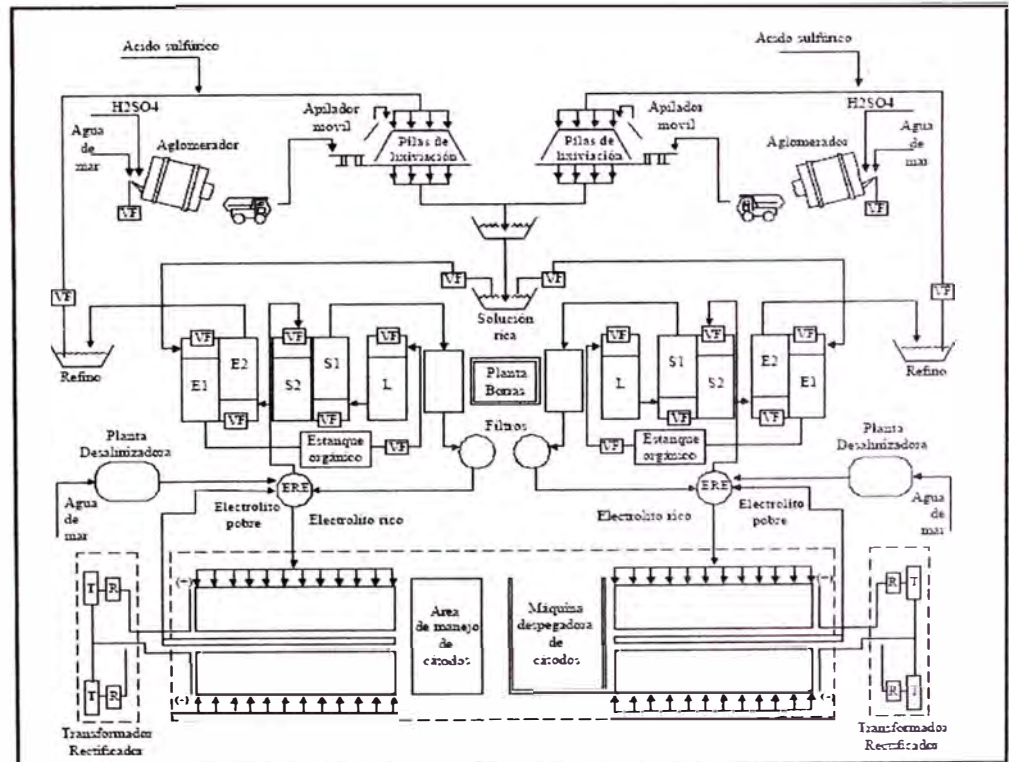


Figura 3.23. Proceso de Lixiviación y Planta Química.

3.9 Refrigeración

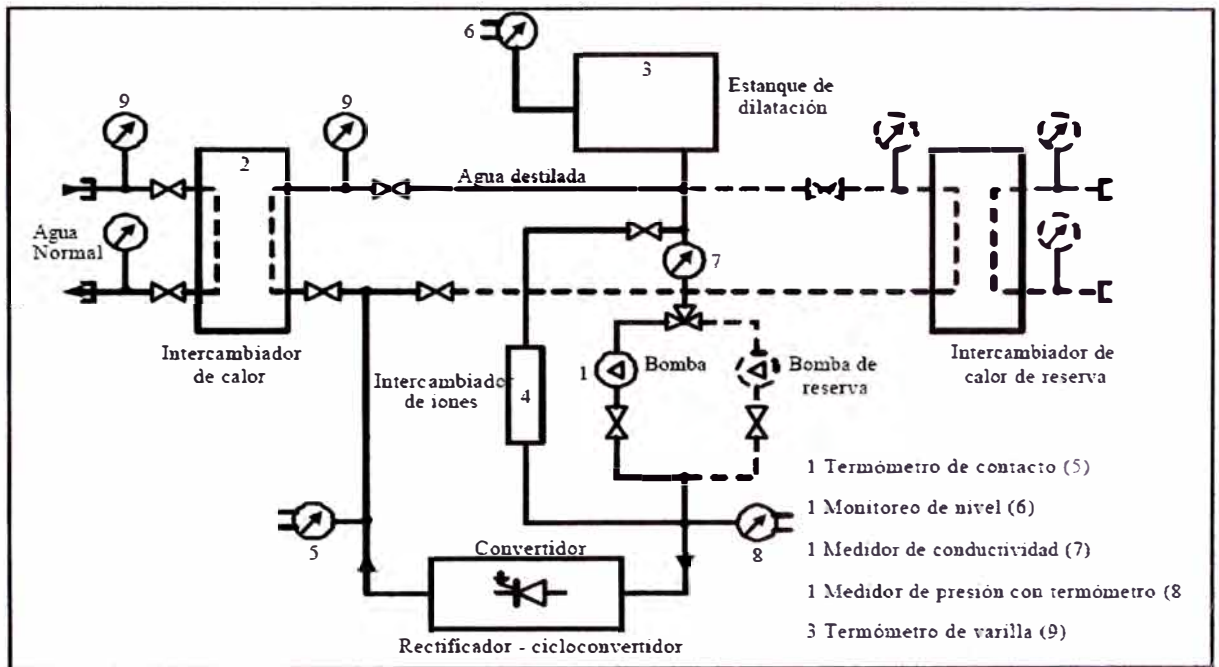


Figura 3.24. Sistema de Refrigeración con Agua

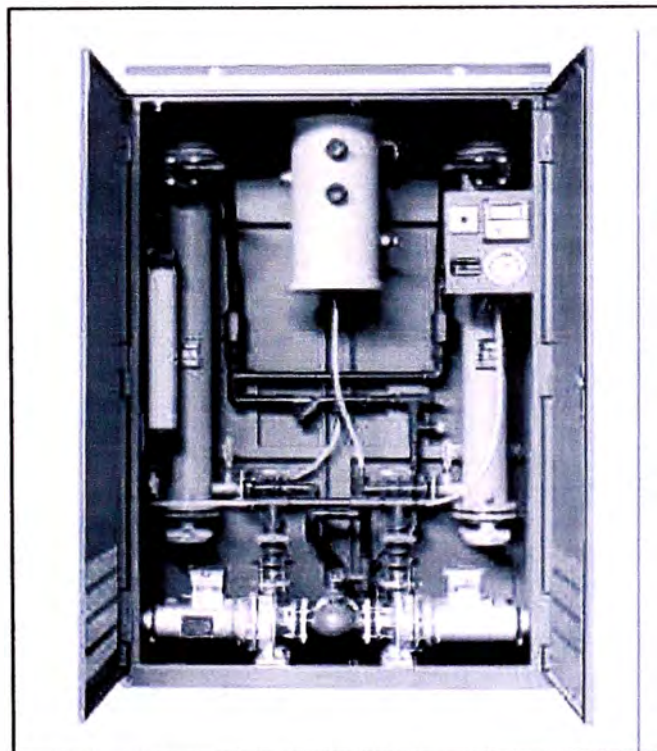


Figura 3.25. Sistema de refrigeración por agua para Rectificadores de Alta Corriente.

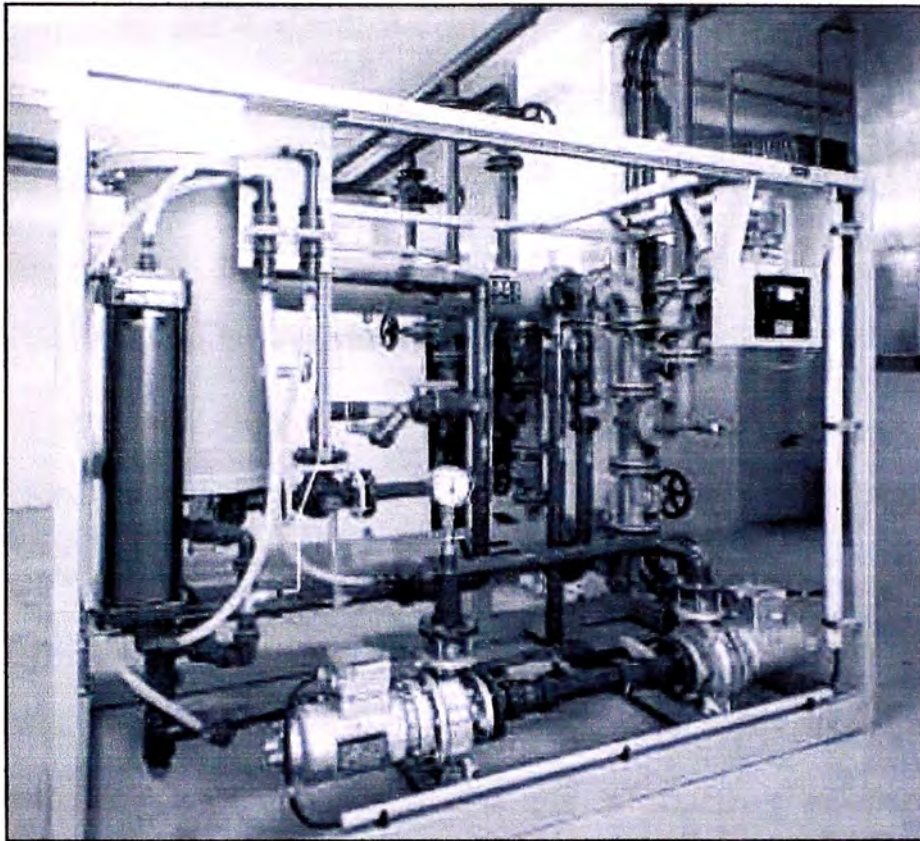


Figura 3.26. Sistema de refrigeración por agua para Rectificadores de Alta Corriente.

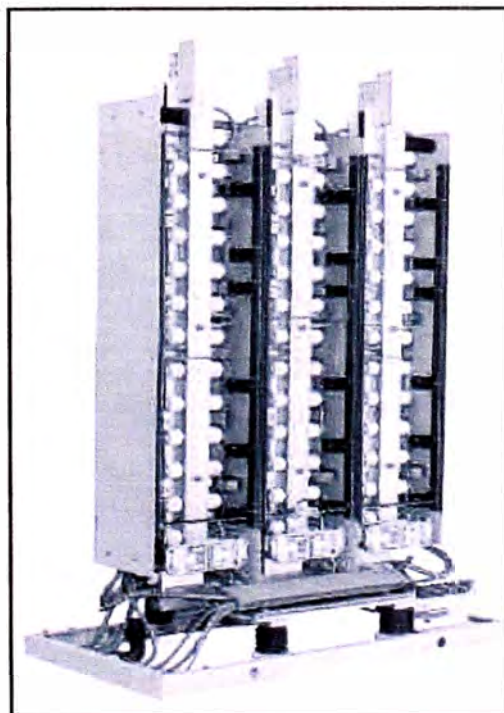


Figura 3.27. Aparato Convertidor Estático de Tiristores, $\pm 24\text{kA}$, 480V

Este rectificador fue desarrollado para el uso de la industria electromecánica. Son adecuados para las condiciones especiales que presenta la industria electrolíticas.

Entre sus ventajas:

- Todos los componentes vitales son de fácil accesibilidad.
- Tiene un diseño claro y simple.
- La separación cuidadosa de las fases por medio de bloques mantiene el material aislado.
- Es de tamaño reducido, implicando que los rectificadores con aire frío puedan instalarse inmediatamente adyacentes a los transformadores de rectificadores. Es un arreglo con alta eficiencia y un buen factor de potencia.

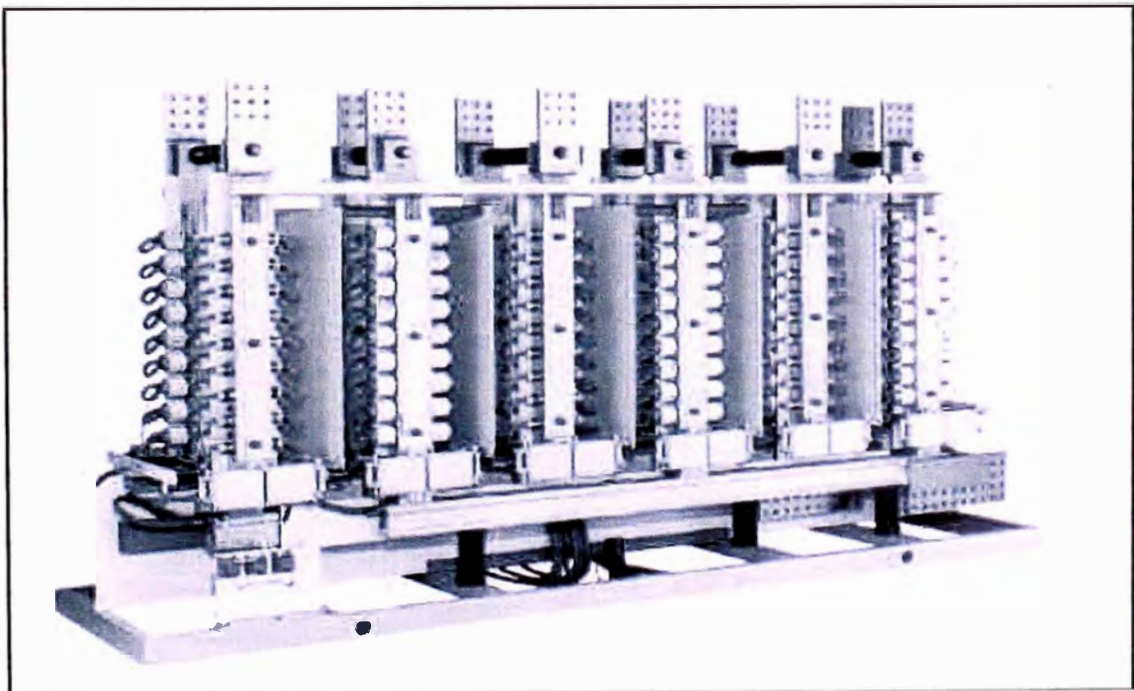


Figura 3.28. Aparato de diodos tipo rosca, con barras disipadoras de aluminio para la refrigeración por agua, 31,5kA, 1200V

3.10 Transformadores

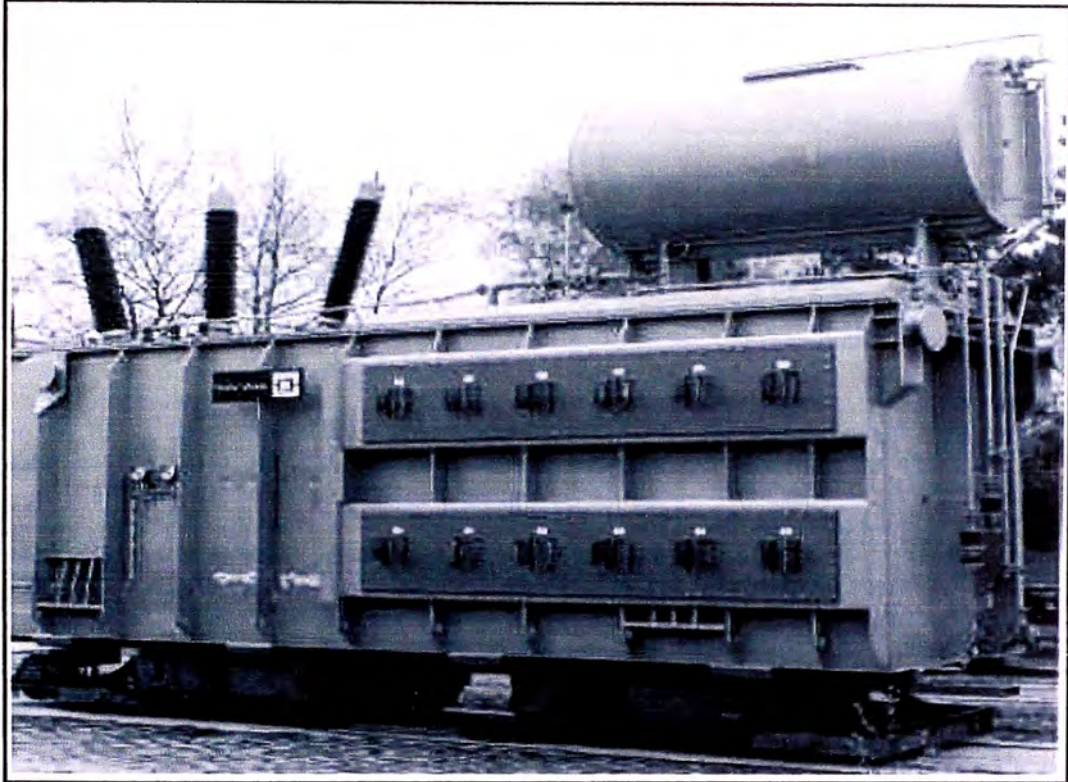


Figura 3.29. Transformador de Potencia para Rectificador de Alta Corriente.

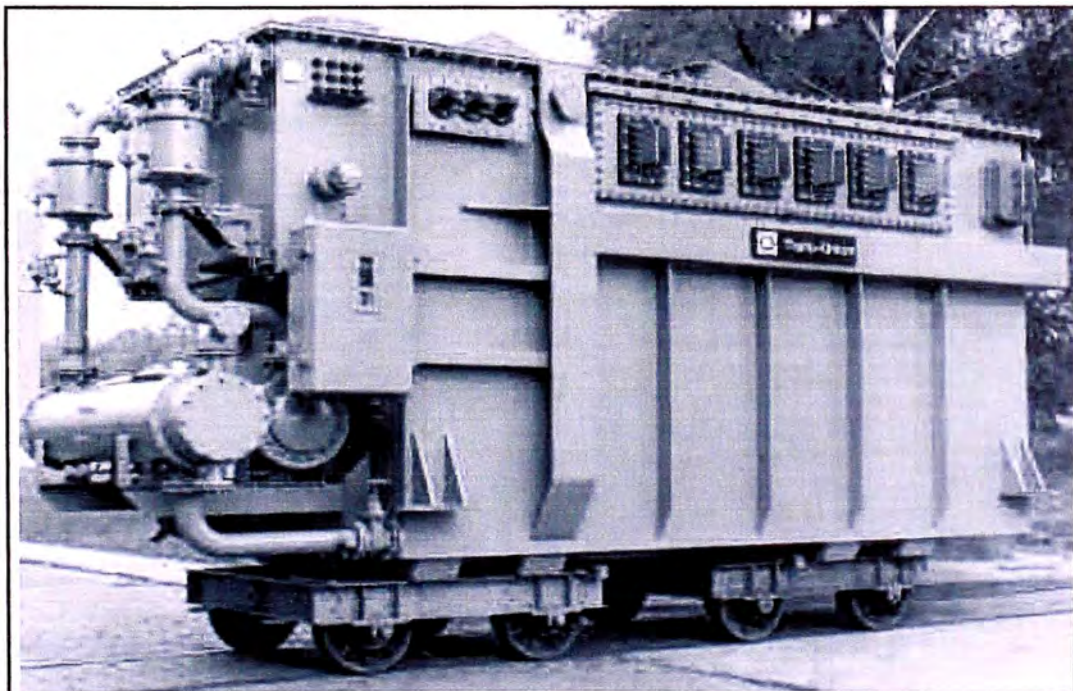


Figura 3.30. Transformador Refrigerado con Agua 32.7 MVA, 100kA, 270 V.

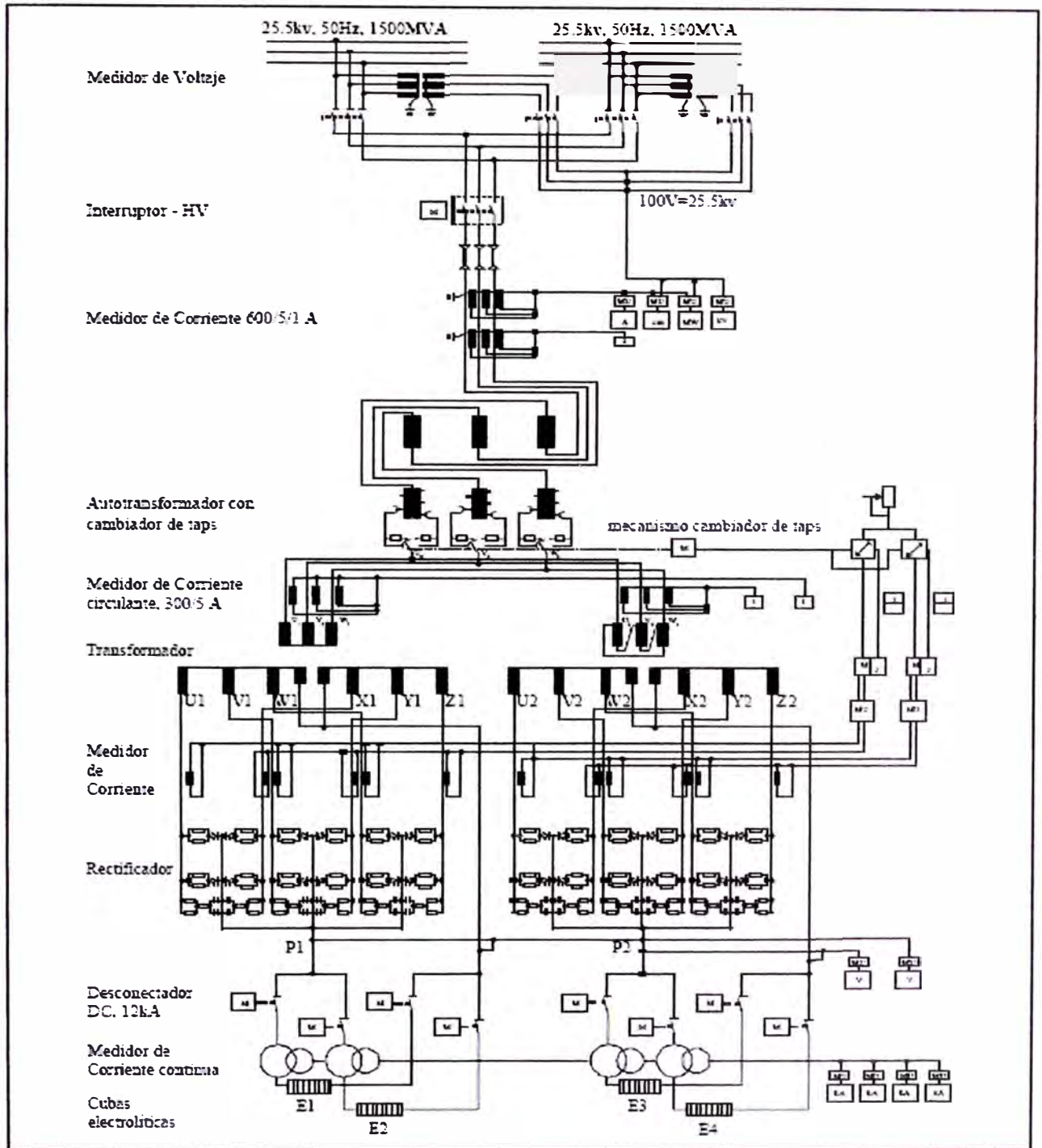


Figura 3.31. Diagrama de un Rectificador de 43,2kA, 420V.

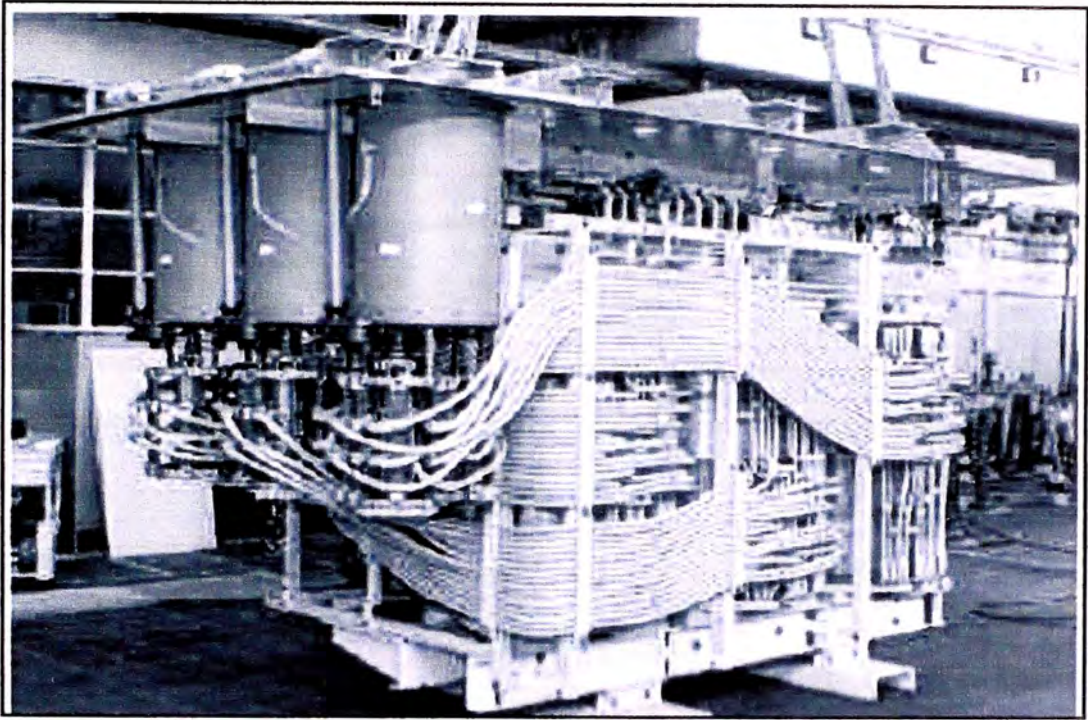


Figura 3.32. Parte activa de un Transformador para Rectificador de 12,6 MVA con cambiador de taps

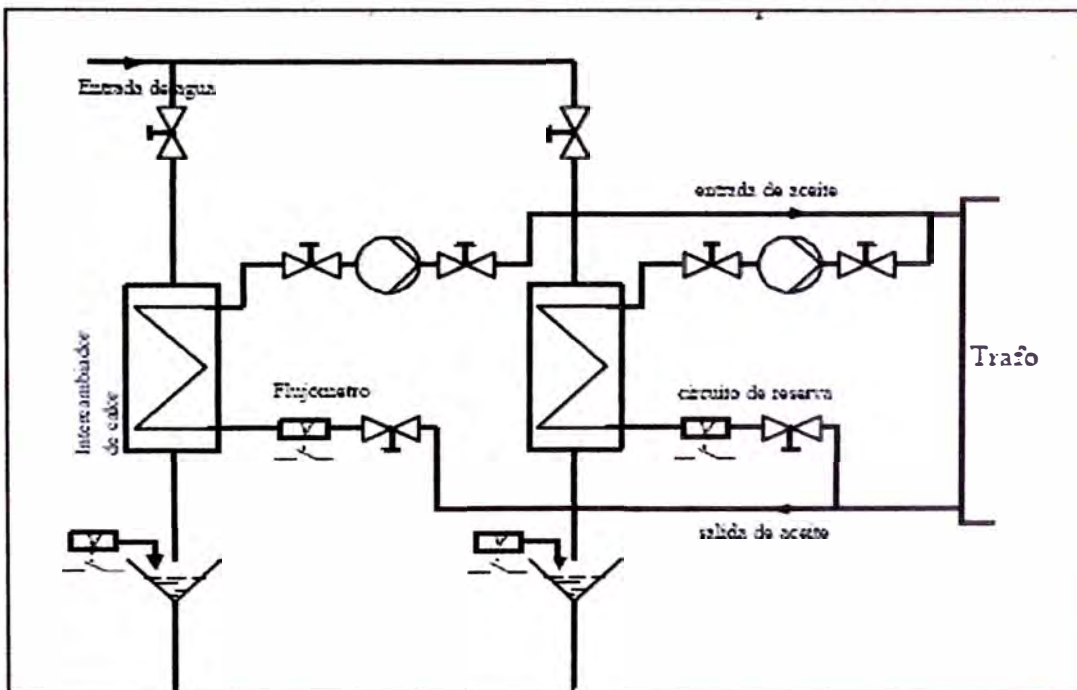


Figura 3.33. Circuito de Refrigeración aceite/agua para Transformador

3.11 Protección de Instalaciones con Rectificadores

Se muestra las diversas fallas y protecciones de los equipos que intervienen en la puesta de los rectificadores.

Sección de la Planta	Naturaleza de la Falla	Monitoreo (Protección)	Señal de Alarma	Imp-out* Alarma	Observ.
H.V. power supply	-H.V. missing	Voltage relay		*	Delayed
	-Overcurrent -Earth fault -Circuit-breaker tripped -Tripping relay inoperative	Overcurrent time relay Earth fault relay Auxiliary switch Interposing relay	*	*	Delayed
H.V. cable	-Insulation fault	Differential protection		*	
Control Cables	-Broken core in diff. Protection cable	Protective core monitor		*	
Transformer	-Defect in core-and-coil assembly -Light -Severe -Earth fault, winding short-circuit	Buchholz relay (gas) (flow) Differential protection	*	*	
	-Winding temperature (near. max)	Thermal replica	*		Using resistance Thermometer or contact Thermometer
	-Oil Temperature	Resistance thermometer Dial type thermometer Temperature monitor	*	*	
	-Oil level	Sight glass Oil level gauge Oil level switch	*	*	
	-Oil leakage -Oil circulation defective oil pump -Oil pump motor or oil pump defective	Buchholz relay Oil-flow indicator Motor protection breaker	*	*	Float contacts Delayed
	-Fan motor or fan defective -Air flow inadequate	Motor protection breaker Air-flow indicator	*	*	
	-Cooling water flow rate and quantity	Monitoring relay, oil detector	*		Delayed
Transformer	-Oil water cooler leaky	Oil detector		*	Oil film on water visible in oil detector
	-On-load tap changer defective or light (Arc drawn during tap changing) -Tap changer motor defective or overloaded owing to light mechanism -Operation of off-circuit tapping switch attempted under load Tapping switch motor defective or overloaded owing to light mechanism	Tap changer protection relay (Surge pressure protection) Motor protection breaker Auxiliary switch and relay Motor protection breaker	*	*	
	-Detective cable box, oil leakage	Buchholz relay (gas, air)	*		
	-Severe defect in cable box	Buchholz relay (flow)		*	
	-High transformer room temperature	Temperature sensor	*		
	-Over voltage	Primary: Valve type arrester Secondary R C network with protective capacitors			

Rectifier	Overcurrent	Electronic overcurrent time relay	*	*	Setting range
	Unbalanced load in double star interphase transformer connection	Unbalanced load relay	*		Setting range delayed
	Internal short-circuit (defective diodes)	Reverse-current relay Fast fuse per diode	*	*	Trip occurs when diode failure tolerance is exceeded. Defective diodes are cut out by fast fuses
	Bus short in rectifier	Short-circuit release in overcurrent time relay		*	
	External short-circuit (short-circuit in d.c. section)	Short-circuit release in overcurrent time relay		*	Protection of diodes assured by specially matched fuses only (in short-circuit current range)
Auxiliaries Power supply	Maloperation	Auxiliaries switch	*		
	220/380 V a.c. missing	Phase failure monitor		*	Delayed
	220 V d.c. missing	Monitoring relay		*	
	24 V d.c. missing -Protection and control system supply feature	Monitoring relay Voltage relay	*	*	Delayed
	-Earth fault in 220 V control voltage cable	Earth leakage detector	*		
	-“MCB tripped” group signal	Monitoring relay	*		
Overall plant	220/380 V a.c. missing	Phase failure monitor		*	
	220 V d.c. missing	Phase failure monitor		*	
	24 V d.c. missing	Monitoring relay		*	
	-Earth fault in 220 V control voltage cable	Earth leakage detector	*		
	-Power supply for total-current setpoint missing	MCB	*		
	-Power supply for total-current controller missing	MCB			
	-“MCB tripped” group signal	MCB and monitoring relay	*		
	-Earth leak in electrolysis equipment	Earth fault relay	*		
	-Emergency-off condition	Mushroom pushbutton (relay)		*	

Tabla 3.14. Fallas y Protecciones del Rectificador

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LOS RECTIFICADORES

Para el correcto diseño de los rectificadores de potencia hay que evaluar la carga no lineal de ingreso a la planta, por lo tanto se tiene que realizar antes de la instalación de los equipos los estudios de coordinaciones eléctricas, armónicos, resonancia y compensación de energía reactiva.

De acuerdo al estudio de armónicos, se definirá si se instala filtros de armónicos, y de acuerdo al estudio del flujo de potencia reactiva, se definirá si se instala banco de condensadores para mejorar el factor de potencia.

Además también se muestra la arquitectura de control que se requirió para implementación de los nuevos rectificadores y equipos eléctricos involucrados.

4.1 Diagrama Unifilar

El sistema eléctrico de la refinería consta de 2 bahías:

Bahía 1: Compuesto por un seccionador de línea y tierra, un transformador de potencial, un circuit switcher, un transformador de 15 MVA y una celda en media tensión.

Bahía 2: Compuesto por un seccionador de línea y tierra, un transformador de potencial, un circuit switcher, un transformador de 22.4 MVA y una celda en media tensión.

La relación de voltajes de los transformadores es 138 kV/10.5 kV, en la barra de 10.5 kV, esta dividido en 2 buses divididos por un Tie, el bus 1 por su configuración debería alimentar las nuevas cargas como: los rectificadores de 1x25 kA y 2x20 kA, su filtros y el rectificador de 2x15 kA. El bus 2 alimenta a los 2 transformadores de 8.5 MVA y 10 MVA que tiene relación de voltaje 10.5 kV/3.8 kV, el secundario del transformador de 8.5 MVA alimenta al bus 1 en 3.8 kV y a su vez estos alimentan a las cargas siguientes: Planta de Ánodos, Tank House, Central Térmica, Rectificador de 12 kA, Local 2 y el secundario del transformador de 10 MVA alimenta al bus 2 en 3.8 kV que tiene como cargas a Local 1, Intake, Grupo Fuji y estos buses son unidos por un Tie.

Para mayor detalle ver en Apéndice A el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la refinería.

4.2 Estudio de Flujo de Potencia, Análisis de Cortocircuito y Coordinaciones

4.2.1 Estudio de Flujo de Potencia y Análisis de Cortocircuito

El presente corresponde a los Estudios de Flujos de Potencia y Análisis de Cortocircuito de Refinería, para lo cual se ha realizado el análisis del comportamiento del sistema eléctrico de Refinería bajo diversos escenarios de operación máximos y mínimos, incluyendo un escenario de operación en Mantenimiento. De los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Luego de la implementación del proyecto de modernización, los transformadores de potencia, barras y cables de energía estarán operando por debajo de su capacidad nominal de carga en condiciones de operación de estado estacionario. Se recomienda retirar el transformador de 8,5 MVA, pues considerando la máxima demanda del sistema de 3,8kV (2,5 MW), no es necesario tener en servicio los dos transformadores (10 MVA + 8,5 MVA).

Por otro lado, se recomienda ajustar el transformador de corriente (TC) del lado de 138 kV del transformador RT2 (22,4 MVA) en 400/5 A, con la finalidad de evitar su saturación ante fallas. En el caso del transformador RT1 (42 MVA), el ajuste debe ser similar al RT2, pero de acuerdo a los datos de placa proporcionados esto no es posible; por tanto, este TC debe ser cambiado antes de la puesta en servicio del transformador de potencia.

Al respecto de la posición de TAPs de los transformadores RT1 (42 MVA) y RT2 (22,4 MVA), estos deben ser posicionados en el TAP “1” (+5%), de modo que los voltajes de la barra de media tensión sean cercanos al nominal (10 kV) en todos los escenarios simulados.

En el siguiente cuadro se muestran los ajustes de TAPs propuestos para cada transformador de Refinería:

Sistema	Transformador	Código ETAP	CARGA 30 kA + 12 kA				CARGA 40 kA + 25 kA				MNTO.
			FP-C30+12_01 TAP	FP-C30+12_02 TAP	FP-C30+12_03 TAP	FP-C30+12_04 TAP	FP-C40+25_01 TAP	FP-C40+25_02 TAP	FP-C40+25_03 TAP	FP-C40+25_04 TAP	FP-MAN_01 TAP
138 kV	Principal Nuevo SE Refinería	R-T1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Principal Existente SE Refinería	R-T2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10 kV	Nuevo para sistema 3.8 kV	R-T10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Existente para sistema 3.8 kV	R-T8.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.8 kV	Planta de Anodos	R-TANOD	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Intake	R-TINT	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Local 1 a 220 V	R-TL1_220	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Local 1 a 460 V	R-TL1_460	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Local 2	R-TL2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Metales Preciosos a 220 V	R-TMP_220	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Metales Preciosos a 460 V	R-TMP_460	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tank House a 220 V	R-TTH_220	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tank House a 460 V	R-TTH_460	4	4	4	4	4	4	4	4	4	

Tabla 4.1. Ajustes de Taps de cada uno de los Transformadores

Es preciso señalar que los transformadores rectificadores no han sido considerados en el cuadro anterior, ya que estos deben ser ajustados por el personal encargado de Refinería de acuerdo a las condiciones de operación y las recomendaciones del fabricante.

Al respecto de la relación de transformación de los transformadores de corriente de medición, estos deben ser ajustados de acuerdo a la siguiente tabla:

Sistema	Carga	Código ETAP Interruptor Asociado	Vn	In	Icarga	Ajuste Recomendado	
			kV	A	A	Relación Tranfor.	Ajuste
138 kV	Lado 138 kV Transformador RT1	R-52R1	138	176	87	400/5	S1-S2
	Lado 138 kV Transformador RT2	R-52R2	138	94	87	100/1	Y1-Y2
10 kV	Principal de R-Bus950-1	R-52M1	10	2.309	1.194	2500/5	X1-X4
	Principal de R-Bus950-2	R-52M2	10	1.232	1.194	1500/5	X2-X4
	Transformador 8.5 MVA	R-52MT	10	491	160	800/5	X2-X3
	Transformador 10 MVA	R-52MT_1	10	550	160	800/5	X2-X3
	Salida a Filtros Existentes - Rec 30kA	R-52R30kA	10	1.040	557	1200/5	X1-X3
	Salida a Rectificador 40kA	R-52R40KA	10	1.246	564	1500/5	X1-X4
	Salida a Rectificador 25kA	R-52R25KA	10	224	44	300/5	X3-X4
	Salida a Filtros Nuevos	R-52F1	10	420	258	500/5	X4-X5
	Transformador Rectificador 1A - Rec 40kA	R-52R1A	10	623	282	800/5	X2-X3
	Transformador Rectificador 1B - Rec 40kA	R-52R1B	10	623	282	800/5	X2-X3
3.8 kV	Principal Barra 01 de 3.8kV	R-52FR	3.8	1.291	465	1500/5	X1-X4
	Principal Barra 02 de 3.8kV	R-52FR_1	3.8	1.519	465	1600/5	X2-X5
	Salida a Planta Anodos	R-52FAR1	3.8	426	59	500/5	X4-X5
	Salida a Tank House	R-52FT	3.8	418	99	500/5	X4-X5
	Salida a Central Térmica	R-52FER	3.8	304	243	400/5	X1-X2
	Salida a Rectificador 12 kA	R-52FS	3.8	200	120	300/5	X3-X4
	Salida a Local 2	R-52FL2	3.8	38	14	300/5	X3-X4
	Salida a Local 1	R-52FL1	3.8	334	124	400/5	X1-X2
	Salida a Intake	R-52INT	3.8	24	9	300/5	X3-X4
Salida a Grupo Emergencia Fuji	R-52FG	3.8	108	108	300/5	X3-X4	

Tabla 4.2. Ajustes de la relación de transformación de los Transformadores de Corriente de Medición

Adicionalmente, se ha realizado un análisis de pérdidas determinándose que al trabajar con una tensión nominal en media tensión de 10,5 kV en lugar de 10 kV, se logra un ahorro en pérdidas de energía de 4344 dólares en el periodo de un año. Para lograr este

voltaje los transformadores RT1 y RT2 deben trabajar con los TAPs en posición “3” (0%).

Por otro lado, de acuerdo a las evaluaciones de soportabilidad de corto circuito (Duty), considerando la configuración en la que quedará operando la Refinería luego de la implementación del proyecto, se ha identificado que la barra que alimenta a los Filtros Existentes y al Rectificador de 30 kA, así como los interruptores conectados a ella, han sido superados en su capacidad de cortocircuito, por cuanto se recomienda su reemplazo a fin de evitar posibles daños irreversibles en estos equipos.

Asimismo, se recomienda que los futuros equipos que se adquieran para el sistema de 460 V y 220 V tengan capacidades de cortocircuito mínimas de 65 kA y 25 kA respectivamente. Asimismo, con las corrientes calculadas, el personal encargado de Refinería debe verificar las capacidades de interrupción de los equipos instalados en el sistema de baja tensión, ya que durante el desarrollo del presente estudio no fue posible verificarlo debido a que se encontraban energizados. En el caso de las cargas de Intake, se recomienda su independización de la celda de Local 1, para lo cual la salida a Intake debe conectarse a una nueva celda que esté disponible en 3,8 kV, con

el objetivo de tener mayor maniobrabilidad en las operaciones y contar con protección exclusiva para este sistema.

4.2.2 Estudio de Coordinación de Protecciones

El presente corresponde al Estudio de Coordinación de Protecciones propiamente dicho, el cual fue realizado en base a los resultados obtenidos en el Análisis de Flujos de Potencia y Cortocircuito que se presentan en el punto 4.2.1.

Este informe se divide en dos partes, en la primera se realiza el diagnóstico de la situación actual de las protecciones existentes en la Refinería con la finalidad de detectar problemas de selectividad y coordinación.

La segunda parte corresponde a la situación propuesta, tanto para los nuevos relés como para aquellos existentes que se mantendrán instalados. Este estudio toma como base los resultados del diagnóstico de la situación actual y los criterios de ajuste establecidos.

De los cálculos y análisis realizados se concluye lo siguiente: En el diagnóstico de la situación actual se ha verificado que no existe una adecuada coordinación de las protecciones en los sistemas de: Filtros Existentes y Rectificador de 30 kV, Planta de Ánodos y Metales Precisos, Tank House, Local 1 e Intake. Por tanto, para mejorar la selectividad de estos sistemas se están proponiendo nuevos ajustes para los relés existentes, los cuales continuarán en operación luego de la implementación del proyecto de modernización que se viene ejecutando. En la mayoría de los casos, además de un reajuste de los relés es necesario el reemplazo o instalación de nuevos transformadores de corriente, ya sea por problemas de saturación o la necesidad de tener una medición más precisa de las corrientes de secuencia cero.

En general, se ha maximizado los recursos y capacidades de las protecciones existentes en Refinería, los cuales continuarán en servicio luego de la implementación del proyecto de modernización. Con los ajustes propuestos y las recomendaciones de cambio de transformadores de corriente se mejora la selectividad de los sistemas en los que tienen injerencia estos relés, pero a pesar de ello no se logra un ajuste óptimo por limitaciones de los propios equipos de protección existentes. Por tanto, en caso se requiera optimizar la selectividad de los sistemas existentes en la Refinería, se recomienda realizar un

estudio técnico-económico para el reemplazo de estos relés existentes por otros más adecuados disponibles en el mercado.

El detalle de las modificaciones al sistema de protección existente se muestra en el siguiente:

Ítem	Código ETAP Relé	Ubicación	Marca	Cambio Ajuste	Cambio TC Fases	Cambio ó Reemplazo TC Tierra
1	R-RelM	Filtros Existentes	Basler BE1-50/51B	SI	NO	NO
2	R-RelM_n	Filtros Existentes	Basler BE1-50/51B	SI	NO	50/5 A
3	R-Rel52A	Autotransformador	Basler BE1-50/51B	SI	NO	NO
4	R-Rel52A_n	Autotransformador	Basler BE1-50/51B	SI	NO	50/5 A
5	R-Rel52B_n	Filtro 5ta Armónica	Basler BE1-50/51B	SI	NO	50/5 A
6	R-Rel52C_n	Filtro 7ma Armónica	Basler BE1-50/51B	SI	NO	50/5 A
7	R-Rel52D_n	Filtro 11va y 13va Armónica	Basler BE1-50/51B	SI	NO	50/5 A
8	R-RelANSI25 R-RelANSI25	Trafos Rectificadores de 30 kA	SEL 501-2	SI	NO	NO
9	R-RelFAR2	Salida trafo Planta de Anodos	Cutler Hammer DT3000	SI	NO	25/5 A
10	R-RelFAR3	Salida Metales Preciosos	Cutler Hammer DT3000	SI	NO	25/5 A
11	R-RelFAR4	Llegada Metales Preciosos	GE Multilin SR735	SI	400/5 A	25/5 A
12	R-RelTH_460	Salida trafo Tank House a 460 V	ABB SPAJ141C	SI	800/5 A	25/5 A
13	R-RelTH_220	Salida trafo Tank House a 220 V	ABB SPAJ141C	SI	800/5 A	25/5 A
14	R-RelL1_460	Salida trafo Local 1 a 460 V	ABB SPAJ141C	SI	800/5 A	25/5 A
15	R-RelL1_220	Salida trafo Local 1 a 220 V	ABB SPAJ141C	SI	800/5 A	25/5 A

Tabla 4.3. Ajustes del Sistema de Protección Existente

En el caso de los nuevos relés de protección de los alimentadores de 10 kV y 3,8 kV se propone ajustar las funciones de sobrecorriente con la opción direccional (67 – 67N), ya que existe aporte de corrientes de cortocircuito en sentido contrario desde las cargas, especialmente rectificadores y filtros. Este ajuste además mejora la confiabilidad en la operación de los relés de protección.

Por otro lado, en lo referente a la protección de tierra, es necesario que los disparos de las funciones de sobrecorriente a tierra de los relés instalados en los transformadores de aterramiento de 10 kV y 3,8 kV actúen sobre los interruptores de las barras principales (main breakers), ya que estos relés constituyen la protección principal contra fallas a tierra en las barras de media tensión. Los disparos deben ser de la siguiente forma:

- En 10 kV sobre los interruptores R-52M1 y R-52M2.
- En 3,8kV sobre los interruptores R-52FR y R-52FR_1.

Al respecto del transformador de aterramiento de 3,8kV, es necesaria además la instalación de un transformador de corriente de 50/5 A en el neutro, para poder activar la función de sobrecorriente a tierra en el relé R-RelZZ3,8, el cual protegerá a las barras de 3,8kV y al propio transformador de aterramiento contra fallas a tierra.

En lo referente a los relés diferenciales de los transformadores R-T8,5 (8,5 MVA) y RT10 (10 MVA), estos tendrán activados además la función de sobrecorriente entre fases para el lado de 3,8 kV, los cuales deben contar con un disparo independiente a su interruptor principal (main breaker): R-52FR para el trafo R-T8,5 y R52FR_1 para el trafo R-T10.

En el caso de los relés de los interruptores de enlace (TIE) de 10kV y 3,8kV, estos no tendrán activada la función de sobrecorriente a tierra, pero si la sobrecorriente entre fases, la cual estará configurada como direccional (67) orientados de la siguiente manera:

- Relé R-RelTIE10: Forward hacia Bus950-2.
- Relé R-RelTIE10 1: Forward hacia Bus950-1.
- Relé R-RelTIE3,8: Forward hacia Bus3,8_2.
- Relé R-RelTIE3,8_1: Forward hacia Bus3,8-1

Por otro lado, se recomienda que los filtros de armónicos existentes y nuevos, sean puestos en servicio uno a la vez y empezando por el de mayor potencia, todo esto con la finalidad de reducir las corriente de inserción en el momento de su energización.

Finalmente, en base a los ajustes propuestos y tomando como referencia los relés de protección de los transformadores que alimentan los sistemas de 460 V y 220 V, se recomienda verificar la coordinación de protecciones del sistema de baja tensión.

4.3 Estudio de Armónicas, Resonancia y Evaluación de Filtros

4.3.1 Introducción

Este estudio presenta los resultados del estudio de Armónicas, Resonancia y Evaluación de los Filtros del Sistema Eléctrico del área de Refinería.

La alimentación eléctrica a la Refinería, se efectúa desde la Subestación Eléctrica. En dicha S.E. existen 2 bahías de 138 kV, donde la bahía # 1 alberga al transformador de potencia de 15MVA y la bahía #2 alberga al transformador de potencia de 22.4MVA. Para la instalación de los nuevos rectificadores marca FRIEM, se ha cambiando el transformador de potencia de 15MVA por uno de mayor capacidad de 42MVA.

En el año 1996, para el proyecto de ampliación de la Refinería de Cobre a 248,000 TM, se adquirió dos nuevos rectificadores Westinghouse (2 x 15 kA, Buffalo Power). Este equipo inicio su operación con una corriente de 23 kA y paulatinamente se ha ido incrementando su carga hasta un valor actual de 29.2 kA. Para el año 2005 ya se contaba con una capacidad proyectada de producción de 283,100 TM.

En los últimos años, para mantener la operatividad de dichos rectificadores se realizaron diversas mejoras en los sistemas de refrigeración, fuerza, control, protección y medición. A la fecha, este rectificador ha presentado fallas eléctricas, que comprometieron la producción de la refinería, para ello se está instalando un nuevo rectificador de potencia de 2 x 20 kA, 460VDC para la planta electrolítica y uno de 1 x 25 kA, 130 VDC para la planta de purificación, ambos rectificadores marca FRIEM.

Líneas abajo, los cambios operacionales que están siendo implementados en la Refinería:

- Ampliación de la subestación Eléctrica de Refinería: se ha puesto en servicio un nuevo transformador de potencia de 42MVA, de 138/10.5 kV; 01 Circuit Switcher de 161 kV, 01 switchgear principal en 10.5 kV; 01 switchgear para los nuevos filtros FRIEM en 10.5 kV.
- Instalación de nuevos filtros de armónicos de la 5ta, 7ma y 11ava armónica adicionales a los filtros existentes del rectificador Westinghouse de 2 x 15 kA que cuenta en la actualidad con filtros de armónicos de la 5ta., 7ma., 11ava. y 13ava. armónica, conectados en la barra de 10.5 kV.

- Se estará retirando de servicio un rectificador de 1 x 21 KA, 330VDC marca FUJI y su respectivo filtro de armónicos y de condensadores de 6000 kvar.
- En el futuro, se adicionará un transformador de 10 MVA, 10.5/3.8 kV.
- En la zona de rectificadores, se están instalando 01 rectificador de 1 x 25 kA para la planta de purificación y 2 rectificadores de 20 kA, cada uno 460VDC, para la planta electrolítica, que serán suministrados con energía desde la red en 10.5 kV.

4.3.2 Metodología de Análisis-Modelo Unifilar ETAP

La información principal del sistema eléctrico de Refinería fue tomada en coordinación con el personal técnico de la Refinería y permitió que se realizara el modelo del sistema eléctrico de Refinería usando la versión 7.1 del software ETAP (Electrical Transient Analyser Program). La revisión Base del Diagrama Unifilar que se adjunta comprende el modelo ETAP desarrollado de acuerdo a los diagramas unifilares.

La información ingresada en el modelo del diagrama unifilar para cada componente eléctrico ha sido obtenida de las instalaciones de la

Refinería. Para el caso de los cables que van en ductos subterráneos, se muestra el listado de cables tal cual han sido ingresados al modelo. La información técnica obtenida del campo ha sido la base para las especificaciones técnicas ingresadas al modelo ETAP. Se sugiere que esta información sea revisada y validada por el personal técnico de la Refinería. Los rectificadores de la planta de refinería han sido modelados como variadores de velocidad a los cuales se han ingresado el espectro de corrientes armónicas correspondientes a las mediciones realizadas por el departamento técnico de Refinería. Estos valores fueron comparados con equipos similares de fabricantes como ABB, Westinghouse y Rockwell Automation comprobando que los valores eran similares. Basados en la experiencia se ingresaron al modelo ETAP los valores más representativos, los cuales se indican a continuación:

		H5	H7	H11	H13	H17	H19	H23	H25	H29
Rectificador	Friem	23.4	11.2	7	5.4	4	3.3	2.6	2.3	1.9
	Westinghouse	17.4	13.5	5.9	6.4	4	3.4	2.1	2	1.7

Tabla 4.4. Valores representativos de Armónicas

El modelo desarrollado con el software ETAP fue verificado con los registros de los principales medidores de energía ION 7600 ubicados en las subestaciones principales del sistema eléctrico de la Refinería.

Los valores de corriente y voltaje calculados con el software ETAP coinciden con los valores registrados.

Finalmente, el diseño actual de los filtros de armónicas fue contrastado con los resultados obtenidos con el software ETAP. En el numeral de conclusiones se encuentran los comentarios y conclusiones de la evaluación.

4.3.3 Alcances del Estudio

Para determinar los valores de distorsión de voltaje y corriente armónica en todas las ramas principales del sistema eléctrico de la Refinería, el estudio realizado ha incluido un flujo de carga con la frecuencia fundamental (60 Hz) y flujo de carga con cada una de las frecuencias armónicas hasta la armónica No. 73

En la segunda parte del estudio se ha realizado un análisis de la posible resonancia que puede ocurrir al ponerse la impedancia de los filtros de armónicas (existentes y nuevas) en paralelo con la impedancia del sistema eléctrico de la Refinería. Los resultados entregados por el ETAP muestran la magnitud de las impedancias de las barras principales de la Refinería.

Como tercer alcance, con los resultados calculados por ETAP, se ha realizado una evaluación de los filtros de armónicos actualmente instalados para determinar si los parámetros de operación están dentro de los valores especificados para cada filtro y si es posible instalar una cantidad adicional de energía reactiva sin generar resonancias en el sistema eléctrico actual.

4.3.4 Escenarios

Para realizar los análisis de Armónicas y Resonancia se coordinó con el encargado del estudio de parte de la Refinería y se consideraron los siguientes escenarios:

Escenario de Operación 1:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 12 y 30 kA.

Escenario de Operación 2:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 12 y 40 kA.

Escenario de Operación 3:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 12, 30 y 40 kA.

Escenario de Operación 4:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 30 y 25 kA.

Escenario de Operación 5:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 40 y 25 kA.

Escenario de Operación 6:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, bajo la operación de los rectificadores de 30, 40 y 25 kA.

Escenario Base:

Comportamiento de las barras de 10.5 kV del sistema eléctrico de Refinería, operando en máxima demanda con todos los equipos de planta conectados al sistema.

4.3.5 Estándares

Los siguientes estándares fueron usados para realizar el estudio:

1. ANSI/IEEE Std. 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System”.
2. ANSI/IEEE P519A/D5, IEEE Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems.
3. Norma Técnica de Calidad del Suministro Eléctrico del Perú (NTCSE).

IEEE 519-1992, las corrientes armónicas son creadas por equipos no-lineales instalados en el sistema eléctrico de un usuario. Las sugerencias presentadas en el estándar IEEE 519-1992 están diseñadas para limitar las corrientes armónicas producidas e inyectadas al sistema por dicho usuario, con el fin de disminuir los niveles de voltajes armónicos en todo el sistema.

Los límites de armónicas son evaluados típicamente en el Punto de Acople Común (PAC) entre el suministrador de energía y el cliente. Para el presente estudio el PAC está definido en las barras de la SE principal de la Refinería en 10.5 kV. La responsabilidad del cliente es asegurarse que los límites de las corrientes armónicas no sean excedidos a causa de la distorsión creada dentro de su planta. IEEE ha publicado los límites que deben ser aplicados en el PAC. Los límites de corrientes armónicas son establecidos por la relación entre corriente de corto circuito dividida por la corriente de carga (ISC/IL). La corriente de corto circuito se obtiene del análisis de corto circuito mientras que la corriente de carga se obtiene del análisis de flujo de carga.

El estudio de armónicas otorga dos límites, uno para voltaje y el otro para corriente. Los límites de distorsión armónica de voltaje están

basados en el nivel de voltaje de barra, mientras que el límite de distorsión armónica de corriente está basado en la relación corriente de corto circuito dividida por la corriente de carga (ISC/IL).

Es importante mencionar que cuanto mayor es el límite permitido, más aumenta el valor de la relación ISC/IL. Esta relación es mayor a medida que el valor de la corriente de carga disminuye. Por consiguiente, a pesar de que se permite un límite mayor en la distorsión de corrientes armónicas, siendo la magnitud total de las corrientes armónicas menor, el efecto dañino en el sistema se reduce.

Considerando el estándar IEEE 519-1992, la distorsión armónica de corriente es descrita como Demanda Total de Distorsión (TDD), en lugar de Distorsión Total Armónica (THD). TDD es la distorsión armónica de corriente permitida durante un periodo de usualmente 15 o 30 minutos, mientras que THD es una toma instantánea de las corrientes armónicas. Cargas, tales como las palas en las minas, que por naturaleza de operación son cargas intermitentes no producen armónicas por un periodo de largo tiempo. Este tipo de cargas puede presentar alto contenido de distorsión armónica por un

periodo muy corto (medición THD) sin exceder los límites de TDD. El estándar IEEE 519-1992 permite que las cargas intermitentes excedan los límites de armónicas en un 50%, siempre y cuando el TDD se mantenga dentro de los límites establecidos. Los rectificadores de la refinería por su naturaleza operativa tienen un comportamiento constante en cuanto a la generación de corrientes armónicas, por consiguiente, el TDD sería el indicador apropiado para el estudio.

Los límites de distorsión permitidos son presentados en las siguientes tablas:

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas Generales de Distribución (120 V a 69 000 V) según IEEE 519-1992						
Distorsión Máxima de Corriente Armónica En Porcentaje de Corriente de Carga						
Orden Individual de Armónicas (Armónicas Impares)						
I_{sc}/I_1	<1	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<	4.	2.	1.	0.	0.	5.0
20 <	7.	3.	2.	1.	0.	8.0
50 <	10.	4.	4.	1.	0.	12.0
100 <	12.	5.	5.	2.	1.	15.0
>10	15.	7.	6.	2.	1.	20.0
Armónicas pares están limitadas a 25% de los límites de armónicas impares.						
Distorsiones de corriente que resultan en un, como half-wave converters, no están permitidos						
* Todos los equipos de generación deben de acogerse a estos límites, independientemente de la relación I_{sc}/I_1						
Donde						
I_{sc} = Máxima Corriente de Corto Circuito, 10.5 kV						
I_1 = Máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental), 10.5 kV						

Tabla 4.5. Límites de Distorsión de Corriente de 120V a 69000V

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas General de Sub-Transmisión (69 001 V a 161 000 V)						
Distorsión Máxima de Corriente Armónica En Porcentaje de Corriente de Carga						
Orden Individual de Armónicas (Armónicas Impares)						
I_{sc}/ I_1	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2.0	1	0.7	0.	0.	2.5
20<50	3.5	1.	1.2	0.	0.	4.0
50<100	5.0	2.	2.	0.7	0.	6.0
100<1000	6.0	2.	2.	1.	0	7.5
>1000	7.5	3	3.	1.2	0	10.0
Armónicas pares están limitadas a 25% de los límites de armónicas impares.						
Distorsiones de corriente que resultan en un, como half-wave converters, no están permitidos						
*Todos los equipos de generación deben de acogerse a estos límites, independientemente de la relación I_{sc}/ I_1						
Donde I_{sc} = Máxima Corriente de Corto Circuito en la SE: 9,800 A, 138kV. (valor COES) I_1 = Máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental) 47.79A, 138 kV						

Tabla 4.6. Límites de Distorsión de Corriente de 69,001 V a 161k V

Límites de Distorsión de Voltaje		
Voltaje de Barra en el PAC	Distorsión Individual de Voltaje(%)	Distorsión Total de Voltaje THD(%)
69 kV y debajo	3	5
69.001 kV a 161 kV	1	2
161.001 kV y arriba	1	1

Tabla 4.7. Límites de Distorsión de Voltaje

El estándar IEEE 519-1992 recomienda que las distorsiones de voltaje en el PAC deben ser limitadas a 5% para la mayoría de los sistemas de mediana tensión. Esto permite que las distorsiones dentro de la planta del usuario sean mayores. En general, los niveles de distorsión de armónicas de voltaje deben de ser menores de 8% para evitar sobrecalentamiento de los motores y transformadores, que es probablemente la preocupación más importante para clientes industriales. Para este estudio se determinó que el PAC es la barra de 10.5 kV de la Refinería. Para la SE

Principal el valor de corriente de Corto circuito (Isc) es 9,800 A (valor obtenido del COES) y la corriente de máxima demanda IL para la Refinería es 47.79 A. ($Isc/ IL = 9800/47.79 = 205$).

La aplicación de la NTCSE dice el decreto supremo D.S. 009-1999-EM que autoriza la Norma Técnica de Calidad del Suministro Eléctrico del Perú, revisada a diciembre del 2006, establece los límites de distorsión armónica de voltaje permitidos por el suministrador de energía y por el consumidor. El cuadro número 4 resume los límites de distorsión de voltaje para barras de alta y muy alta tensión y para media y baja tensión. Para barras de media y baja tensión el límite de distorsión de voltaje (THD) de acuerdo a la NTCSE es de 8% como muestra el cuadro inferior.

ORDEN (n) DE LA ARMONICA ó THD	TOLERANCIA Máx y THDI (% con respecto a la Tensión Nominal del Punto de Medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armonicas Impares no multiples de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1 - 2.5 %	0.2 - 1.5 %
(Armonicas Impares Multiples de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.5	0.5
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8%

* Tabla según D.S. N° 009-1999-EM, publicado el 1999-04-11

Tabla 4.8. Límites de Voltaje según la NTCSE

La Norma Técnica de Calidad no toma en consideración las corrientes armónicas las cuales son las que generan la distorsión de voltaje y por lo tanto no considera la raíz de los problemas de armónicas. Por este motivo se utilizará el estándar IEEE 519-1992 para realizar este estudio. La NTCSE será usada solo para asegurar que los límites recomendados para la barra de 138 kV no sean excedidos y así evitar que se tenga que incurrir en alguna penalidad por distorsión armónica.

4.3.6 Resultados de los Cálculos

El análisis de armónicas de un sistema eléctrico comprende el cálculo de flujo de carga para la frecuencia fundamental (60 Hz) en todas las barras principales y un cálculo similar de flujo de carga para cada frecuencia armónica.

Un segundo análisis es realizado para calcular la impedancia paralela en las barras principales donde existen cargas. Este análisis es realizado por el ETAP para determinar el valor de la impedancia paralela para una gama de frecuencias. Si la impedancia paralela es alta a una determinada frecuencia esto indicaría un posible estado de resonancia.

El flujo de carga fue realizado ingresando ciertas condiciones de análisis, entre ellas se estableció los límites para una condición marginal y para una condición crítica. Estos límites son usados en el reporte de voltaje ETAP de alarmas. A continuación los límites ingresados:

Voltaje:

Critica Level (Nivel Crítico):	Low	95% del Voltaje Nominal
	High	110% del Voltaje Nominal
Margina Level (Nivel Marginal):	Low	98% del Voltaje Nominal
	High	105% del Voltaje Nominal

A continuación damos un pequeño resumen y descripción de los reportes emitidos por el software ETAP para facilitar su lectura.

Las primeras páginas del informe final emitido por ETAP contienen información general del diagrama unifilar analizado. Allí se encuentra indicado el número total de Barras de Generación, números de Barras de Carga, número total de Ramales. Para describir el informe ETAP se ha tomado el Escenario 5 se encuentra 01 barra swing de Generación, 0 Barras con Control de Voltaje, 35 Barras de Carga y un total de 36 Circuitos Ramales donde están transformadores, cables, impedancias e interruptores de barra. Además se indica que se uso el método de

solución Accelerated Gauss-Seidel con un número máximo de iteraciones de 2000 y una precisión de 0.000001

El reporte ETAP titulado “Bus Input Data” muestra cada una de las barras analizadas en el estudio, con su respectiva identificación, nivel de voltaje, voltaje inicial. Para el caso en que la barra sea de carga (y tenga carga directamente conectada) se muestra si esta es de KVA constante o de Z constante.

En forma similar, las siguientes hojas del informe ETAP muestra la información ingresada manualmente para los diferentes elementos incluidos en el unifilar y los parámetros técnicos correspondientes a las líneas de transmisión, cables, transformadores e impedancias. Para los casos de los transformadores, cables y líneas de transmisión los valores de impedancia están indicados en %, Secuencia Positiva, en Base de 100MVA. En algunos casos los datos técnicos usados para el estudio han sido obtenidos de la información de campo proporcionada y en otros casos obtenidos de las librerías del software ETAP con datos típicos. La información base es esencial para que exista una convergencia entre los resultados del modelo matemático ETAP del diagrama unifilar de la Refinería con las lecturas reales de energía en la Sub estación principal de la misma.

Los resultados del análisis de Flujo de Carga, “Fundamental Load Flow Report”, muestran los cálculos realizados por ETAP en un formato usado para mostrar los flujos de energía activa y reactiva. Está dividido verticalmente en dos áreas. El área del lado izquierdo se muestran cuatro columnas: la barra con su indicativo, su nivel de voltaje, si es barra de generación o de carga. Si es barra de Generación, el monto de energía activa y reactiva total que suministra, si es barra de Carga, el monto de energía activa y reactiva que recibe.

El área del lado derecho de la página se muestra todas aquellas barras con su identificación que reciben o inyectan energía activa y reactiva de/hacia la barra identificada en el lado extremo izquierdo y puede leerse el amperaje y el factor de potencia en % para cada barra.

La suma algebraica del flujo de energía de todas las barras del lado derecho debe ser igual a la suma de la energía de la barra indicada en el lado extremo izquierdo.

En cuanto al reporte sobre el análisis de armónicas, el reporte titulado System Harmonics Information elaborado por el software ETAP provee el ID de las barras, su kV, y en lo que respecta a la distorsión

de voltaje y distorsión de corriente nos da la distorsión para: Fund. %, RMS %, ASUM%, THD% y TIF.

El reporte Bus Tabulation elaborado por el software ETAP provee el ID de las barras, su fundamental kV y su harmonic voltaje (% fundamental voltage) como también su nominal kV y su harmonic voltage (% nominal voltage).

En el reporte ETAP lista las barras que exceden el límite de distorsión total de voltaje. El reporte concluye con un resumen de las alarmas críticas que indica en que barras la distorsión armónica excede el valor limite.

El flujo de carga fundamental, los valores de demanda calculados por el software son similares a los valores medidos en el campo y obtenidos de los medidores que se encuentran instalados en la Planta de Refinería y en las Subestación Principal. La siguiente tabla 4.9 muestra los valores de flujo de carga Fundamental correspondiente al escenario 5.

Bus ID	Nominal kV	Voltage Operación %	MW Loading
R-BUS 9500REF138-1	138	100 %	11.45
R-Bus950-1	10.5	99.47 %	11.44
R-Bus950-2	10.5	99.47 %	1.86
R-BusFILTROSnew	10.5	99.5 %	0.00
R-BusR25kA	10.5	99.42 %	0.71
R-BusR40kA	10.5	99.32 %	8.87

Tabla 4.9. Valores calculados por ETAP

BARRA	VALORES MEDIDOS				VALORES CALCULADOS ETAP			
	MW	MVAR	KV	%FP	MW	MVAR	kV %Mag	%FP
R-Bus 9500REF138-1	11.13	2.64	ND	ND	11.45	2.19	100.00	98.2
R-Bus950-1	11.12	2.34	ND	ND	11.44	1.88	99.47	98.7
R-Bus950-2	—	—	—	—	1.86	0.83	99.47	91.4
R-BusFILTROSnew	-0.03	-4.47	ND	ND	0.00	4.78	99.50	0.0
R-BusR25kA	0.68	0.79	ND	ND	0.71	0.72	99.42	70.0
R-BusR40kA	9.04	4.99	ND	ND	8.87	5.09	99.32	86.7
CORRIENTE TOTAL DE ALIMENTACION A LA PLANTA REFINERIA ILO	47.79 A pf 97.3%				48.8A pf 98.2%			
DEMANDA TOTAL DE LA PLANTA REFINERIA ILO, 138 kV	MW	MVAR	A	pf	MW	MVAR	A	pf
	11.13	2.64	47.79	97.3	11.45	2.19	48.8	98.2

Nota: ND = no disponible

Tabla 4.10. Comparación de valores Medidos y valores Calculados

A continuación análisis del escenario 1:

Comportamiento del sistema eléctrico de la Planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 KV, bajo la operación de los rectificadores de 1 x 12, 2 x 15 kA y los filtros antiguos Westinghouse.

La siguiente tabla resume los valores de demanda calculados por el software para la Planta de Refinería y la S.E. Principal de acuerdo con el Escenario 1.

BARRA	VALORES CALCULADOS ETAP				
	MW	MVAR	kV %Mag	%FP	
R-BUS 9500REF138-1	11.27	4.82	100.00	91.9	
R-Bus950-1 (10.5kV)	11.26	5.16	101.04	90.9	
R-Bus950-2 (10.5kV)	2.56	1.18	101.04	90.9	
R-BusFIL TROS old (10.5kV)	8.70	6.34	101.06	80.8	
R-BusR30kA_MT (7.85kV)	8.68	3.82	100.60	91.5	
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	1.20	0.52	100.54	91.7	
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	1.37	0.59	100.54	91.8	
R-BusMP (3.8kV)	0.14	0.07	100.22	88.7	
R-Bus L1 (3.8kV)	0.76	0.27	100.04	94.4	
CORRIENTE TOTAL DE ALIMENTACION A LA PLANTA REFINERIA		51.3 A pf 91.9%			
DEMANDA TOTAL DE LA PLANTA REFINERIA ILO		MW	MVAR	A	pf
		11.27	4.82	51.3	91.9

Tabla 4.11. Valores Calculados-Escenario 1

La siguiente tabla muestra una lista de las barras principales de la Planta de Refinería indicando la diferencia de voltaje con referencia al voltaje nominal. (en %).

BARRA	VOLTAJE NOMINAL (kV)	VOLTAJE DE OPERACION (kV)	DIFERENCIA %
R-BUS 9500REF138-1	138.00	138.0	0.00
R-Bus950-1	10.5	10.61	+ 1.05
R-Bus950-2	10.5	10.61	+ 1.05
R-BusFILTROSold	10.5	10.61	+ 1.05
R-BusR30kA_MT	7.85	7.90	+0.64
R-Bus3,8_1	3.8	3.82	+ 0.53
R-Bus3,8_2	3.8	3.82	+ 0.53
R-BusMP	3.8	3.81	+0.26
R-Bus L1	3.8	3.80	0.00

Tabla 4.12. Voltaje de Operación de Barras-Escenario 1

A continuación análisis del escenario 5:

Comportamiento del sistema eléctrico de la planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 kV, bajo la operación de los rectificadores nuevos FRIEM de 2 x 20, 1 x 25 kA. y los nuevos Filtros Friem.

La siguiente tabla resume los valores de demanda calculados por el software Etap para la Planta de Refinería y la Subestación Principal de acuerdo con el Escenario 5.

BARRA	VALORES CALCULADOS				
	MW	MVAR	kV %Mag	%FP	
R-BUS 9500REF138-1	11.45	2.19	100.00	98.2	
R-Bus950-1 (10.5kV)	11.44	1.88	99.47	98.7	
R-Bus950-2 (10.5kV)	1.86	0.83	99.47	91.4	
R-BusFILTROSnew (10.5kV)	0.00	4.78	99.50	0.0	
R-BusR25kA (10.5kV)	0.71	0.72	99.42	70.0	
R-BusR40kA (10.5kV)	8.87	5.09	99.32	86.7	
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	1.85	0.78	98.69	92.2	
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	0.82	0.30	98.69	94.0	
R-Bus ANOD (3.8kV)	0.35	0.14	98.58	92.8	
R-Bus TH (3.8kV)	0.58	0.29	98.54	89.4	
R-BusMP (3.8kV)	0.14	0.07	98.37	88.7	
R-Bus L1 (3.8kV)	0.76	0.27	98.18	94.4	
CORRIENTE TOTAL DE ALIMENTACION A LA PLANTA REFINERIA ILO		48.8 A pf 98.2 %			
DEMANDA TOTAL DE LA PLANTA REFINERIA ILO		MW	MVAR	A	pf
		11.45	2.19	48.8	98.2

Tabla 4.13. Valores Calculados-Escenario 5

El siguiente cuadro muestra una lista de las barras principales de la Planta de Refinería indicando la diferencia de voltaje con referencia al voltaje nominal. (en %)

BARRA	VOLTAJE NOMINAL (kV)	VOLTAJE DE OPERACION (kV)	DIFERENCIA %
R-BUS 9500REF138-1	138.00	138.0	0.00
R-Bus950-1	10.5	10.44	-0.57
R-Bus950-2	10.5	10.44	-0.57
R-BusFILTROSnew	10.5	10.45	-0.48
R-BusR25kA	10.5	10.44	-0.57
R-BusR40kA	10.5	10.43	-0.67
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	3.8	3.75	-1.32
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	3.8	3.75	-1.32
R-Bus ANOD	3.8	3.75	-1.32
R-Bus TH	3.8	3.75	-1.32
R-BusMP	3.8	3.74	-1.58
R-Bus L1	3.8	3.73	-1.84

Tabla 4.14. Voltaje de Operación de Barras-Escenario 5

A continuación análisis del escenario 6:

Comportamiento del sistema eléctrico de la planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 kV, bajo la operación de los rectificadores de 2 x 15, 2 x 20, 1 x 25 kA. Incluyendo los filtros antiguos Westinghouse y los filtros nuevos Friem. La siguiente tabla resume los valores de demanda calculados por el software Etap para la Planta de Refinería y la S.E. Principal de acuerdo con el Escenario 6.

BARRA	VALORES CALCULADOS				
	MW	MVAR	kV %Mag	%FP	
R-BUS 9500REF138-1	20.19	-3.58	100.00	-98.5	
R-Bus950-1 (10.5kV)	20.16	4.52	100.78	-97.6	
R-Bus950-2 (10.5kV)	1.89	0.84	100.78	91.4	
R-BusFILTROSnew (10.5kV)	0.00	4.90	100.81	0.00	
R-BusFILTROSold (10.5kV)	8.69	6.28	100.79	-81.1	
R-BusR25kA (10.5kV)	0.71	0.72	100.72	70.1	
R-BusR40kA (10.5kV)	8.87	5.08	100.63	86.8	
R-BusR30kA MT (7.85kV)	8.69	3.82	100.33	91.5	
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	0.86	0.36	100.42	92.2	
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	0.99	0.42	100.42	92.2	
R-Bus ANOD (3.8kV)	0.36	0.14	100.31	92.8	
R-Bus TH (3.8kV)	0.58	0.29	100.27	89.4	
R-BusMP (3.8kV)	0.14	0.07	100.10	88.7	
R-Bus L1 (3.8kV)	0.76	0.27	99.92	94.4	
CORRIENTE TOTAL DE ALIMENTACION A LA PLANTA REFINERIA ILO		85.8 A pf -98.5 %			
DEMANDA TOTAL DE LA PLANTA REFINERIA ILO		MW	MVAR	A	pf
		20.19	-3.58	85.8	-98.5

Tabla 4.15. Valores Calculados-Escenario 6

El siguiente cuadro muestra una lista de las barras principales de la Planta de Refinería indicando la diferencia de voltaje con referencia al voltaje nominal. (en %)

BARRA	VOLTAJE NOMINAL (kV)	VOLTAJE DE OPERACION (kV)	DIFERENCIA %
R-BUS 9500REF138-1	138.00	138.0	0.00
R-Bus950-1	10.5	10.58	+ 0.76
R-Bus950-2	10.5	10.58	+ 0.76
R-BusFILTROSnew	10.5	10.59	+0.86
R-BusFILTROSold	10.5	10.58	+ 0.76
R-BusR25kA	10.5	10.58	+ 0.76
R-BusR40kA	10.5	10.57	+ 0.67
R-BusR30kA MT	7.85	7.88	+ 0.38
R-Bus3,8_1	3.8	3.82	+ 0.53
R-Bus3,8_2	3.8	3.82	+ 0.53
R-Bus ANOD	3.8	3.81	+ 0.26
R-Bus TH	3.8	3.81	+ 0.26
R-BusMP	3.8	3.804	+ 0.11
R-Bus L1	3.8	3.797	- 0.08

Tabla 4.16. Voltaje de Operación de Barras-Escenario 6

4.3.7 Armónicas

Se aplico el siguiente criterio de análisis: Para poder comparar los resultados del análisis de armónicas del software ETAP con los límites de corriente armónica establecidos por el Estándar IEEE 519-1992 es necesario calcular la relación I_{sc}/I_L de los ramales de distribución principales de la planta Refinería. La relación I_{sc}/I_L trata de ponderar el impacto de las corrientes armónicas con la corriente de corto circuito del sistema eléctrico bajo consideración. Para ello se ha utilizado el escenario BASE con todos los rectificadores y todas las cargas del diagrama unifilar de la Refinería en posición conectado y

en operación. Para este caso de estudio, la categoría de la demanda de las cargas ha sido el valor de DISEÑO.

Calculo de Limites de Armónicas				
BARRA	PLANTA REFINERIA ILO			
	I ₁ Carga (A)	Isc Corto Circuito (A)	Isc/ I ₁	IEEE 519 Limite TDD(%)
R-BUS 9500REF138-1	105.4	9800 coes	92.98	6.0
R-Bus950-1 (10.5kV)	1384.8	18600	13.43	5.0
R-Bus950-2 (10.5kV)	157.9	18600	117.80	15.0
R-BusFILTROsnew	265.9	18200	68.45	12.0
R-BusFILTROSold (10.5kV)	625.2	18400	29.43	8.0
R-BusR25kA (10.5kV)	98.4	15700	159.55	15.0
R-BusR40kA (10.5kV)	670.1	17500	26.12	8.0
R-BusR30kA MT (7.85kV)	807.7	18300	22.66	8.0
R-Bus3,8 1 (3.8kV)	203.5	23200	114.00	15.0
R-Bus3,8 2 (3.8kV)	232.8	23200	99.66	12.0
R-Bus ANOD (3.8kV)	58.4	16700	285.96	15.0
R-Bus TH (3.8kV)	98.2	18000	183.30	15.0
R-BusMP (3.8kV)	24.1	8000	331.95	15.0
R-Bus L1 (3.8kV)	123.1	14400	116.98	15.0

Tabla 4.17. Cálculo de Límites de Armónicas, (Escenario Base, Máxima Demanda LF y SC)

A continuación análisis del escenario 1: Comportamiento del sistema eléctrico de la planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 KV, bajo la operación de los rectificadores 1 x12, 2 x15 kA y los filtros antiguos Westinghouse. Flujo de cargas armónicas en las ramas principales de la Planta de Refinería, utilizando el Escenario 1.

Flujo de Carga Armónicas				
PLANTA REFINERIA ILO				
BARRA	V THD (%)	Límite V THD (%)	I THD (%)	Límite I TDD (%)
R-BUS 9500REF138-1	0.00	2.5	0.15	6.0
R-Bus950-1 (10.5kV)	0.06	5	0.15	5.0
R-Bus950-2 (10.5kV)	0.06	5	6.36	15.0
R-BusFILTROSold (10.5kV)	0.05	5	1.55	8.0
R-BusR30kA MT (7.85kV)	1.09	5	8.54	8.0
R-Bus3,8 1 (3.8kV)	0.53	5	6.36	15.0
R-Bus3,8 2 (3.8kV)	0.53	5	6.36	12.0
R-BusMP (3.8kV)	0.53	5	0.43	15.0
R-Bus L1 (3.8kV)	0.53	5	0.46	15.0
Filtros de Armónicas	Diseño Corriente (A)	ASUM (A)		Sobrecargado
Filtro 5ta	295	297.41		SI
Filtro 7ma	130	133.77		SI
Filtro 11ra	85	204.84		SI
Filtro 13ra	57			

Tabla 4.18. Flujo de Cargas Armónicas-Escenario 1

La barra R-BusR30kA_MT (7.85kV) excede el límite de distorsión de corriente armónica establecida. Sin embargo, esto es normal ya que en esta barra se encuentran conectados los rectificadores que generan las corrientes armónicas.

A continuación análisis del escenario 5: Comportamiento del sistema eléctrico de la planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 kV, bajo la operación de los rectificadores nuevos FRIEM de 2 x 20, 1 x 25 kA. y los nuevos filtros Friem.

Flujo de cargas armónicas en las ramas principales de la Planta Refinería utilizando el Escenario 5.

Flujo de Cargas Armónicas				
PLANTA REFINERÍA ILO				
BARRA	V THD (%)	Límite V THD (%)	I THD (%)	Límite I TDD (%)
R-BUS 9500REF138-1	0.43	2.5	2.29	6.0
R-Bus950-1 (10.5kV)	1.59	5	2.29	5.0
R-Bus950-2 (10.5kV)	1.59	5	0.96	15.0
R-BusFILTROSnew	1.55	5	15.23	12.0
R-BusR25kA (10.5kV)	1.62	5	27.57	15.0
R-BusR40kA (10.5kV)	1.78	5	9.27	8.0
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	1.38	5	0.96	15.0
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	1.38	5	Desconectado	12.0
R-Bus ANOD (3.8kV)	1.38	5	1.10	15.0
R-Bus TH (3.8kV)	1.38	5	0.95	15.0
R-BusMP (3.8kV)	1.38	5	0.95	15.0
R-Bus L1 (3.8kV)	1.37	5	0.93	15.0
Filtros de Armónicas	Diseño Corriente (A)	ASUM (A)		Sobrecargado
Filtro 5ta	150	114.66		NO
Filtro 7ma	130	112.88		NO
Filtro 11ava	140	121.04		NO

Tabla 4.19. Flujo de Cargas Armónicas-Escenario 5

Las barras R-BusFILTROSnew, R-BusR25kA (10.5kV) y R-BusR40kA (10.5kV) exceden los límites de distorsión de corriente armónica establecidos. Sin embargo, esto es normal ya que en las barras R-BusR25kA (10.5kV) y R-BusR40kA (10.5kV) se encuentran conectados los rectificadores que generan las corrientes armónicas. Similarmente, es normal que la barra R-BusFILTROSnew exceda los límites de distorsión armónica ya que en esta se encuentran conectados los filtros de armónicas, cuyo papel es atraer las armónicas del sistema para que sean filtrados y no dañen los otros equipos en el sistema eléctrico de la Refinería.

A continuación análisis del escenario 6: Comportamiento del sistema eléctrico de la planta de Refinería, especialmente en barras de 10.5 kV, bajo la operación de los rectificadores de 2 x 15, 2 x 20, 1 x 25 kA, incluyendo los filtros antiguos Westinghouse y los filtros nuevos Friem. Flujo de cargas armónicas en las ramas principales de la Planta Refinería utilizando el Escenario 6.

Flujo de Cargas Armónicas				
PLANTA REFINERIA ILO				
BARRA	V THD (%)	Límite V THD (%)	ITHD (%)	Límite I TDD (%)
R-BUS 9500REF138-1	0.1	2.5	0.47	6.0
R-Bus950-1 (10.5kV)	0.6	5	0.47	5.0
R-Bus950-2 (10.5kV)	0.6	5	0.43	15.0
R-BusFILTROSnew	0.6	5	6.44	12.0
R-BusFILTROSold (10.5kV)	0.6	5	5.99	8.0
R-BusR30kA_MT (7.85kV)	1.2	5	8.52	8.0
R-Bus3,8_1 (3.8kV)	0.6	5	0.44	15.0
R-Bus3,8_2 (3.8kV)	0.6	5	0.44	12.0
R-BusR25kA (10.5kV)		5	27.95	15.0
R-BusR40kA (10.5kV)		5	9.40	8.0
R-Bus ANOD (3.8kV)	0.6	5	0.51	15.0
R-Bus TH (3.8kV)	0.6	5	0.44	15.0
R-BusMP (3.8kV)	0.6	5	0.44	15.0
R-Bus L1 (3.8kV)	0.6	5	0.42	15.0
Filtros de Armónicas	Diseño Corriente (A)	ASUM (A)	Sobrecargado	
Filtro 5ta new	150	104.31	NO	
Filtro 7ma new	130	103.91	NO	
Filtro 11ava new	140	88.57	NO	
Filtro 5ta old	295	304.32	SI	
Filtro 7ma old	130	135.76	SI	
Filtro 11ava old	85	234.63	SI	
Filtro 13ava old	57			

Tabla 4.20. Flujo de Cargas Armónicas-Escenario 6

Las barras R-BusR30kA_MT (7.85kV), R-BusR25kA (10.5kV) y R-BusR40kA (10.5kV) exceden los límites de distorsión de corriente armónica establecidos. Sin embargo, esto es normal ya que en estas barras se encuentran conectados los rectificadores que generan las corrientes armónicas. Así mismo, se puede notar que las barras R-BusFILTROSnew y R-BusFILTROSold (10.5kV) contienen un alto valor de distorsión armónica ya que en esta se encuentran conectados los filtros de armónicas, cuyo papel es atraer las armónicas del sistema para que sean filtrados y no dañen los otros equipos en el sistema eléctrico de la Refinería.

A continuación análisis de impedancia armónica de las barras:

El software ETAP permite realizar y graficar los diagramas de impedancia de una barra cuando se varía la frecuencia del sistema eléctrico. Esta herramienta permite analizar cuál es la impedancia del sistema eléctrico para la frecuencia que corresponde a las armónicas que pudieran existir en el sistema. Si la impedancia, por ejemplo, para la frecuencia 420 Hz (7ma armónica) es muy alta y el sistema eléctrico contiene corrientes armónicas en esa frecuencia, se puede concluir que las corrientes armónicas van a interactuar con esta impedancia y producir un alto voltaje armónico en el sistema eléctrico de la refinería.

Idealmente se desearía no tener ninguna alta impedancia para una frecuencia de un sistema eléctrico que contiene corrientes armónicas, para así evitar cualquier posibilidad de resonancia paralela. Sin embargo esto no es posible en la mayoría de los casos ya que todo sistema eléctrico que contiene capacitancia (C), inductancia (L) y resistencia (R) va a tener una frecuencia de resonancia inversamente proporcional a la raíz cuadrada de LC.

Los siguientes diagramas muestran la impedancia del sistema en las barras de 138kV y 10.5 kV de la Refinería según los escenarios 1, 5 y 6.

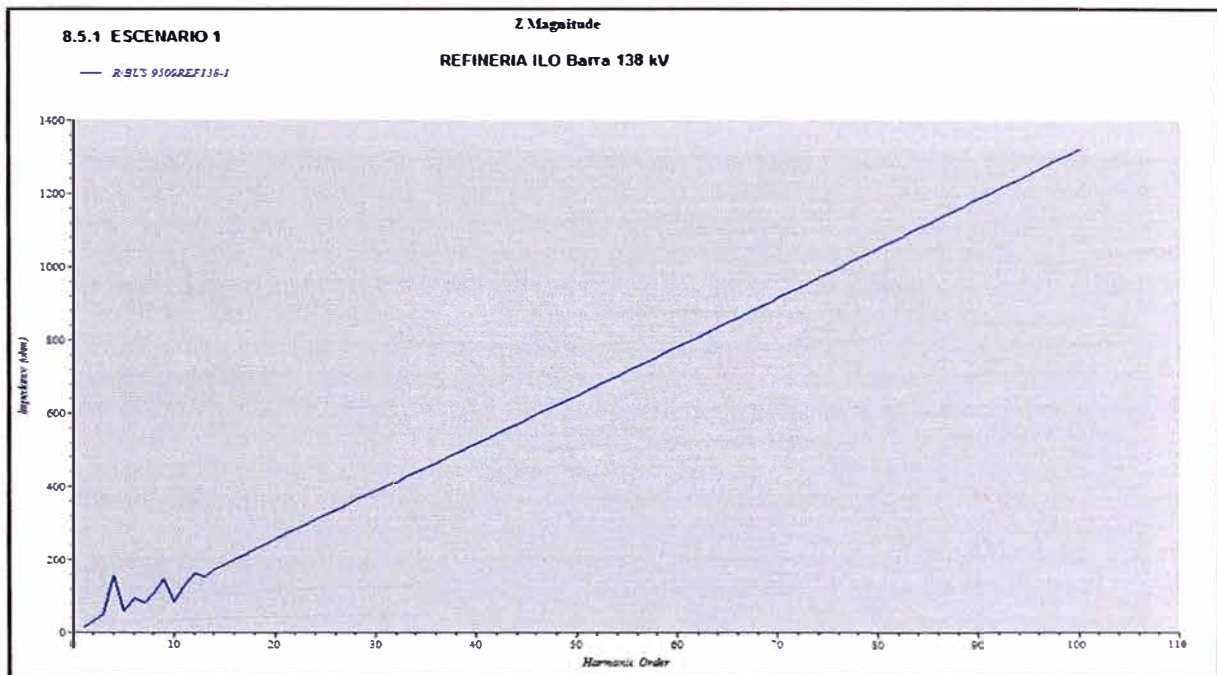


Figura 4.1. Diagrama de Impedancia R.BUS 9506REF138-Escenario 1

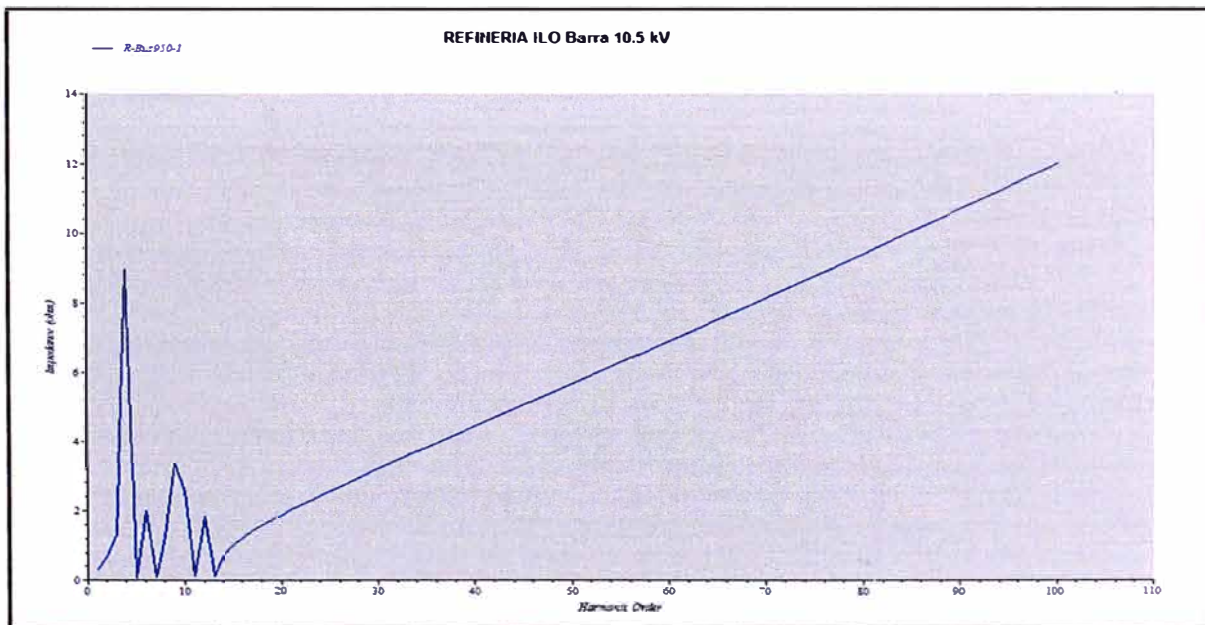


Figura 4.2. Diagrama de Impedancia R.BUS 950-1-Escenario 1

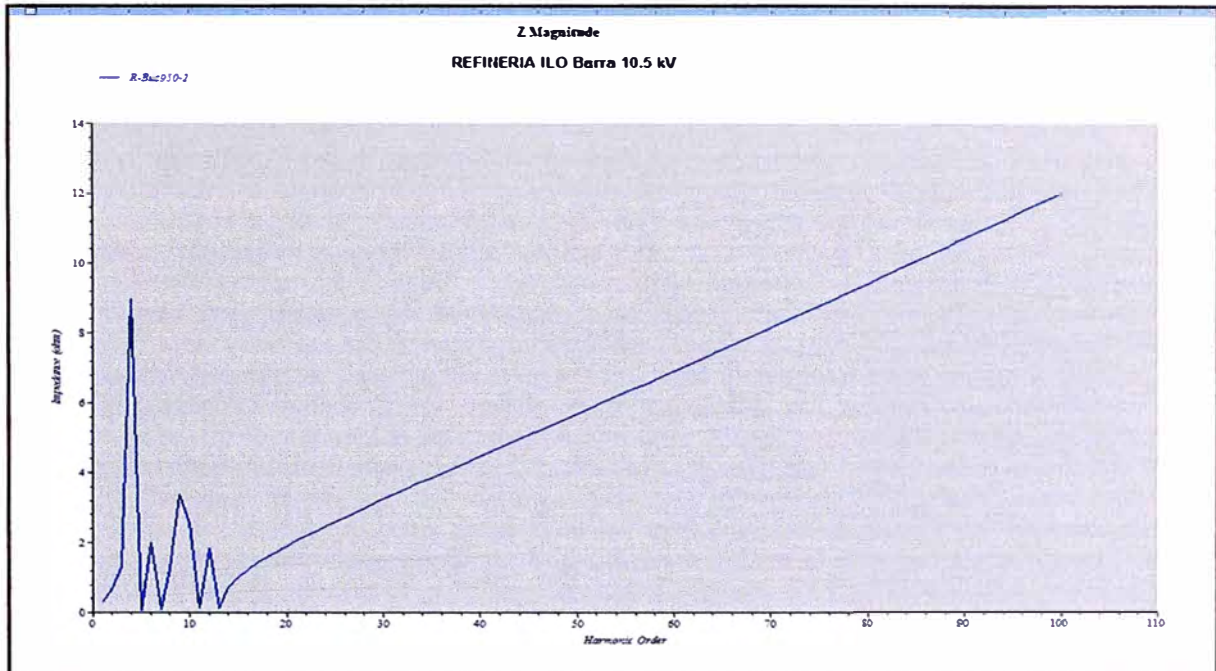


Figura 4.3. Diagrama de Impedancia R.BUS 950-2 -Escenario 1

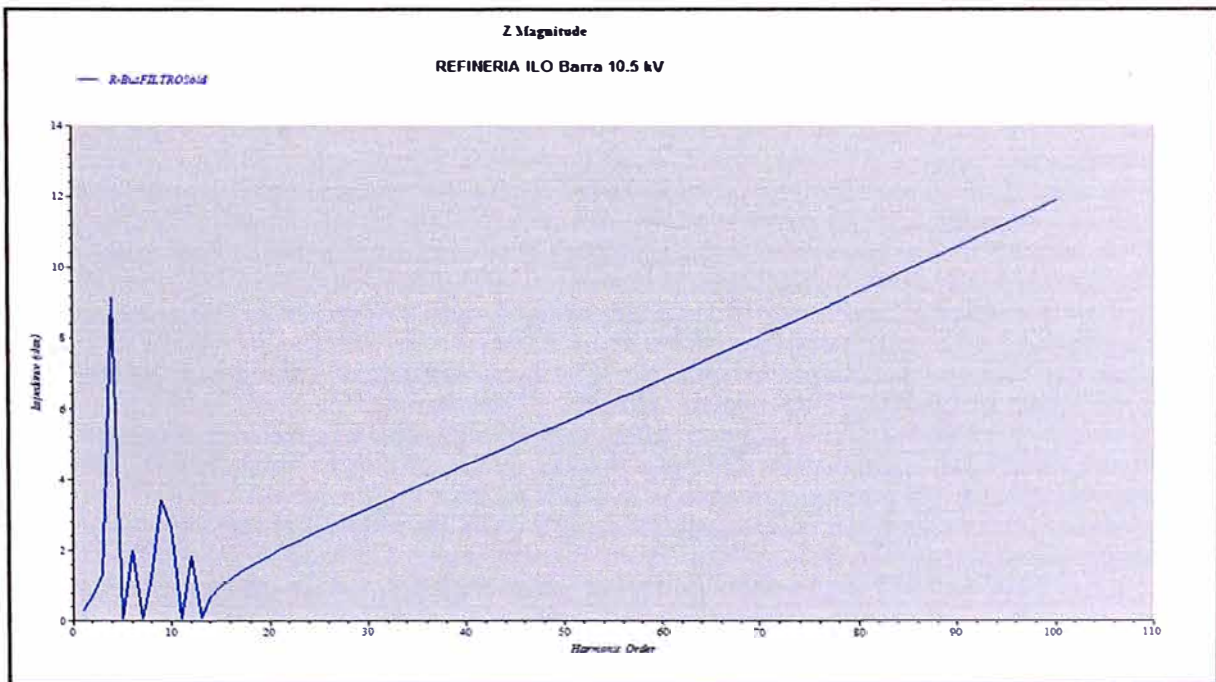


Figura 4.4. Diagrama de Impedancia R.BUSFILTERSOLD -Escenario 1

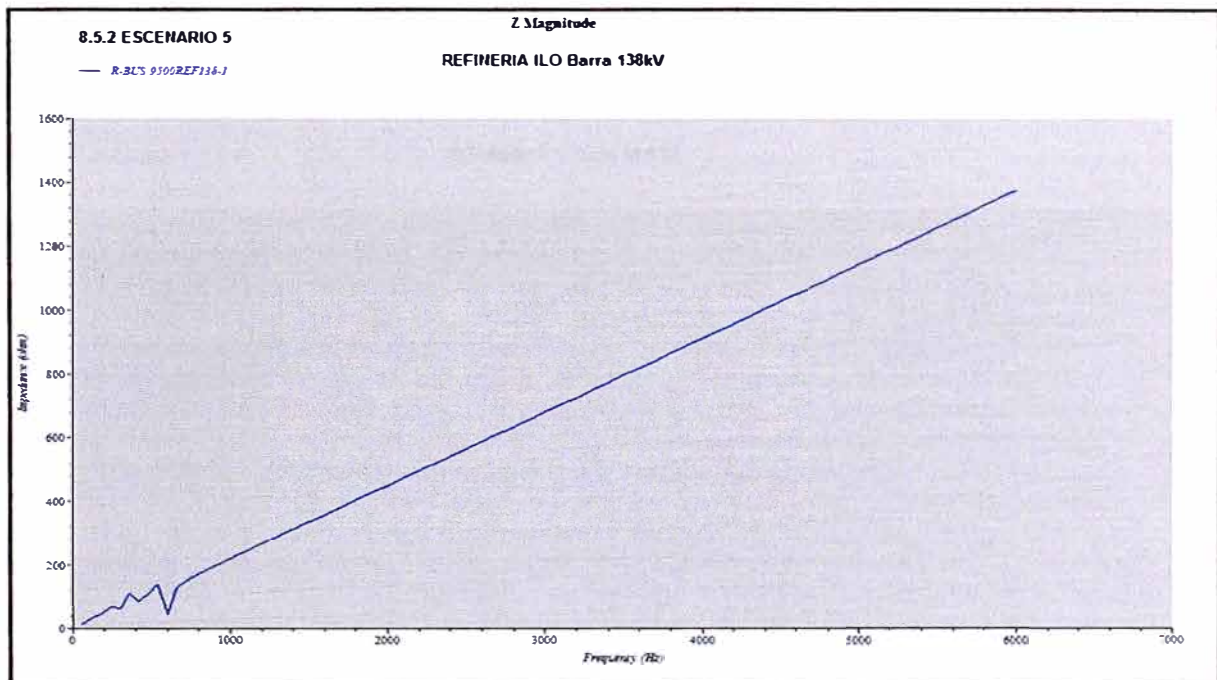


Figura 4.5. Diagrama de Impedancia R.BUS9500REF138-1-Escenario 5

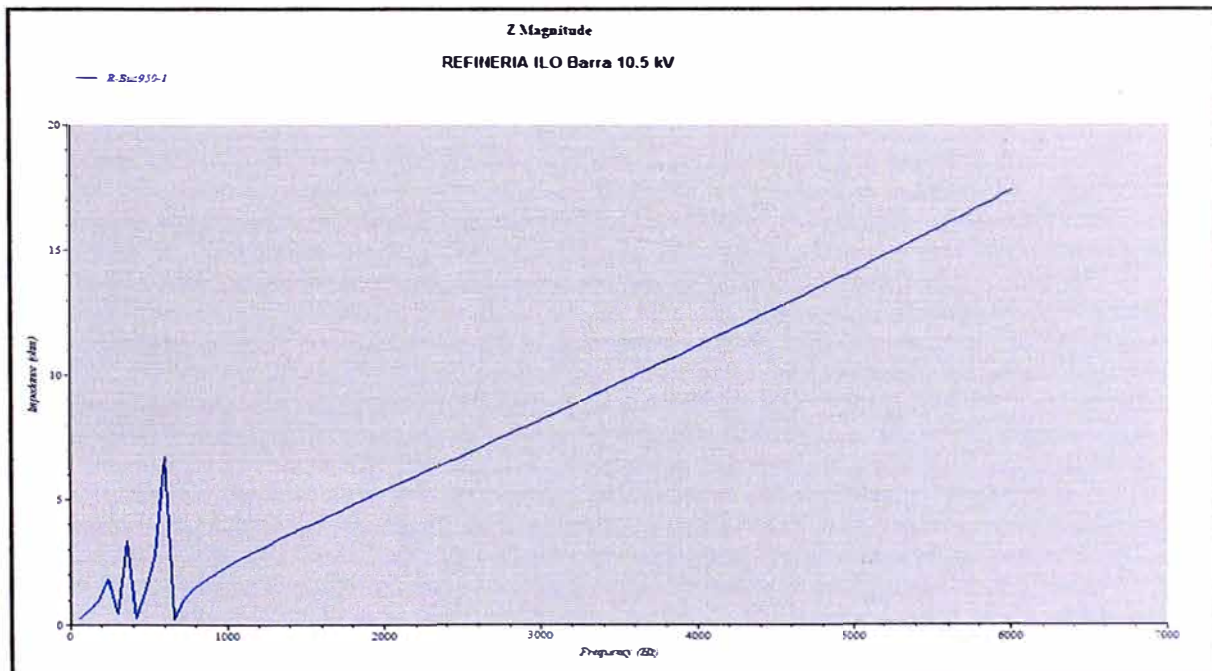


Figura 4.6. Diagrama de Impedancia R.Bus950-1-Escenario 5

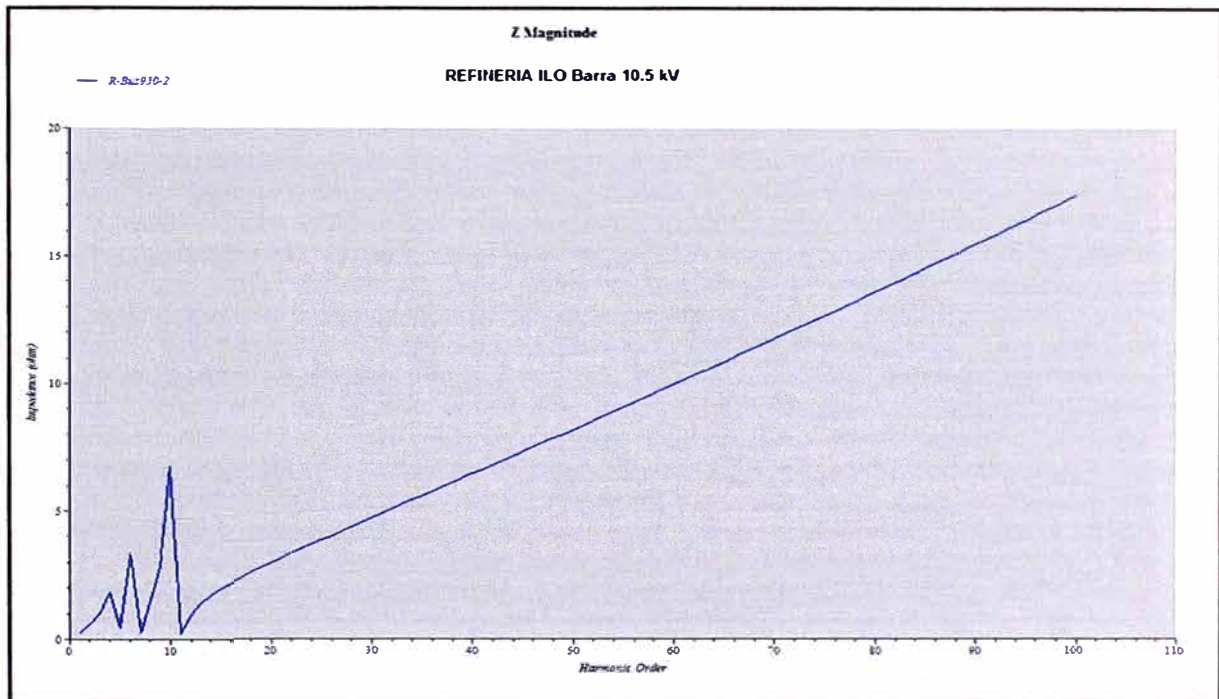


Figura 4.7. Diagrama de Impedancia R.Bus950-2-Escenario 5

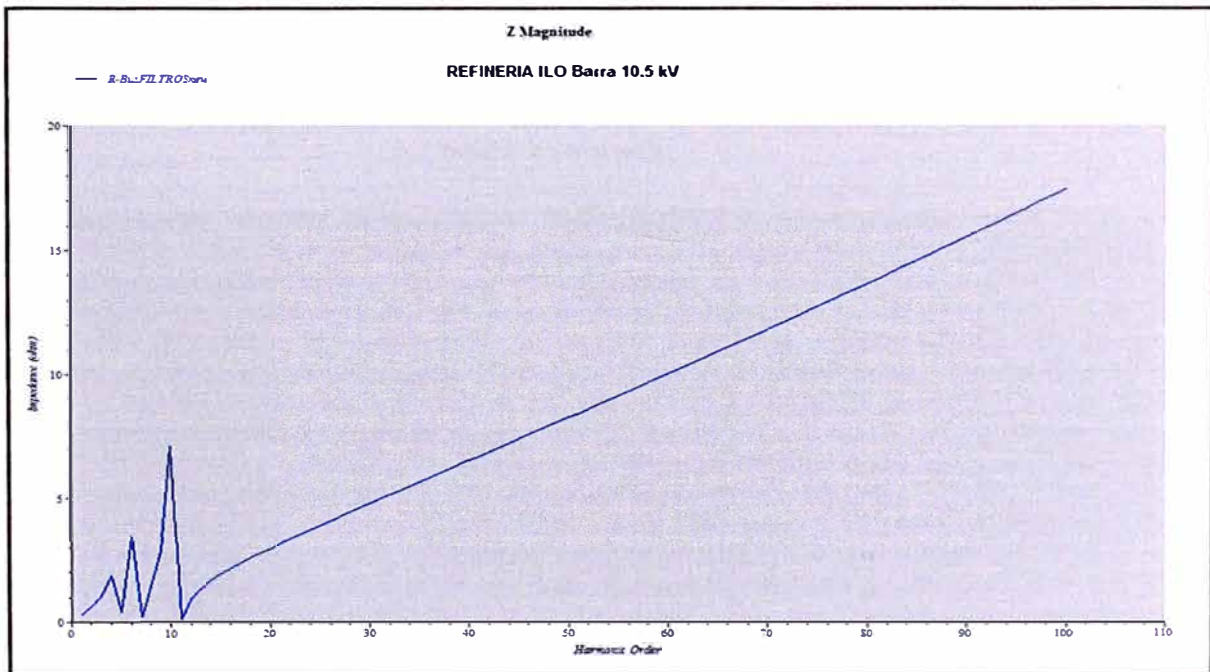


Figura 4.8. Diagrama de Impedancia R.BusFILTRONew-Escenario 5

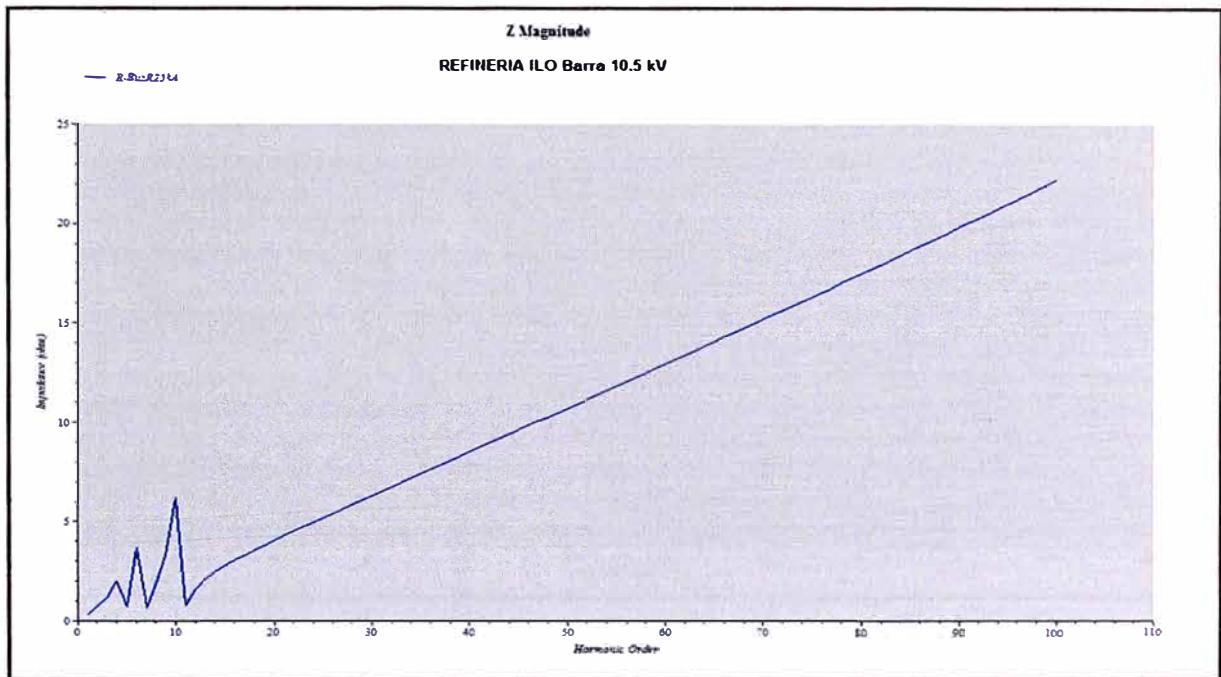


Figura 4.9. Diagrama de Impedancia R.BusR25kA-Escenario 5

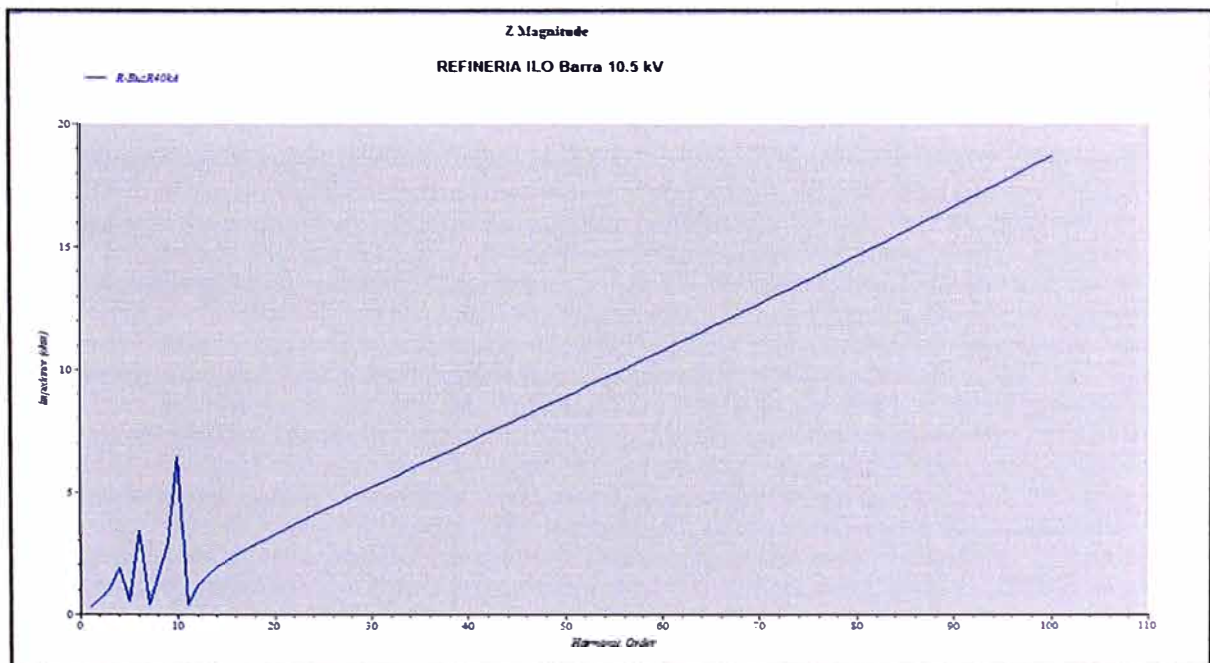


Figura 4.10. Diagrama de Impedancia R.BusR40kA-Escenario 5

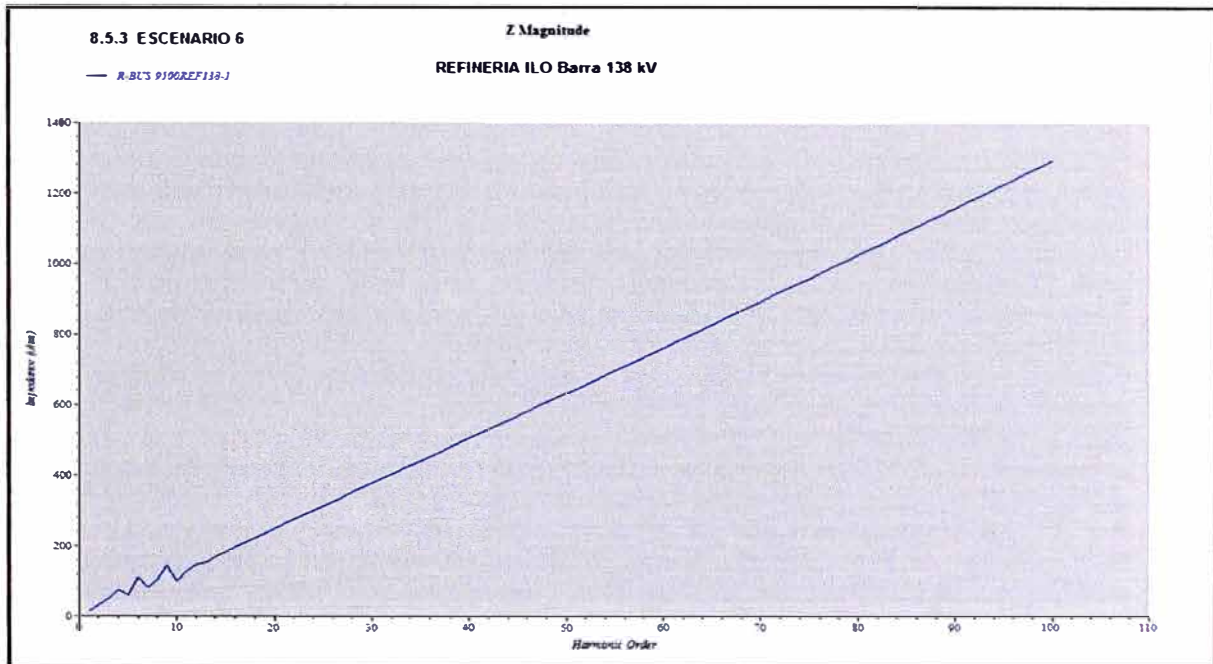


Figura 4.11. Diagrama de Impedancia R.Bus9500REF138-1-Escenario 6

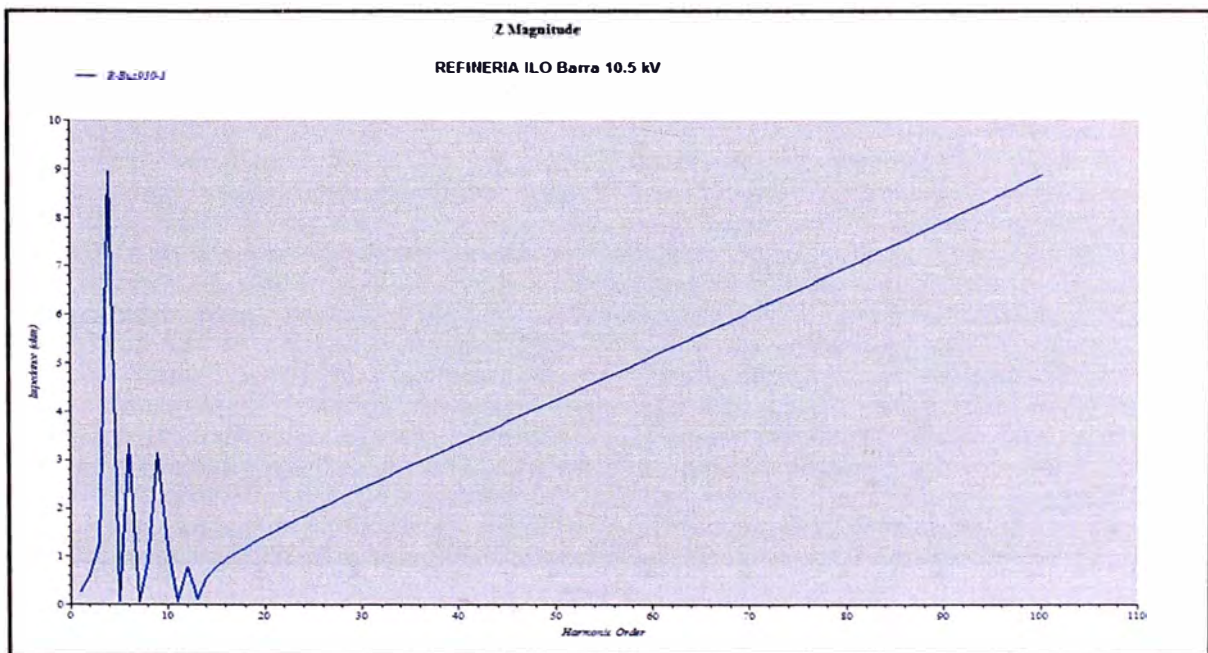


Figura 4.12. Diagrama de Impedancia R.Bus950-1-Escenario 6

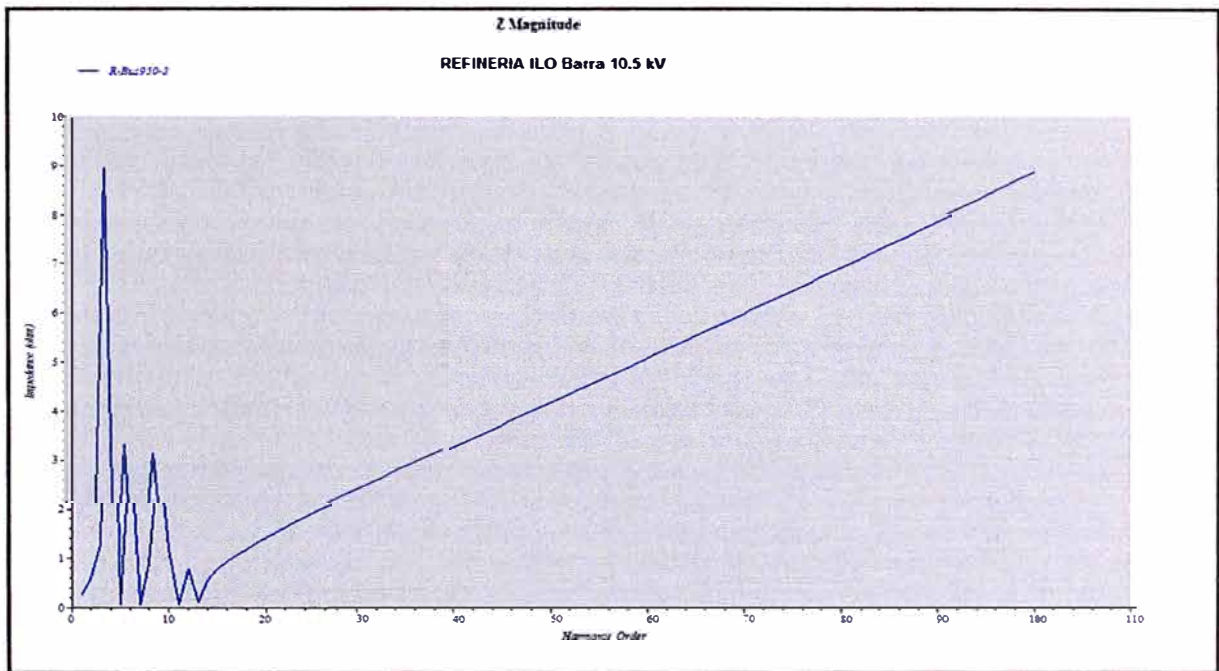


Figura 4.13. Diagrama de Impedancia R.Bus950-2-Escenario 6

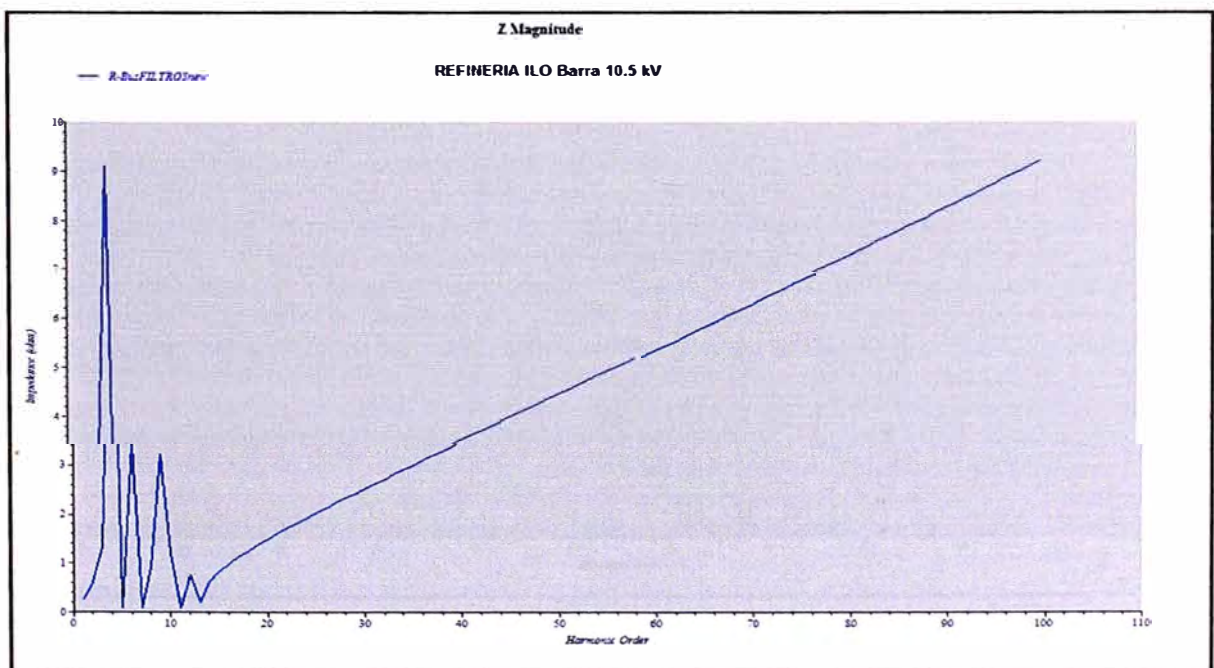


Figura 4.14. Diagrama de Impedancia R.BusFILTROSnew-Escenario 6

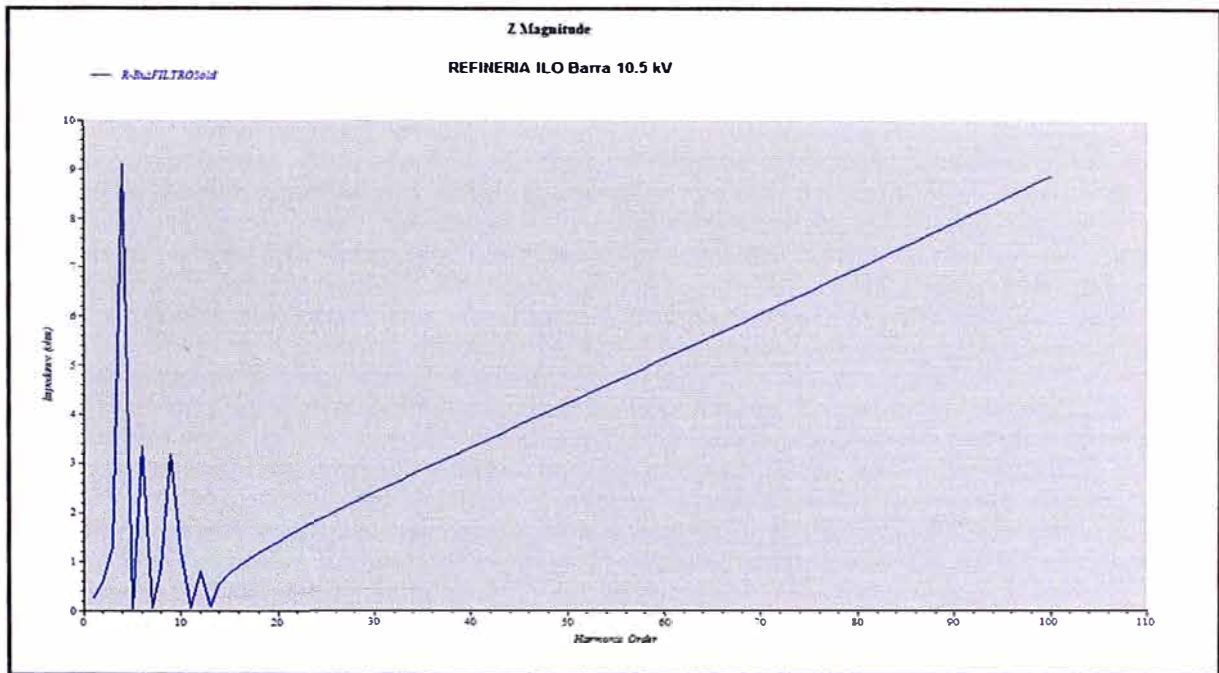


Figura 4.15. Diagrama de Impedancia R.BusFILTROSold-Escenario 6

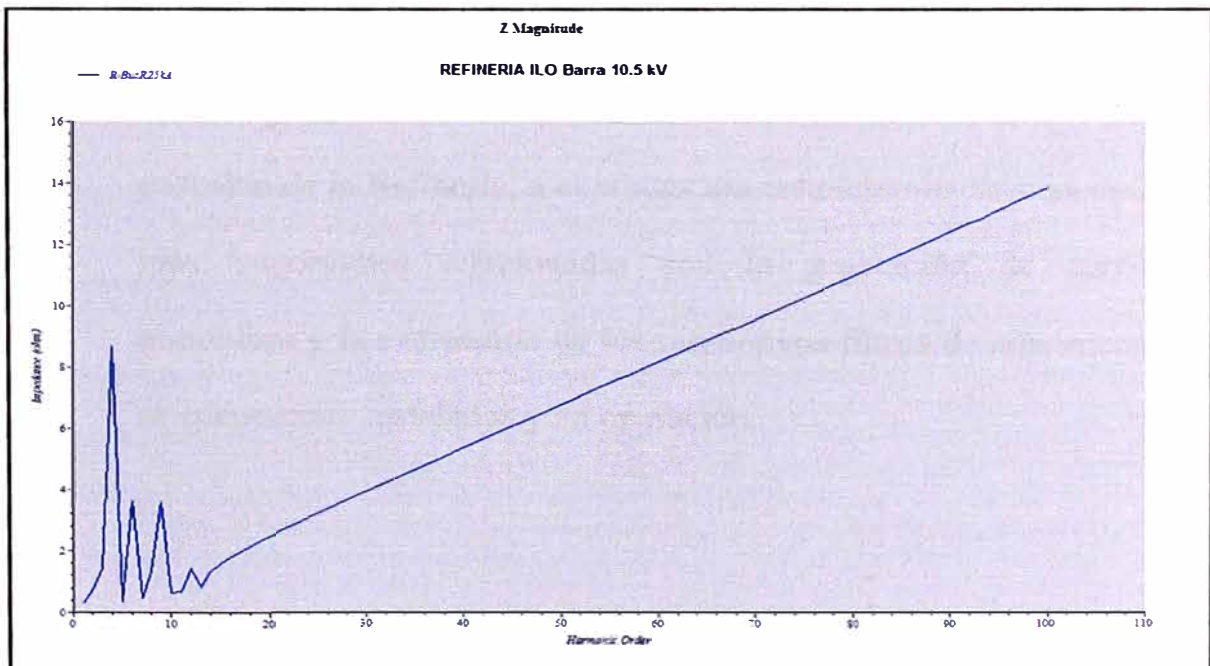


Figura 4.16. Diagrama de Impedancia R.BusR25kA-Escenario 6

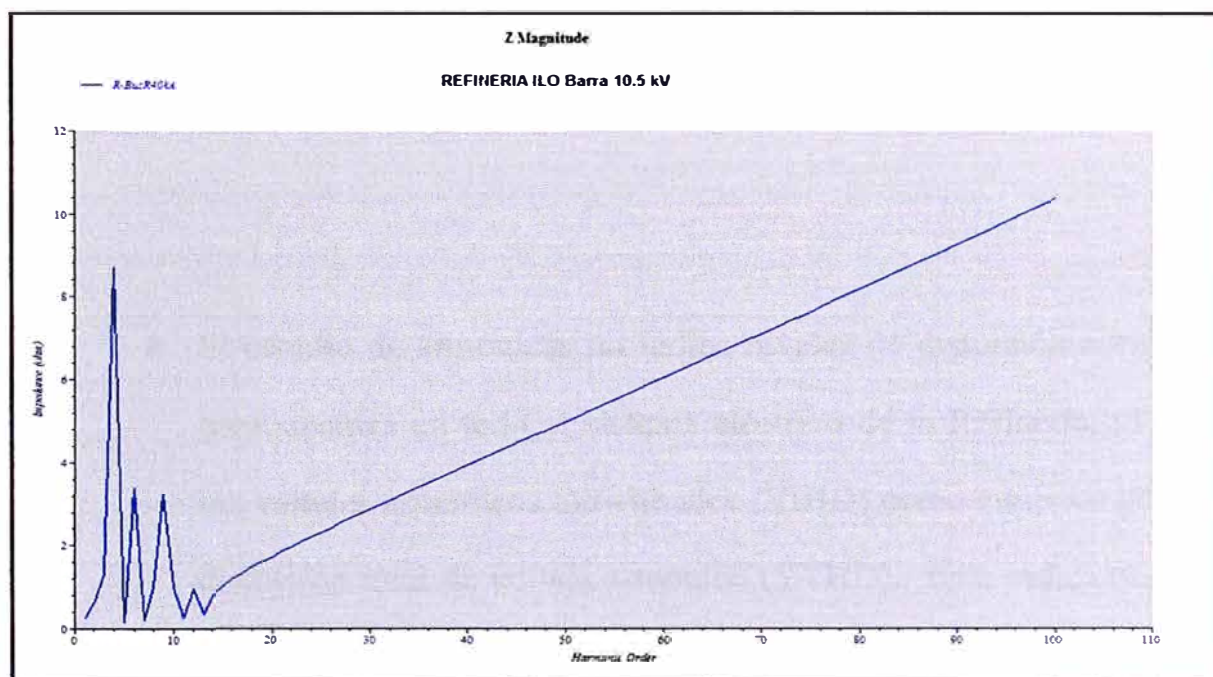


Figura 4.17. Diagrama de Impedancia R.BusR40kA-Escenario 6

4.3.8 Conclusiones y Recomendaciones

Después de un estudio de los resultados ETAP, considerando el escenario 1 y el escenario 5 como la configuración de operación más probable de la Refinería, a continuación enumeramos las conclusiones más importantes relacionadas con la generación de corrientes armónicas y la evaluación de los respectivos filtros de armónicos que se encuentran instalados y en operación.

- Tomando como guía la norma IEEE 519-1992 y la norma Nacional NTCSE se estableció para las barras de 138 kV y 10.5 kV de la Refinería los límites de distorsión armónica de voltaje y

el de corriente. El estudio muestra que la Refinería no excede ninguno de los límites establecidos por estas normas.

- El estudio de armónicas no indica niveles de distorsión armónica preocupantes en todo el sistema eléctrico de la Refinería, ni para los voltajes armónicos individuales (VIHD) como tampoco para la distorsión total de voltaje armónico (VTHD). Esto indica que los nuevos filtros de armónicas están operando adecuadamente.

- Cuando operan los rectificadores Westinghouse (escenario 1), todas las barras principales están operando dentro de los límites de voltaje. Sin embargo, el factor de potencia del sistema eléctrico de la Refinería se encuentra en 91.9%, lo cual es debajo del mínimo valor deseado (96%).

- Cuando operan los nuevos rectificadores Friem (escenario 5), todas las barras principales están operando dentro de los límites. Asimismo, el factor de potencia del sistema eléctrico de la Refinería se encuentra en 98.2%, lo cual es superior al mínimo valor deseado (96%).

- Cuando operan los nuevos rectificadores Friem más los rectificadores Westinghouse (2x15kA) (escenario 6), todas las barras principales están operando dentro de los límites de voltaje. El factor de potencia del sistema eléctrico de la Refinería se encuentra en -98.5%, el cual es superior al valor máximo deseado (100%). Esto se debe a que los filtros nuevos y los filtros antiguos se encuentran conectados e inyectan una alta cantidad de MVAR al sistema.

- Los tres escenarios estudiados muestran que las corrientes armónicas en las barras donde se encuentran conectados los rectificadores y los filtros de armónicas exceden los límites de distorsión armónica establecidos. La distorsión armónica en estas barras es siempre mayor ya que en estas barras se encuentran conectados los rectificadores que generan las corrientes armónicas. Así mismo, las barras que contienen los filtros de armónicas siempre contienen un alto contenido armónico, ya que el papel principal de los filtros de armónicas es atraer las armónicas del sistema para que sean filtrados y no dañen los otros equipos en el sistema eléctrico de la Refinería.

- El análisis de resonancia muestra que las impedancias de resonancia paralela en el sistema eléctrico de la Refinería no coinciden con ninguna de las frecuencias de corrientes armónicas. Por lo tanto no existe una condición de resonancia paralela armónica en el sistema.

- El escenario 1 y el escenario 6 muestran que los filtros antiguos de armónicas se encuentran sobrecargados, particularmente los de 11va y 13va armónica (43%). Se recomienda verificar los relés de protección de todos los filtros antiguos para confirmar que se encuentran operativos. También se recomienda que se tomen mediciones de corriente en cada uno de los filtros para verificar que las corrientes de operación se encuentran dentro de los límites de diseño de los filtros.

4.4 Arquitectura de Control

El diseño de la arquitectura se presenta en dos etapas, el área de subestación eléctrica y el área de rectificadores.

A continuación se presenta la arquitectura de control diseñada para el proyecto.

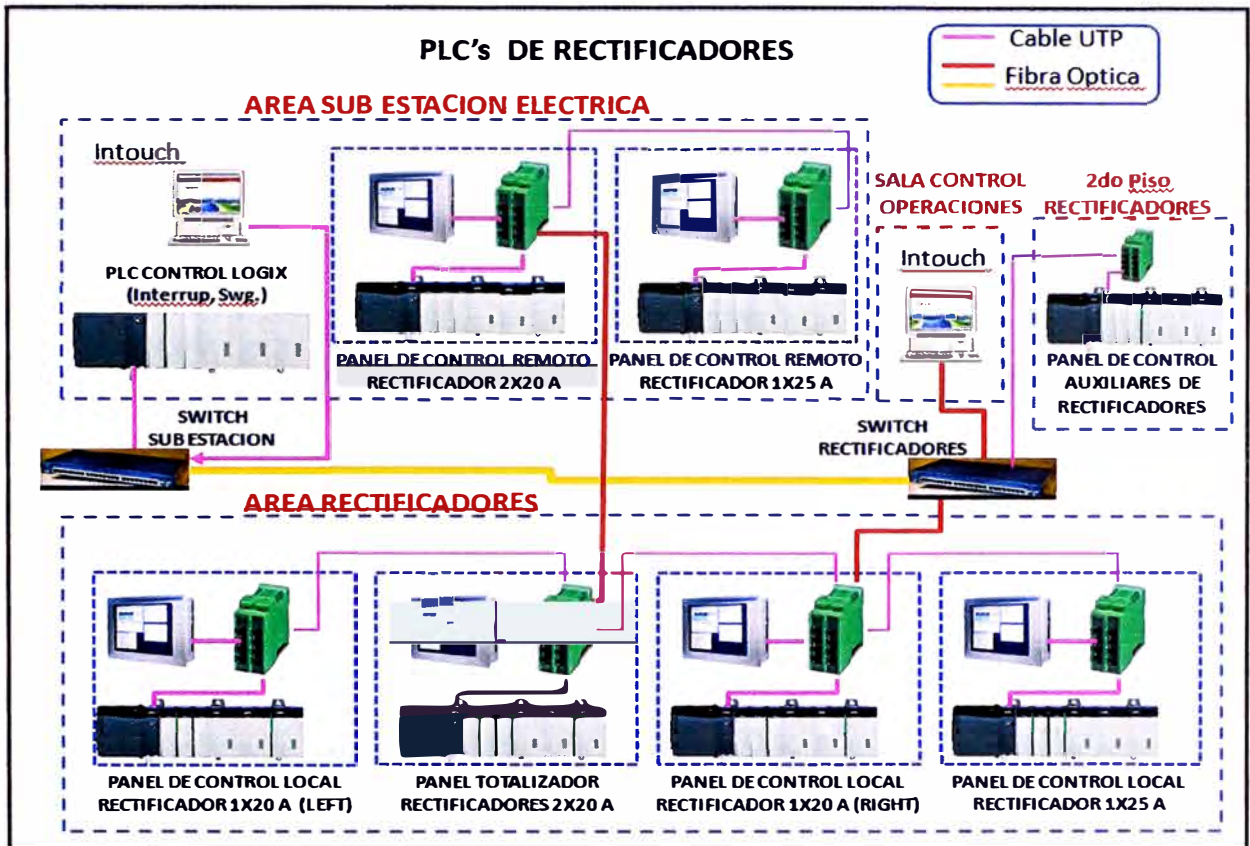


Figura 4.18. Diagrama de Arquitectura de Control

4.4.1 Área de Subestación Eléctrica

En esta área existe una sala eléctrica donde se encuentra los equipos de protección y control de la subestación tanto en 138 kV, 10.5 kV y 3.8 kV.

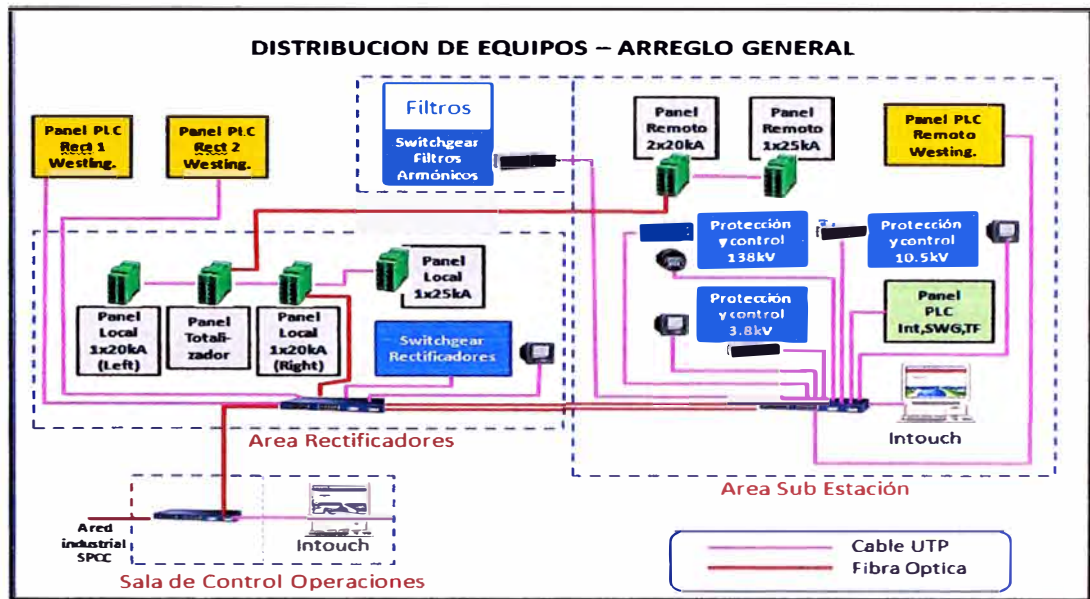


Figura 4.19. Distribución de Equipos

En esta sala se realizó la instalación de dos gabinetes de control de los rectificadores de 1x25 kA, 2x20 kA, que cada uno consiste de un PLC Controllogix y un Panel View donde se realiza el monitoreo y control de forma local.

Además se incluye 3 tableros de protección y control de las líneas eléctricas en 138kV, 10.5kV y 3.8 kV, los cuales son monitoreados por relés de protección, que tiene como función proteger las anomalías que se presentan en la red eléctrica, actúa como señal de alarma para un aviso preventivo y como señal de disparo para un evento crítico. A esto se adiciona los medidores de energía para monitorear el consumo de cada equipo como de la planta, en sus funciones registra los valores de corriente, potencia, ángulo de fase, voltajes, espectro de armónicos, flickers, etc.

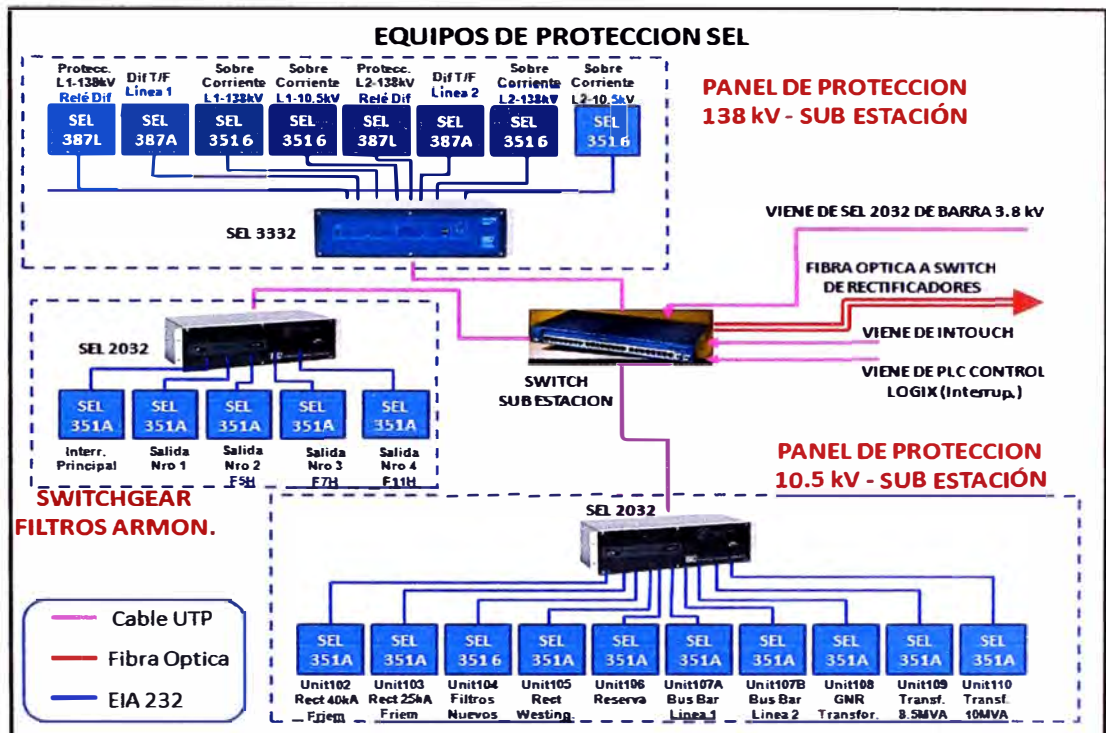


Figura 4.20. Relés de Protección Subestación

Para monitorear todas las señales de los tableros de protección, interruptores, protección del transformador y switchgear se instaló un tablero de control que consiste en un PLC Controllogix que se conecta a la red por medio de cable UTP.

Todas estas señales son llevadas a una computadora industrial donde está corriendo el software SCADA, Intouch de la marca WONDERWARE, que permite la supervisión y el control de los rectificadores y equipos eléctricos.

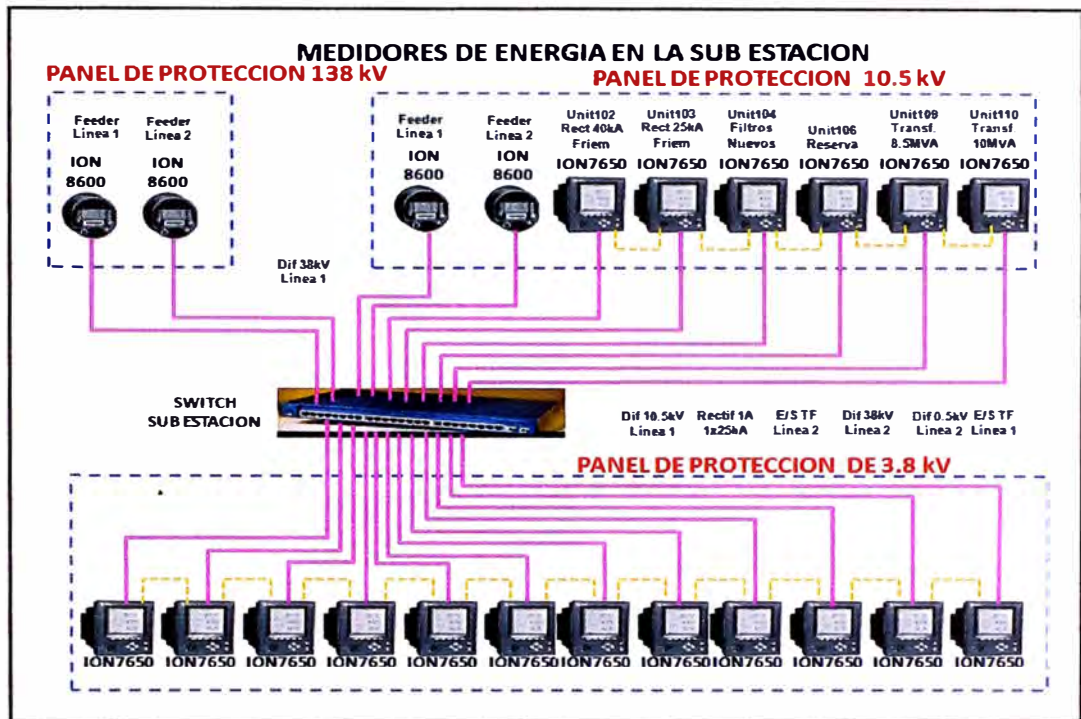


Figura 4.21. Medidores de Energía Subestación

4.4.2 Área de Rectificadores

En esta área se realizó el montaje de 4 paneles de control, los cuales de forma remota controlan los rectificadores de 1x25 kA y 2x20 kA, adicional a esto hay un panel que totaliza las corrientes de los 2 rectificadores de 20 kA.

Del panel de control del totalizador es llevado mediante fibra óptica multimodo al switch de panel de control remoto que está ubicado en la subestación eléctrica.

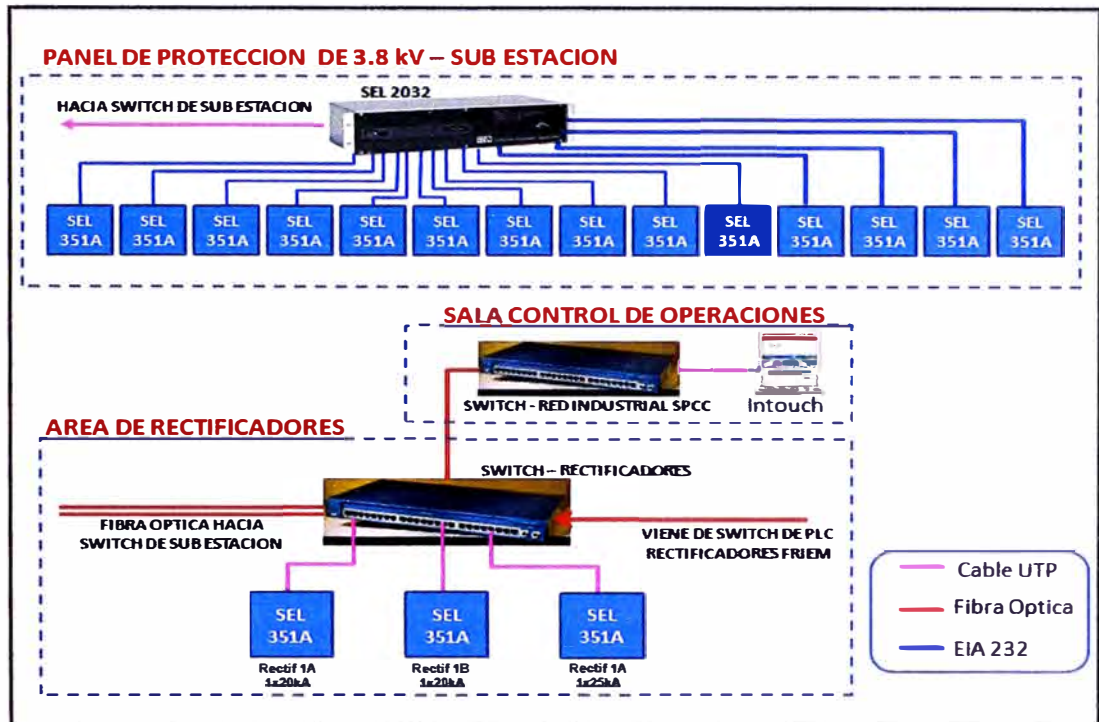


Figura 4.22. Relés de Protección Rectificadores

Además también se monitorea los relés de protección y los medidores de energía, así como también se requirió instalar un PLC para el control de las torres de enfriamiento y monitoreo de las protecciones del switchgear de 1x25 kA y 2x20 kA.

En la sala de control de operaciones se encuentra instalada una computadora industrial para la supervisión y control de los rectificadores y equipos eléctricos, lo cual para ingresar se requiere un password según el nivel (operador, ingeniero, etc).

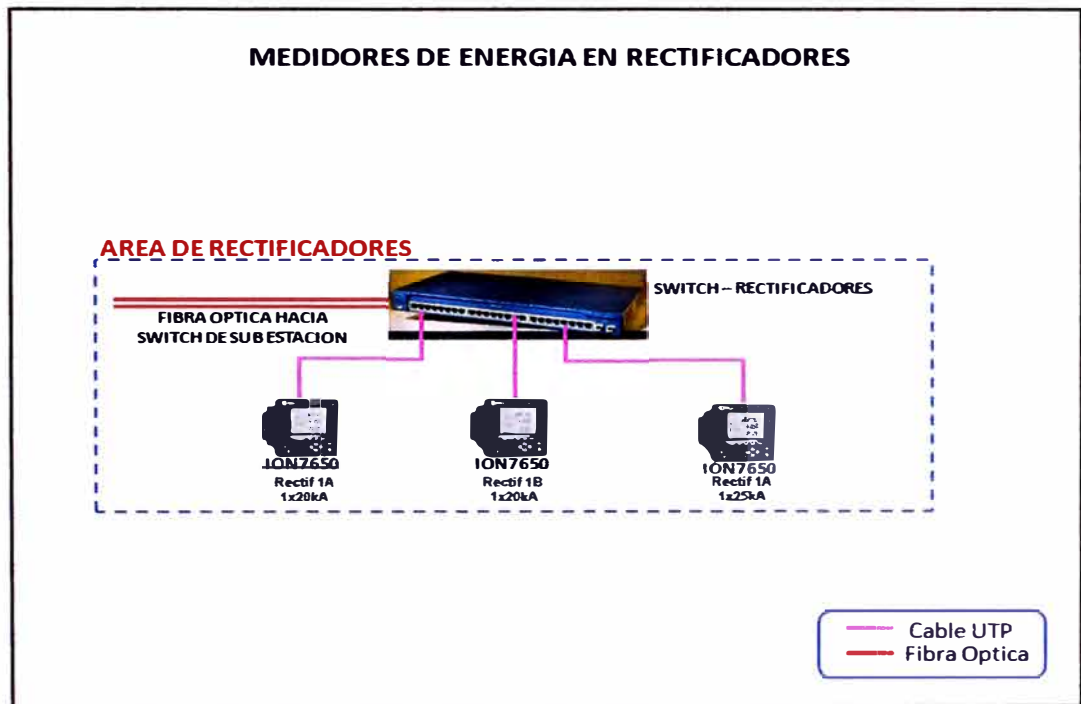


Figura 4.23. Medidores de Energía Rectificadores

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN DE LOS RECTIFICADORES

Para la implementación de los rectificadores de potencia se considero los resultados de los estudios del capítulo IV que contempla el cambio de los siguientes equipos eléctricos:

- Circuit Switcher,
- Transformador de Potencia,
- Switchgear,
- Rectificadores de Potencia,

A continuación se describe a detalle cada uno de los componentes:

5.1 El Circuit Switcher

Los Circuit Switchers son dispositivos de protección y seccionamiento de propósitos múltiples, son ideales para:

- Protección y seccionamiento de transformadores.

- Protección y seccionamiento de bancos de capacitores.
- Protección y el seccionamiento de reactores.
- Seccionamiento de líneas y cables.

Están diseñados para operación continua por largos períodos de tiempo, con un mínimo de mantenimiento. Los Circuits Switchers pueden abrir, cerrar, conducir corrientes de carga e interrumpir corrientes de falla. En aplicaciones de protección y seccionamiento de transformadores, los Circuit-Switchers proveen un circuito de interrupción de alta velocidad ante sobrecargas y fallas secundarias, así como para la protección de los circuitos de transmisión de todos los tipos de fallas del transformador.

La economía de los Circuit-Switchers hace práctico proveer protección a cada transformador en derivación (TAP), sin provocar disparos remotos, como en el caso de relevadores de transferencia o seccionadores automáticos de puesta a tierra.

Aplicación			Amperes Máximos, de Interrupción, RMS Simétricos	
Clase	Capacidades			
Seccionamiento y Protección de Transformadores	Seccionamiento en Paralelo	–	1200	
	Supresión de Carga ⚡	–	1200	
	Interrupción de Fallas ⚡	Fallas primarias	69 kV through 138 kV	25 000 ■ ● ★
			161 kV and 230 kV	20 000 ■ ▲ ☽
		Fallas secundarias		4000 ◆
Fallas internas-vea tanto las fallas primarias como las secundarias, antes mencionadas				
Seccionamiento y Protección de Líneas	División de Carga (Seccionamiento en Paralelo o en Anillo)	–	1200	
	Supresión de Carga	–	1200	
	Desconexión de Líneas	De 69 kV hasta 138 kV	400	
161 kV		320		
Seccionamiento y Protección de Cables	División de Carga (Seccionamiento en Paralelo o en Anillo)	–	1200	
	Supresión de Carga	–	1200	
	Desconexión de Cables (Corriente de Carga)	De 69 kV hasta 138 kV	400	
		161 kV	320	
	Interrupción de fallas ⚡	De 69 kV hasta 138 kV	25 000 ■ ● ★	
161 kV		20 000 ■ ▲		
Seccionamiento y Protección de Bancos de Capacitores Sencillos en Derivación ⚡	Interrupción de la Corriente del Banco	Bancos de capacitores aterrizados aplicados únicamente a sistemas con conexión directa a tierra, hasta 138 kV	400	
		Bancos de capacitores sin aterrizar de hasta 115 kV	400	
	Interrupción de fallas ⚡	–	25 000 ■ ● ★	
Seccionamiento de Reactores en Serie		Acuda a su Oficina de Ventas de S&C más cercana		
Seccionamiento y Protección de Reactores en Derivación ⚡ (Reactores Conectados en Línea o Conectados por el Terciario)	Interrupción de la Corriente del Reactor	Reactores aterrizados aplicados únicamente a sistemas con conexión directa a tierra, hasta 138 kV	600	
		Reactores sin aterrizar, de 69 kV únicamente	600	
	Interrupción de fallas ⚡	–	25 000 ■ ● ★	

Tabla 5.1. Capacidades Interruptivas del Circuit Switcher

El disparo del Circuit Switcher se debe coordinar con el equipo de protección del lado de la fuente para corrientes de cortocircuito que sobrepasen este valor. La capacidad se basa en los parámetros de voltaje transitorio de restablecimiento que se definen en la Tabla IIA de la Norma IEC56: 1987 para los Circuit Switchers con capacidad de 69 kV y en la Tabla IID de la Norma IEC 56: 1987 para los Circuit Switchers con capacidad desde 115 kV hasta 138 kV.

En temperaturas de entre -30° C y -40° C la capacidad de Interrupción de Fallas es de 20 000 A.

5.1.1 Características Técnicas

Voltaje Nominal	:	161 kV
Corriente Nominal Continua	:	1200 A
Transformador Primario Nominal	:	20 kA
Control Voltaje	:	48 V
Modelo	:	2010
Procedencia	:	USA
Marca	:	S&C

5.1.2 Partes del Seccionador

Todos los seccionadores utilizan una cámara interruptiva, columna de apoyo aislante, operador y componentes del mecanismo de operación ultrarrápido de las cámaras interruptivas, todo ello estandarizado.

Además incluye un mecanismo de operación de baja velocidad para las cuchillas, el cual hace girar las columnas aislantes de apoyo para abrir y cerrar la cuchilla desconectadora. Otros con cámaras interruptivas horizontales incluyen mecanismos de transferencia en la parte superior de las columnas de apoyo aislantes, los cuales convierten el movimiento vertical de las varillas de operación aisladas en un movimiento horizontal para impulsar las cámaras interruptivas.

Esta concordancia entre los componentes más importantes y su diseño sencillo y claro hacen que el Circuit Switcher sea más económico de fabricar. Y ya que existe un modelo diseñado para adaptarse a las necesidades de terreno y de diseño de cada aplicación.

Cámara Interruptiva, todos utilizan cámaras interruptivas de primera con aspersion de gas SF₆ con una sola separación aislante, diseñadas para cerrar el circuito en 6 ciclos y para interrumpirlo en 6 a 8 ciclos y para mantener los niveles dieléctricos al estar abiertas. Estas cámaras interruptivas de doble función se llenan en la fábrica a máxima presión en condiciones controladas y luego quedan permanentemente selladas. Una exclusiva técnica de sellado hace que el nivel de fugas sea de cero en temperaturas desde -40° hasta +40° C. A diferencia de las cámaras interruptivas que se encuentran en otros dispositivos, el llenado en campo de las cámaras interruptivas del Circuit-Switcher no sólo es innecesario, sino imposible, eliminando con ello el riesgo de contaminar el agente de interrupción. De manera opcional, se ofrece un monitor a distancia de la densidad del gas para coordinarse con cualquier alarma remota o sistema de monitoreo SCADA. El Circuit-Switcher tiene una capacidad de 25,000 amperes para interrumpir fallas primarias en unidades con capacidad desde 69 kV hasta 138 kV, y una capacidad de 20,000 amperes en unidades con capacidades desde 161 kV hasta 230 kV.

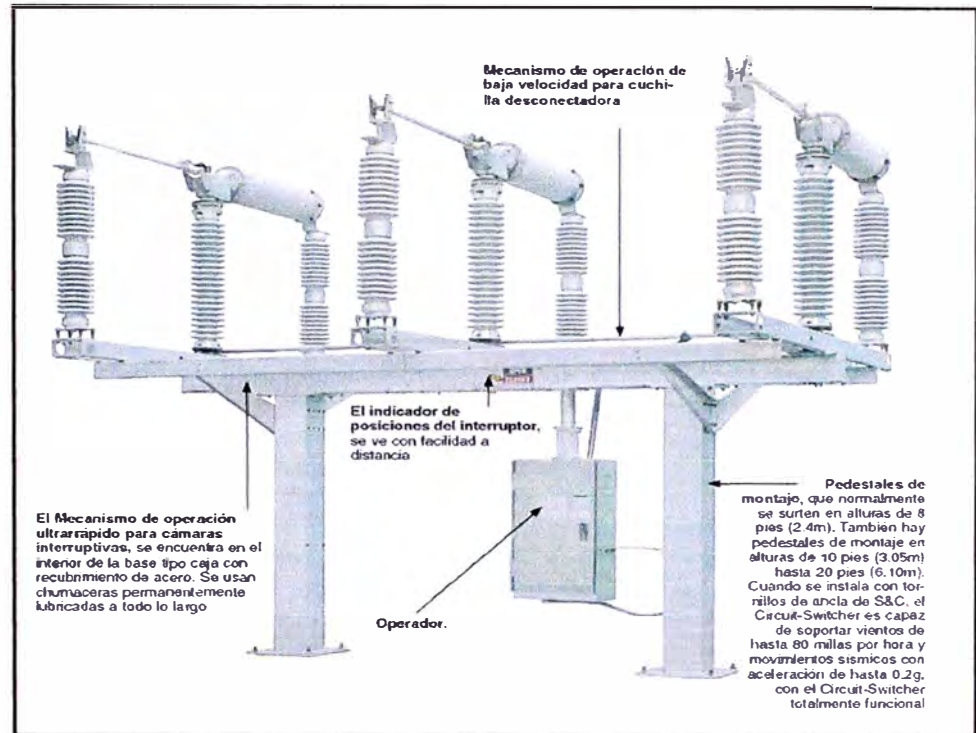


Figura 5.1. Componentes principales del Circuit Switcher

La Cuchilla desconectadora de apertura vertical con operación eléctrica, opera en secuencia con la cámara interruptiva. Después de que la cámara interruptiva ha despejado el circuito, la cuchilla desconectadora se abre para establecer una distancia aislante visible en la operación de cierre, la cuchilla desconectadora se cierra antes de que lo haga la cámara interruptiva. Por esa razón, los contactos de lengüeta que conducen corriente de la cuchilla desconectadora y los contactos de mordaza con dedos múltiples nunca se ven sometidos a arcos externos. La cuchilla desconectadora de apertura lateral con operación eléctrica se coordina de la misma forma.

Las cuchillas desconectoras del Circuit-Switcher son capaces de abrirse y cerrarse sin dificultades bajo formaciones de hielo de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

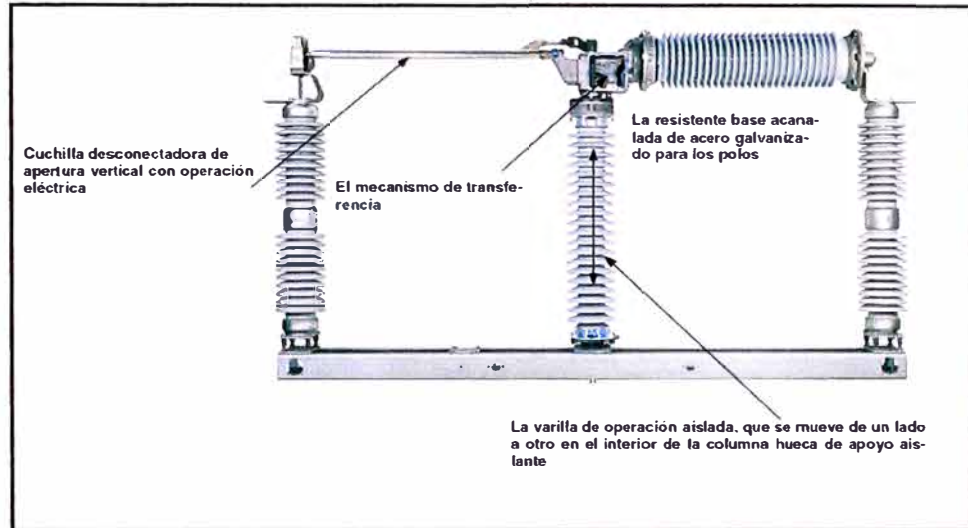


Figura 5.2. Cuchilla desconectora del Circuit Switcher

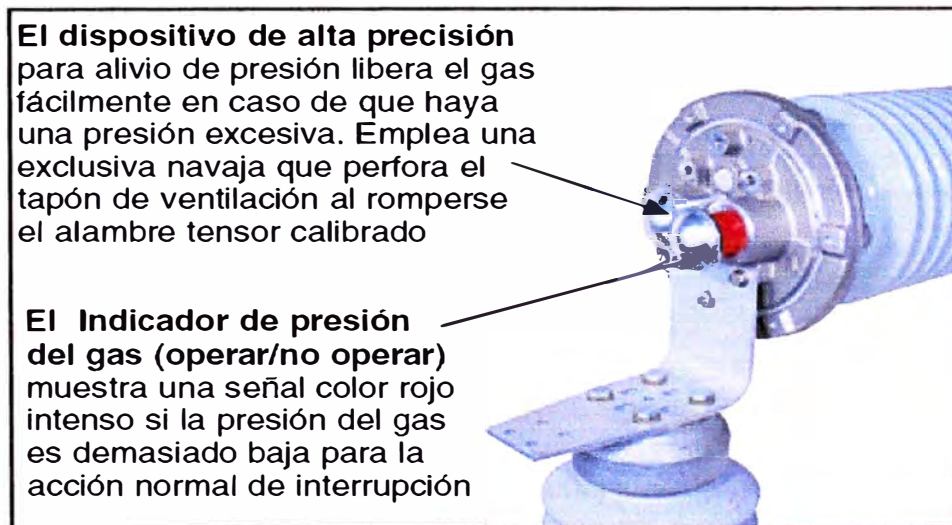


Figura 5.3. Dispositivo de Alta Presión del Circuit Switcher

5.1.3 Funcionamiento de Apertura

Con el Circuit Switcher cerrado y las cámaras interruptivas conduciendo corriente, se carga el resorte de apertura del mecanismo de energía almacenada (listo para dispararse) y se descarga el resorte de cierre. El indicador de posición que está en la base del mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva muestra la palabra “CLOSED” (cerrado) y el indicador del mecanismo de energía almacenada del operador muestra la palabra “CHARGED” (cargado).

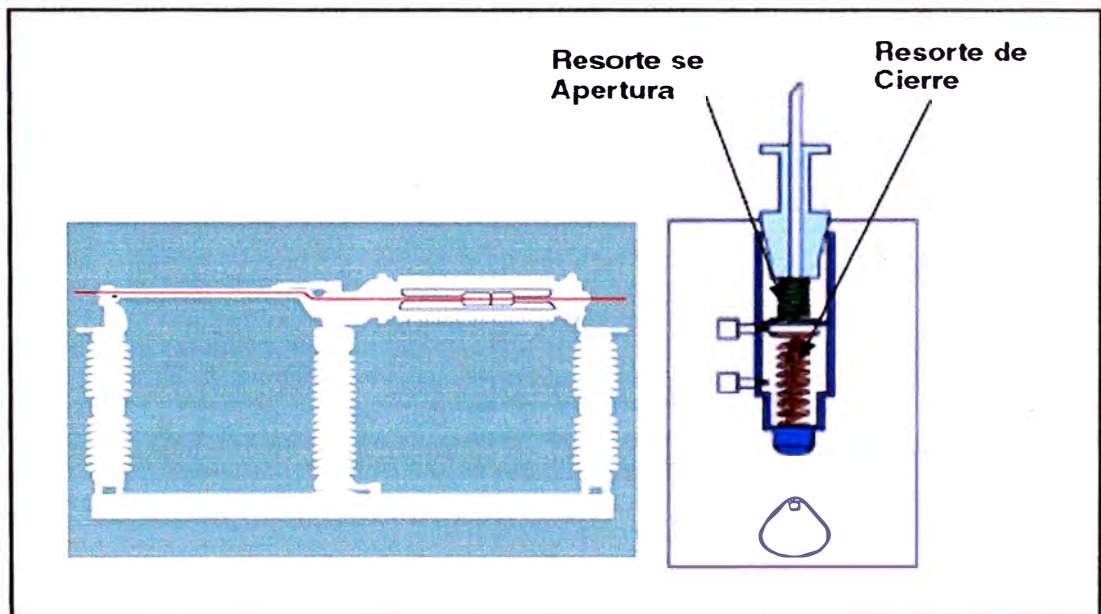


Figura 5.4. Carga del Resorte de Apertura

Cuando se necesita que el Circuit Switcher se dispare, se libera el seguro de apertura del mecanismo de energía almacenada. El resorte de apertura se descarga inmediatamente, forzando al eslabón conector del operador hacia abajo para mover el mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva hasta la posición de abierto

haciendo así que las cámaras interruptivas se disparen. El indicador de la posición del interruptor, que está en la base del mecanismo de operación ultrarrápido de la cámara interruptiva, muestra la palabra “OPEN” (abierto) y el indicador del mecanismo de energía almacenada del operador muestra la palabra “DISCHARGED” (descargado).

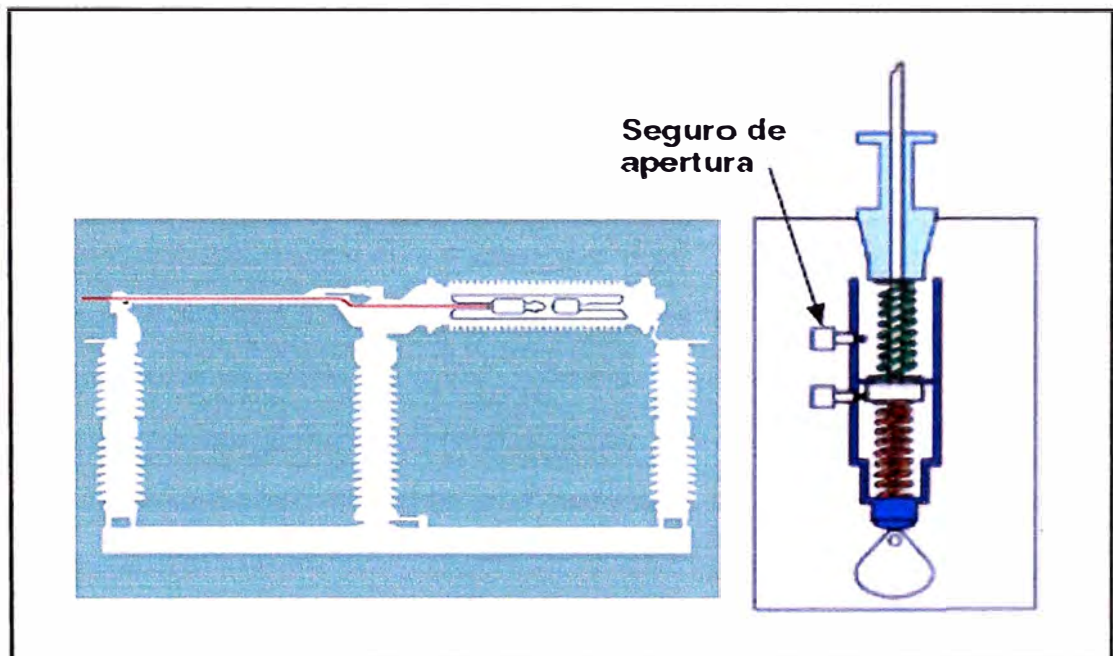


Figura 5.5. Descarga del Resorte de Apertura

La leva de accionamiento mecánico del mecanismo de energía almacenada gira, cargando tanto el resorte de apertura como el de cierre. De manera simultánea, en los modelos con cuchilla desconectadora de accionamiento eléctrico, el mecanismo de operación de baja velocidad de la cuchilla desconectadora hace girar las columnas aislantes de apoyo para abrir la cuchilla.

El indicador de la posición del interruptor, que está en la base del mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva, muestra la palabra “OPEN” (abierto) pero el indicador del mecanismo de energía almacenada del operador muestra la palabra “CHARGED” (cargado).

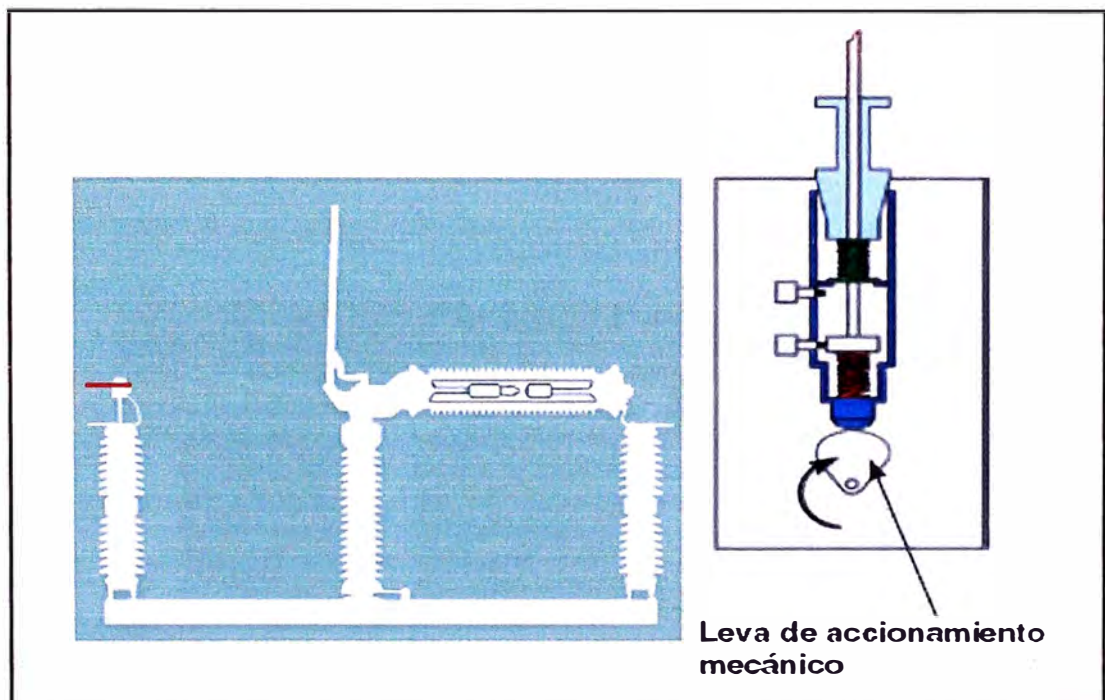


Figura 5.6. Carga del Resorte de Apertura y Cierre

5.1.4 Funcionamiento de Cierre

Cuando se necesita que el Circuit-Switcher se cierre, la leva de accionamiento mecánico del mecanismo de energía almacenada gira para retraerse. Al mismo tiempo, en los modelos con cuchilla desconectadora de accionamiento eléctrico el mecanismo de operación de baja velocidad de la cuchilla desconectadora hace girar las

columnas aislantes de apoyo para cerrar la cuchilla. El indicador de la posición del interruptor, que está en la base del mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva, sigue desplegando la palabra “OPEN” (abierto) y el indicador del mecanismo de energía almacenada del operador sigue mostrando la palabra “CHARGED” (cargado).

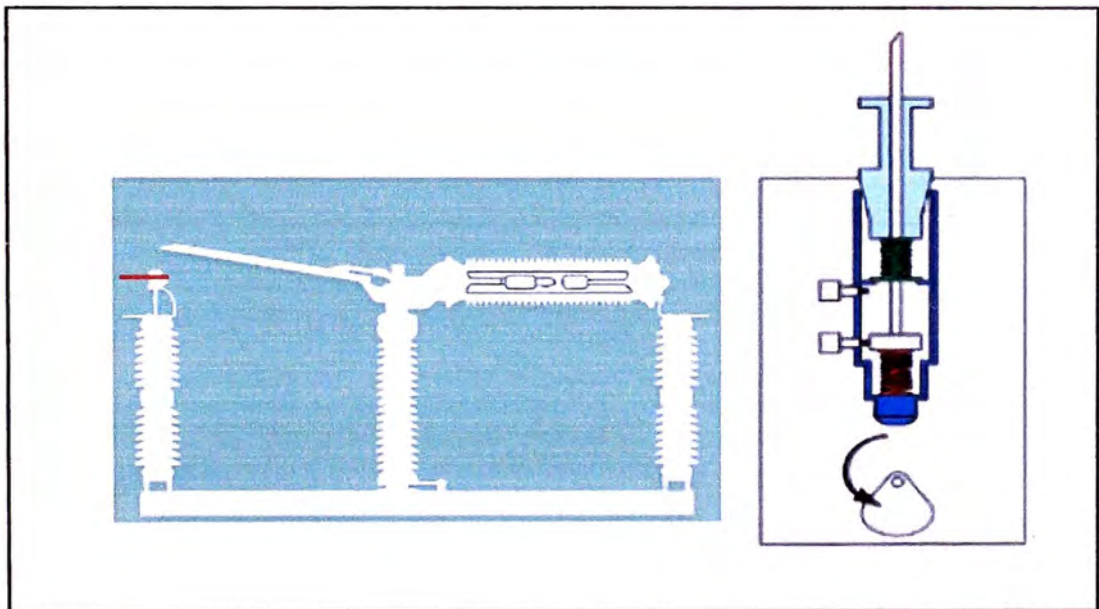


Figura 5.7. Cierre de la Cuchilla Desconectadora

Después de que se ha cerrado la cuchilla desconectadora, se libera el seguro de cierre del mecanismo de energía almacenada. El resorte de cierre se descarga inmediatamente, forzando al eslabón conector del operador hacia arriba para impulsar el mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva hasta la posición de cerrado; cerrando con ello las cámaras interruptivas.

El indicador de la posición del interruptor, que está en la base del mecanismo de operación ultrarrápida de la cámara interruptiva, despliega la palabra “CLOSED” (cerrado), pero el indicador del mecanismo de energía almacenada del operador muestra la palabra “CHARGED” (cargado).

Debido a que el resorte de apertura permanece cargado durante toda la secuencia de cierre, se incluye una capacidad de funcionamiento que deja al equipo listo para dispararse en caso de que el Circuit Switcher se cierre accidentalmente contra una falla.

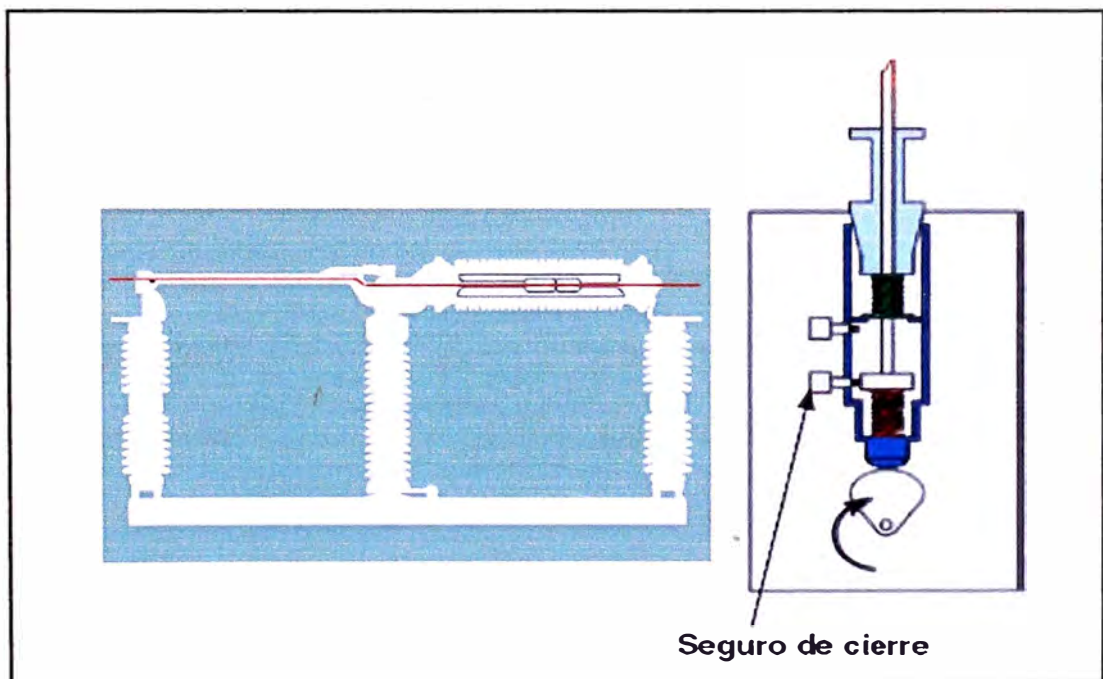


Figura 5.8. Abertura del Seguro de Cierre

5.2 El Transformador de Potencia

Equipo eléctrico estático que posee dos o más circuitos eléctricos acoplados por un circuito magnético. Su principal función es la transferencia de potencia, por inducción electromagnética, transformando tensión y corriente alternadas entre dos o más circuitos sin cambio de frecuencia.

5.2.1 Características Técnicas

Capacidad	:	42 MVA
Número de Fases	:	3
Tipo	:	HCTR-D
Frecuencia	:	60 Hz
Desplazamiento angular	:	YN,d1
Alta Tensión	:	138 kV ($\pm 2 \times 2.5\%$)
Baja Tensión	:	10.5 kV
Refrigeración	:	ONAN
Tipo de Aceite	:	Nafténico - Ergon HYVOLT II
Procedencia	:	Brasil
Marca	:	Toshiba

5.2.2 Protecciones

Los transformadores para su correcto funcionamiento presentan las siguientes protecciones:

Válvula de Alivio tiene como objetivo aliviar la presión interna del tanque cuando se producen presiones elevadas dentro del mismo, como consecuencia de problemas en la parte activa del transformador. El funcionamiento consiste cuando la presión interna del tanque es menor que la presión de operación de la válvula, la tapa (2) es presionada por el resorte (6), sellando la parte interna del tanque a través de la empaquetadura (4).

Si la presión interna del tanque es superior a la presión de operación, se rompe la selladura de la empaquetadura (4) y la tapa (2) se levanta un poco. Con eso la presión que actuó en el área delimitada por el diámetro interno de la empaquetadura (4), pasa a actuar sobre el área delimitada por el diámetro de la empaquetadura (5), provocando una fuerza mucho mayor sobre la tapa. Esta fuerza es suficientemente grande como para vencer a la fuerza de compresión del resorte, haciendo con que la tapa sea ligeramente abierta.

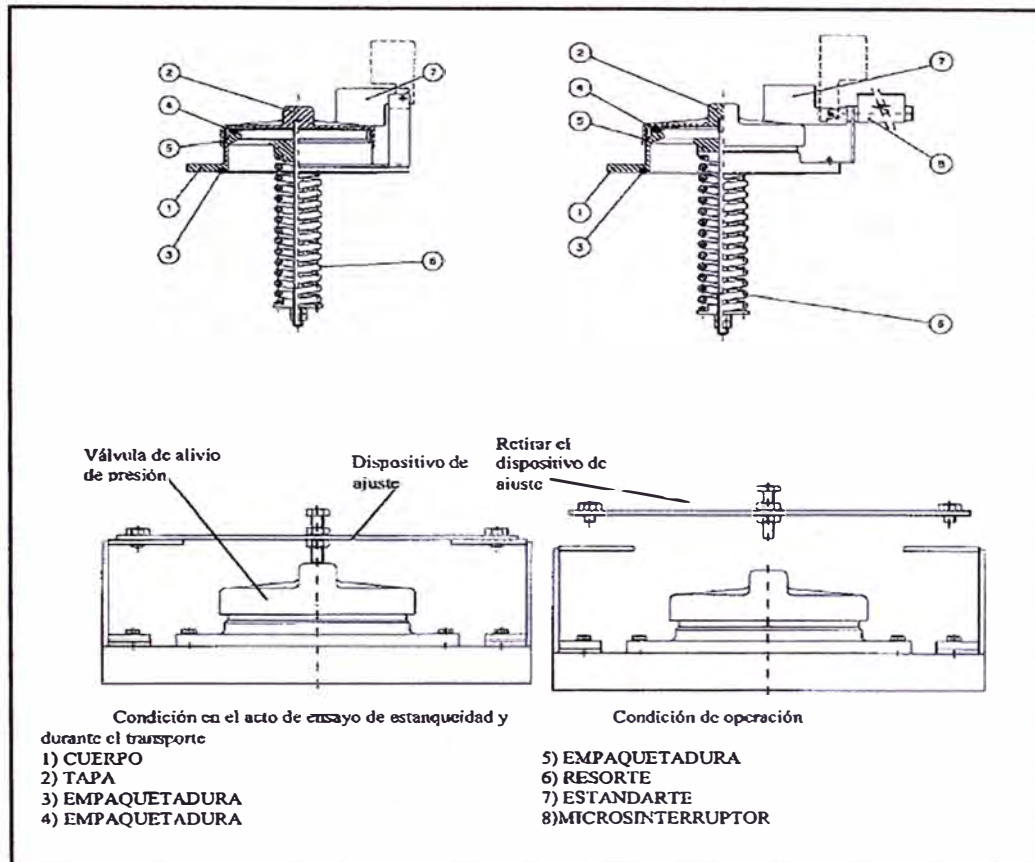


Figura 5.9. Funcionamiento de la Válvula de Alivio

Tan pronto como la presión interna del tanque alcance un valor menor que el valor de la presión de operación, la tapa se ha de cerrar automáticamente, sellando el tanque.

Si la presión interna del tanque es mayor o igual a $0.7 \pm 0.07 \text{ kgf/cm}^2$ el estandarte es empujado hacia arriba, quedando en la posición vertical, indicando la operación de la misma. Cuando el estandarte es empujado hacia la posición vertical, el acciona el microinterruptor (si

posee), retirando el transformador de operación. Después del funcionamiento de la Válvula de Alivio de Presión, la tapa de la válvula se cierra automáticamente, pero el estandarte y el microinterruptor no vuelven a sus posiciones respectivas de reposo, de manera que el estandarte debe ser rearmado manualmente, empujándolo hacia abajo hasta que se apoye en la tapa, quedando en la posición horizontal. Con esta operación el microinterruptor (si posee) es rearmado.

Indicador de Nivel tiene como objetivo indicar el nivel de aceite del tanque del transformador en función de la variación de la temperatura ambiente, así como de la carga alimentada por el transformador.

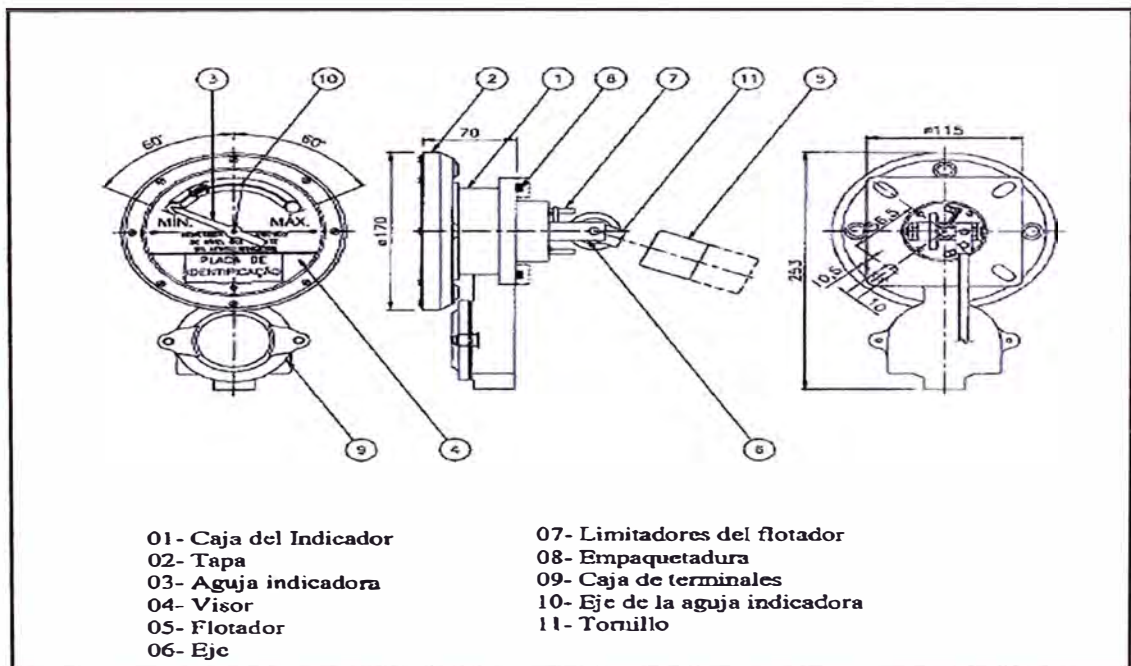


Figura 5.10. Características del Indicador de Nivel

El funcionamiento consiste con el alza o baja del nivel de aceite, el flotador se mueve hacia arriba o hacia abajo y con este desplazamiento provoca por inducción magnética el movimiento del disco imantado que transmite este movimiento para la aguja indicadora, marcando con el visor, la variación de nivel ocurrida. Si el nivel de aceite alcanza un valor menor o igual al mínimo, y mayor o igual máximo preestablecidos, un contacto respectivo del microinterruptor cerrara, accionando el sistema de protección, tal como una alarma.

Relé Buchholz, tiene como objetivo proteger al transformador en los casos en que se produce la formación lenta de gases o el aumento repentino de presión y velocidad del aceite, accionando el sistema de protección del transformador: alarma y desconexión.

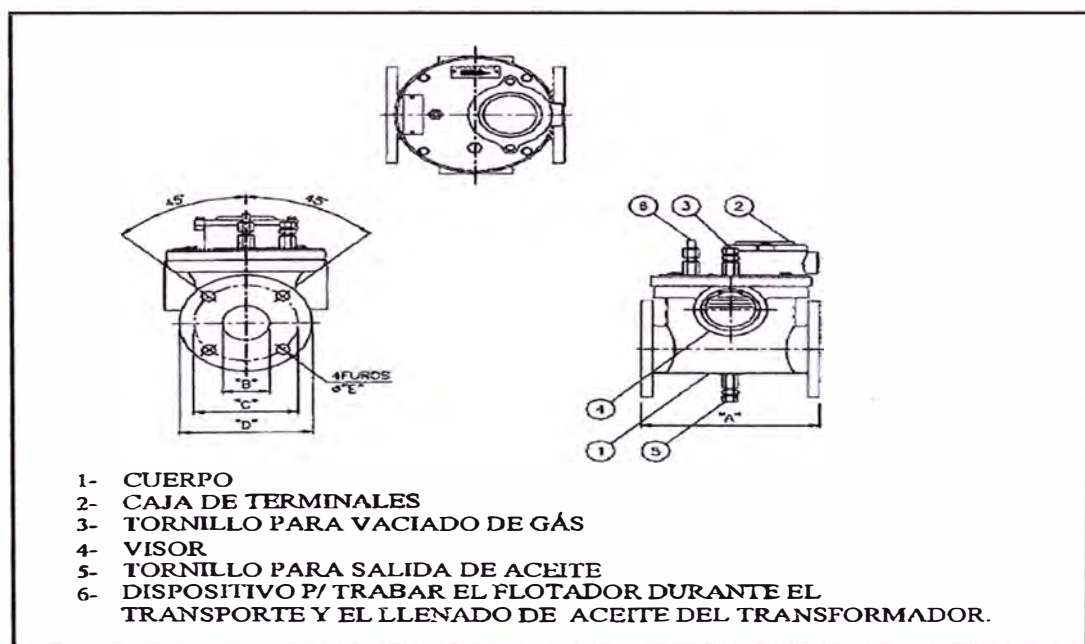


Figura 5.11. Partes de Relé Buchholz

El funcionamiento se describe en 2 momentos:

Cuando hay formación lenta de gases durante el funcionamiento del transformador, suceden calentamientos focalizados y/o pequeñas descargas eléctricas internas, se formaran gases de modo lento. Existirá una acumulación del mismo en el Relé y como consecuencia el nivel de aceite ha de bajar. El flotador también descenderá, acompañando al aceite y al alcanzar un determinado valor el contacto para la alarma será accionado.

Cuando hay formación repentina de gases durante el funcionamiento del transformador como consecuencia de descargas eléctricas con gran liberación de energía, la presión de aceite dentro del transformador aumentara, haciendo con que el aceite fluya para el tanque del conservador. Como consecuencia el flotador oscila y acciona el contacto, sacando al transformador de funcionamiento.

Respirador a la Silica Gel tiene como objetivo básico respirar con un elemento deshidratante, tipo silica-gel, para instalación en transformadores.

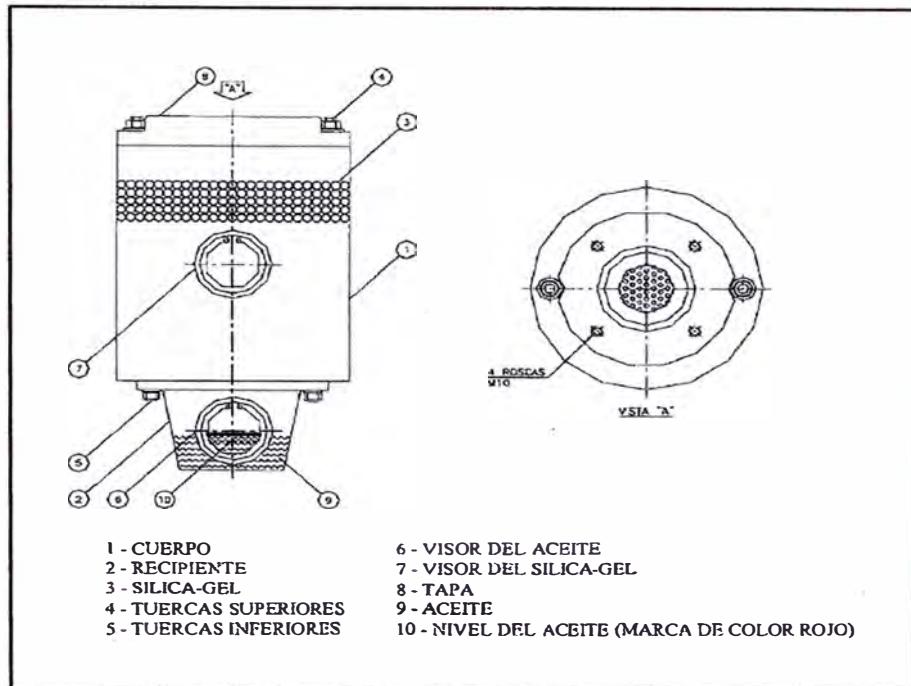


Figura 5.12. Partes del Respirador

Durante el funcionamiento, el transformador está sometido a constantes variaciones de temperatura. Estas variaciones dan como resultado aumentos o disminuciones del volumen de aceite, haciendo que el transformador “respire”. El respirador es un accesorio conectado a la parte superior del conservador, con la importante función de filtrar y deshidratar el aire que queda en contacto directo con el aceite aislante o las paredes internas de la bolsa de neoprene. La falta de este accesorio, provoca el envejecimiento precoz del aceite o de la bolsa de neoprene, debido a la presencia de humedad e impurezas contenidas en el ambiente externo. El principio básico del funcionamiento del respirador, puede ser descrito en dos etapas.

Cuando la temperatura es ascendente sucede lo siguiente:

- Aumento del volumen de aceite en el interior del tanque;
- Aumento de la presión interna del tanque haciendo que el aire contenido en el conservador sea expelido;
- Paso del aire arrojado por la tubería e interior del respirador para el ambiente externo.

Cuando la temperatura es descendente sucede lo siguiente:

- Reducción del volumen de aceite en el interior del tanque;
- Reducción de la presión interna del tanque provocando que el aire del ambiente externo sea succionado;
- Paso del aire succionado a través del aceite contenido en el recipiente para filtrado y retención de partículas solidas;
- Paso del aire succionado a través de la silicagel contenida en el interior del respirador para retención de la humedad.

La condición de la silica-gel utilizada en el interior del respirador deberá ser evaluada de acuerdo con su coloración y comparada con la Tabla 5.2. La periodicidad para cambio de la silica-gel varia teniendo en cuenta el porte y la condición de carga del transformador. Las condiciones atmosféricas de la región de instalación también representan un factor importante en la vida útil de la silica-gel.

DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE HUMEDAD DE LA SILICA-GEL		
APLICACIÓN	EN CONDICIONES DE USO	SUBSTITUIR
COLORACIÓN	AZUL	ROSA
	NARANJA	AMARILLO CLARO

Tabla 5.2. Determinación de Presencia de Humedad

5.3 El Switchgear

Es un tablero de media tensión con los interruptores de vacío removibles, provee un control y protección centralizados para el equipo de corriente a voltaje medio y circuitos en instalaciones industriales, comerciales y de servicios públicos que incluyan generadores, motores, circuitos alimentadores y líneas de transmisión y distribución.

5.3.1 Características Técnicas

Voltaje Nominal	:	10.5 kV ($\pm 10\%$)
Número de Fases	:	3
Frecuencia	:	60 Hz
Capacidad de Corto Circuito	:	750 MVA
Bus Principal	:	3000 A
Encerramiento	:	Nema 3R
Tipo	:	Metal Clad

Tipo de Interruptor	:	Vacio
Procedencia	:	USA
Marca	:	Cutler Hammer

5.3.2 Descripción y Operación

El Interruptor en Vacío, es un diseño de extracción horizontal, que se desliza sobre ruedas en el piso para ser utilizado con equipos de tableros nuevos, así como en la modernización y extensión de la vida útil del tablero ya existente. Los Interruptores, cumplen con todas las normas dictadas por ANSI y el IEEE.

El interruptor funciona con un motor que arranca con un mecanismo de almacenamiento de energía que se carga a través de resortes, que generalmente se carga un motor eléctrico o manualmente, sirviéndose con una herramienta de arranque. Los contactos de desconexión primaria se alinean automáticamente y son de cobre con baño de plata. Los Interruptores presentan una estructura tipo modular que cuenta con un mecanismo que se accesa por el frente del equipo, sin obstrucción y directamente a los componentes de control. Las unidades polares de los interruptores en vacío vienen en un solo gabinete para facilitar su extracción como unidades completas.

El material aislante principal que se emplea en el diseño de este interruptor es una resina epóxica cicloalifática. El cableado de control, modelo SIS, AWG #14, con material aislante poliolefin cruzado se utiliza a través de los circuitos de control con todas las terminales, que se fijan por medio de tornillos.

En esta sección se describe la operación completa del interruptor, así como el funcionamiento y operación de las principales partes y sub-unidades asociadas.

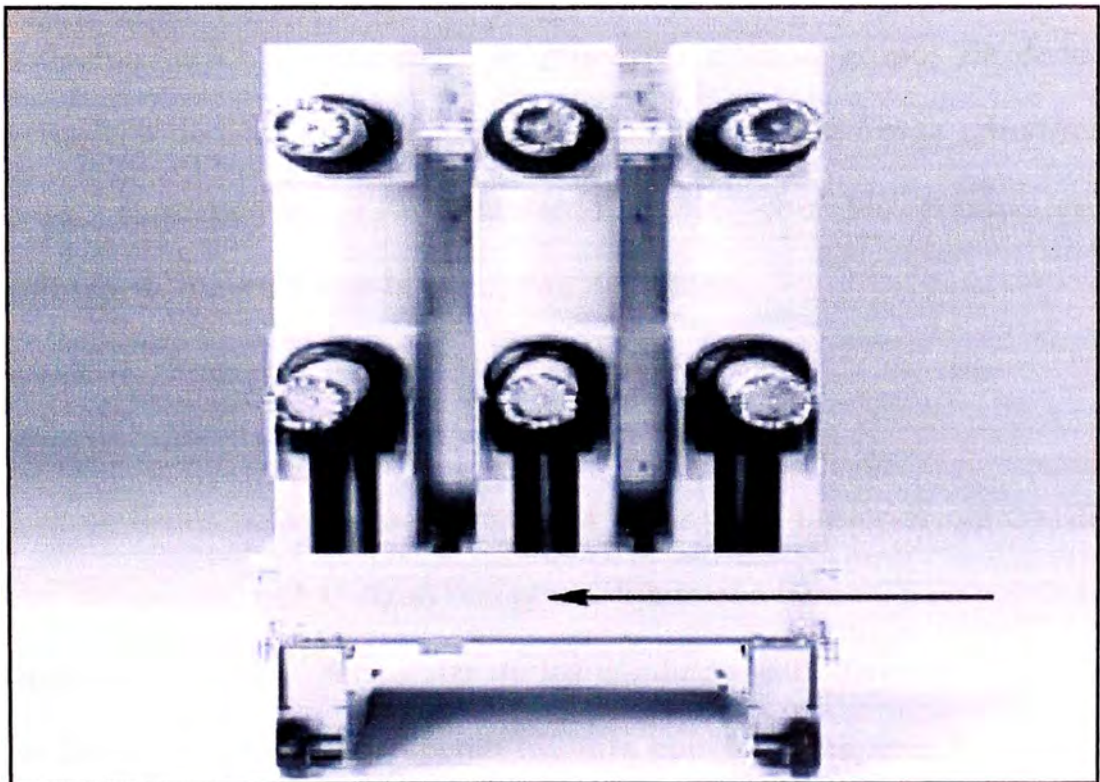


Figura 5.13. Vista Posterior del Cajón de la Unidad Polar

5.3.3 Unidad del Interruptor

El diseño del interruptor en vacío, cuenta con tres unidades polares montadas independientemente unas de otras, que además son extraíbles.

Cada unidad polar está contenida en un gabinete de una chimenea continua con cuatro lados, moldeada para dar soporte al material epóxico ciclolifático. Recubrimientos aislantes de color negro cubren y sellan las aperturas en los puntos donde los conductores primarios entran y salen del gabinete epóxico ciclolifático. Los terminadores de desconexión en los conductores primarios utilizan grupos de dedos primarios de desconexión con carga flotante, son de forma cilíndrica para interconectar el acoplamiento mutuo con los conductores primarios integrados en la estructura del tablero.

Las unidades polares están montadas en la parte posterior del carrito del interruptor, que utilizan una placa, fijada con pernos, para cubrir la apertura de forma rectangular de los conductos auxiliares de posición de los interruptores que operan mínimo con 1600 amperes y más. Al quedar encajonados los conductos auxiliares se logra la correcta circulación del aire dentro de cada cajón de unidades polares, acopladas a interruptores que operan mínimo a 2,000 amperes y más.

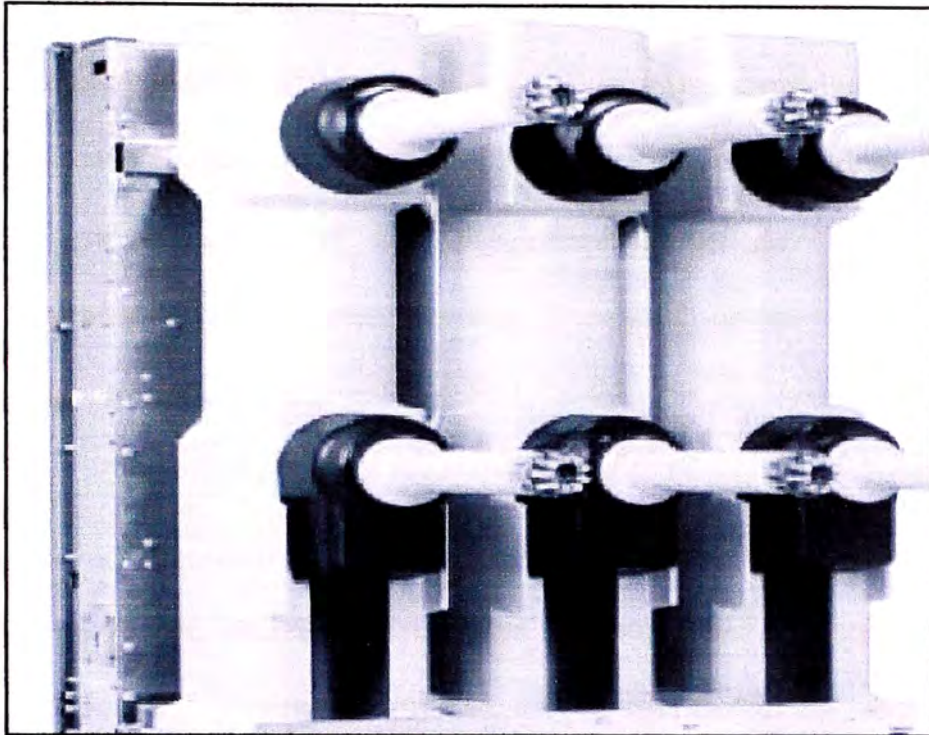


Figura 5.14. Tapa localizada en la Parte Posterior de la Apertura

Los interruptores en vacío se montan verticalmente y se sujetan a la estructura por fijación a una barra de metal, que está unida por medio de abrazaderas al conductor principal. El sistema exclusivo de transferencia de corriente eléctrica se compone de series de conductores de hoja de cobre plateada, con alta capacidad de conducción fijados al tronco móvil del interruptor. El diseño permite el contacto múltiple que da como resultado una baja resistencia térmica y eléctrica. Al utilizar este sistema de transferencia de corriente que no se desliza entre el tronco móvil del interruptor y el principal conductor del interruptor se elimina la necesidad de dar mantenimiento a este empalme.

Las varillas aislantes que operan directamente en conjunto con el mecanismo de los interruptores suministran una cantidad fija de fuerza impulsora al tronco móvil del interruptor. Esta fuerza motriz se relaciona directamente con los mecanismos de “Choque” y de “Frotamiento de los interruptores, mecanismos que se explican en detalle más adelante.

El Switchgear, utiliza interruptores en vacío para activar funciones de interrupción y conmutación. Los cortacorrientes en vacío utilizan contactos de cromo de cobre con eje magnético para proporcionar una fuerza dieléctrica superior, mejor desempeño de las funciones y menos cortes de corriente.

La función del cortacorriente en vacío le brinda las mismas ventajas que los interruptores con gabinete, siendo de peso y medidas reducidas, periodos de interrupción más cortos, una vida útil más larga, mantenimiento mínimo y compatibilidad con el medio ambiente.

La interrupción del arco es simple y rápida. En posición de cierre la energía eléctrica fluye a través del interruptor. Cuando los contactos

están abiertos, el arco se extiende entre las superficies de los contactos. Tiene un impulso muy rápido alrededor de las superficies de los contactos ranurados por una fuerza magnética auto-inducida, que previene la erosión brusca de los contactos y la formación de puntos calientes en las superficies de los contactos. El arco se combuстиón en un vapor ionizado de metal, que en forma constante escapa del área de dos contactos y se condensa alrededor de un escudo de metal que los protege.

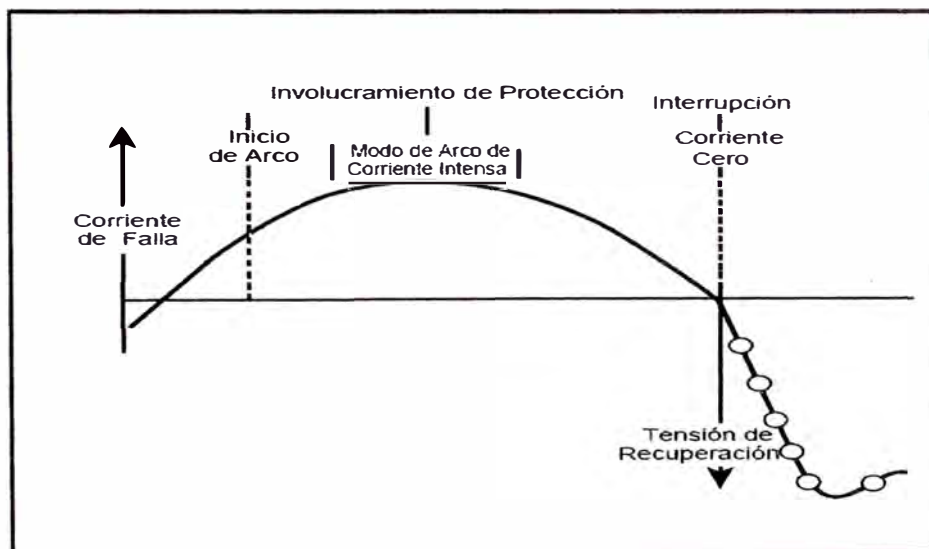


Figura 5.15. Representación Grafica de la Interrupción del Arco

A corriente cero, el arco se extingue y deja de producir vapor. El plasma del vapor de metal es de rápida dispersión, enfriamiento, recombinación y de ionización junto con los productos del vapor de metal que tienen una condensación muy rápida, crean el vacío que se restaura muy rápidamente.

Por lo tanto, los contactos abiertos ejercen resistencia a la recuperación temporal de la tensión.

Indicación de Erosión de Contacto, la tarea del indicador del nivel de erosión de los contactos es monitorear el grado de erosión de los interruptores en vacío, que resulta ser ínfima a la larga en interruptores en vacío que funcionan con contactos fabricados con materiales de cobre cromado. Si la erosión del contacto ya es de 1/8 de pulgada, el cortacorrente deberá ser reemplazado. El equipo viene con dos diferentes indicadores de niveles de erosión con el objeto de facilitarle y proporcionarle al usuario máxima comodidad.

Cada una de las fases del interruptor se monitorea en forma independiente por cualquiera de los dos tipos de indicadores de niveles de erosión en los contactos.

El primer indicador de nivel de erosión se monitorea desde la parte posterior de dicho interruptor. El indicador de nivel de erosión le proporciona una lectura prácticamente exacta y se considera como el factor determinante primario del estado físico real del contacto normalmente abierto marca del indicador del nivel de erosión del contacto se encuentra en la varilla aislante que cada uno de los interruptores utiliza para su funcionamiento (Figuras 5.16 y 5.17).

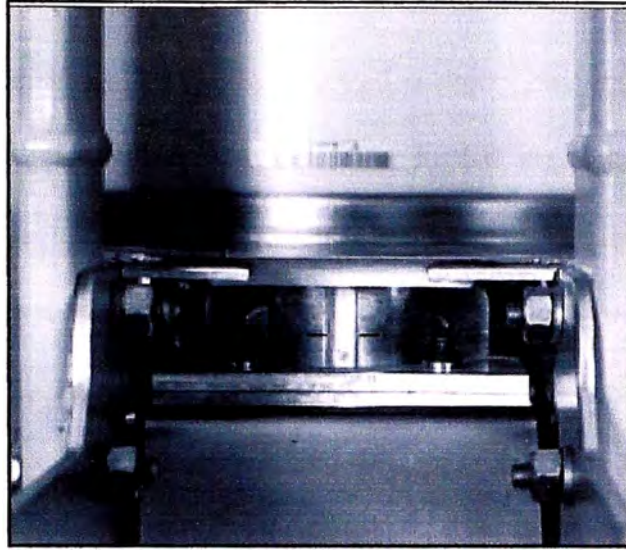


Figura 5.16. Interruptor en Vacío que muestra indicador de Erosión de Contacto con Interruptor Abierto

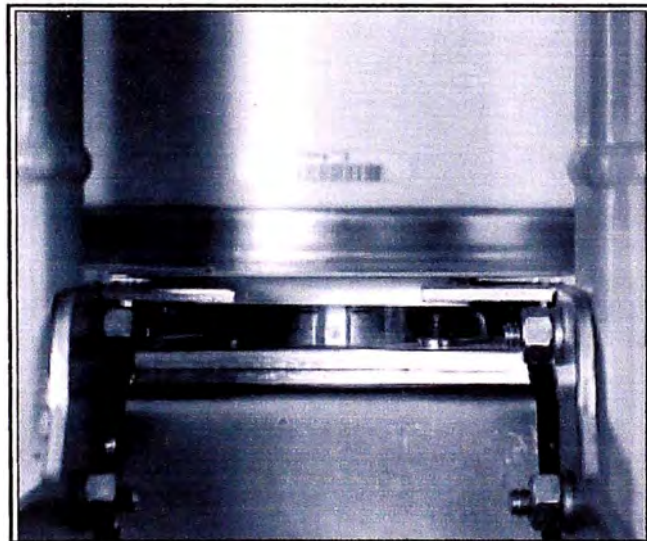


Figura 5.17. Interruptor en Vacío que muestra indicador de Erosión de Contacto con Interruptor Cerrado

Un segundo indicador que resulta ser aún más conveniente se encuentra en el frente del interruptor. En los contactos auxiliares de los conductos del interruptor hay, en la parte inferior del frente, pequeñas ventanas a través de las cuales se puede verificar la

condición del contacto, en cuanto al nivel de erosión Este se indica con banderines de color verde “Sirve” o rojo “No Sirve”, dependiendo del estado en que se encuentre el interruptor en vacío. Este indicador resulta ser una referencia muy conveniente cuando el interruptor se instala en su receptáculo. Mientras la línea en la ventana se encuentre marcando verde, el indicador nos avisa que los contactos aún están en estado satisfactorio. Cuando la línea llega a la zona roja del indicador, la unidad completa del interruptor tiene que ser reemplazada.

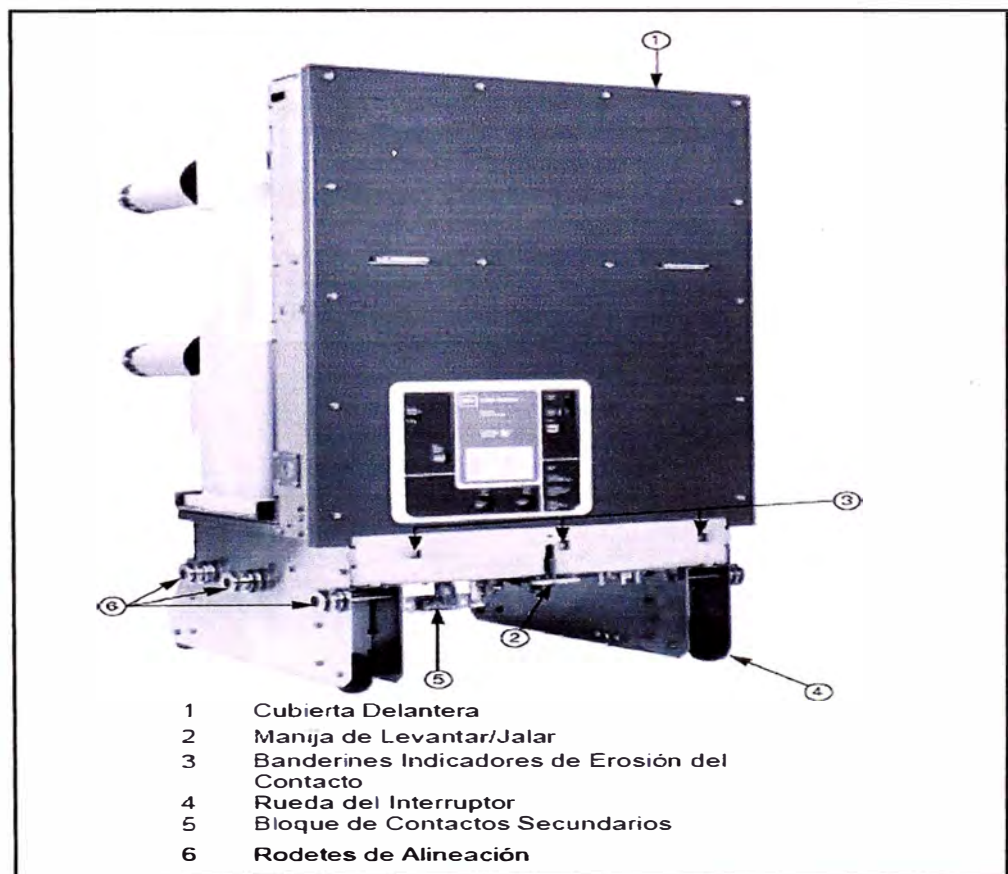


Figura 5.18. Vista Frontal del Interruptor en Vacío

Indicador del Resorte de Carga, es un método adicional que proporciona información sobre la condición en la que se encuentra el interruptor en vacío en su interior, dicha información también nos indica la condición en que se encuentra el sistema en general. El indicador que se ve en cada fase sirve para indicar si los resortes de carga del contacto mantienen la presión correcta en el contacto para mantener los contactos cerrados. Este indicador arrojará resultados inaceptables al hacer evidente un severo estado de erosión del contacto o al sugerir un ajuste al sistema después de reemplazar toda la unidad del interruptor.

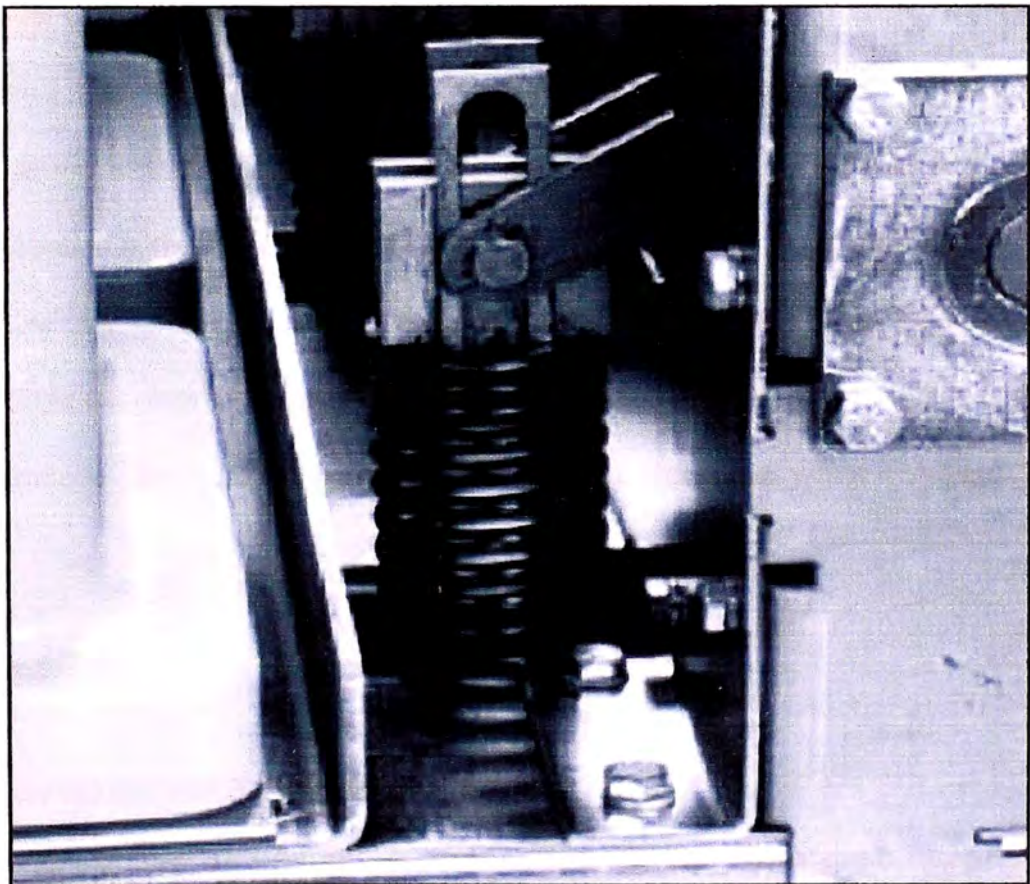


Figura 5.19. Vista lateral del Indicador del Resorte de Carga

Frotamiento y Choque de Contactos, el frotamiento del contacto indica (1) que la fuerza de retención mantiene los contactos cerrados en el interruptor de vacío, y (2) que la energía disponible que impacta los contactos abre con la rapidez suficiente para provocar la interrupción. El choque se produce entre los contactos fijos y móviles del interruptor en vacío con el interruptor abierto.

El mecanismo del interruptor suministra una cantidad fija de impulso a las varillas para que se activen y funcionen. La primera parte del impulso se utiliza para cerrar los contactos y el impulso restante se aplica a comprimir más el resorte precargado por frotamiento. Este último tipo de compresión se conoce como “frotamiento”. Entonces los mecanismos de Frotamiento y de Choque, están relacionados entre sí. Entre mayor sea el choque debido al nivel de erosión de los contactos, menor será el frotamiento. Se ha realizado gran esfuerzo al diseñar los interruptores en vacío, con el objeto de lograr eliminar la necesidad de realizar ajustes en campo por frotación y por choque.

5.3.4 Mecanismo para Almacenar Energía

El mecanismo de operación de los resortes que almacenan energía se dispuso en vertical, al frente de todos los Interruptores. Incluye todos

los componentes necesarios para almacenar energía, mecanismos de cierre y desconexión de los interruptores, así como, sus respectivos controles manuales y eléctricos. Los controles manuales se ubican en la parte frontal del equipo, lo que facilita su acceso. Los mecanismos para cerrar y abrir los contactos del interruptor están equipados con varillas que funcionan conectándose a las flechas de los polos de las manivelas de campana de los interruptores.

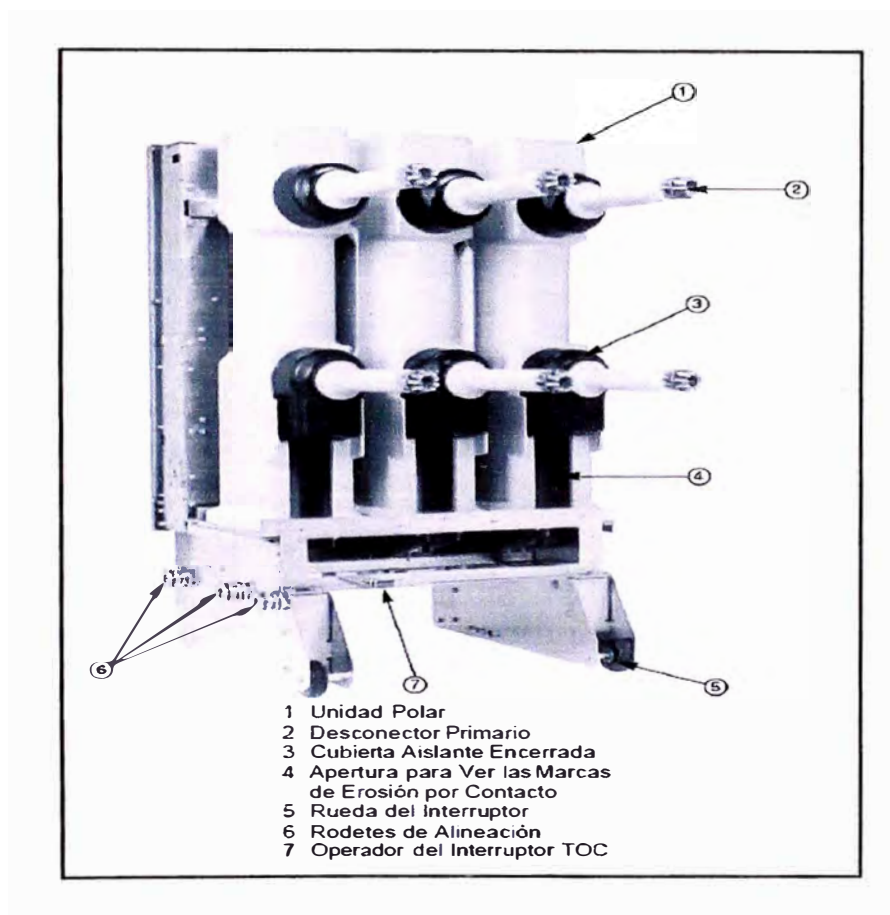


Figura 5.20. Vista Posterior del Interruptor en Vacío

Operación del Mecanismo para Almacenar Energía, el mecanismo almacena la energía de cierre al cargar eléctricamente los resortes de cierre. El mecanismo se puede encontrar en cualquiera de las cuatro

posiciones, según se muestra en la Figura 5-4, y de acuerdo con lo siguiente:

- Interruptor abierto, resortes de cierre sin carga
- Interruptor abierto, resortes de cierre con carga
- Interruptor cerrado, resortes de cierre sin carga
- Interruptor cerrado, resortes de cierre con carga

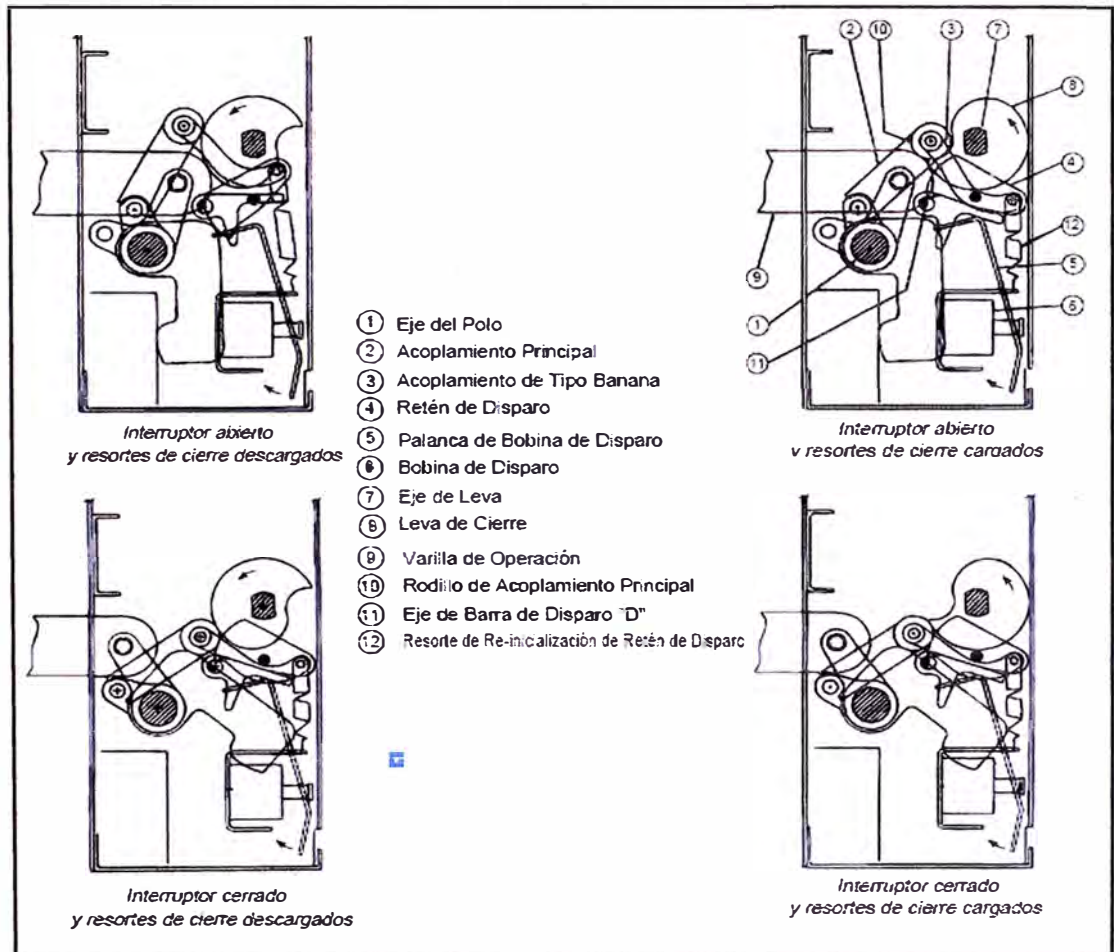


Figura 5.21. Leva de Cierre y Acoplamiento de Disparo

Como Cargar Energía, en la Figura se muestra una vista de las partes del resorte que cargan energía del mecanismo de energía almacenada.

El componente más importante del mecanismo es la flecha de leva, la cual está compuesta de una flecha a la cual se le integraron dos manivelas para resortes de cierre (una en cada extremo), una leva de cierre, placas de impulsión y un engrane de desembrague. El engrane es impulsado por un mecanismo de oscilación, accionado por un motor excéntrico. Al rotar el engrane, empuja las placas de excitación que a su vez hacen rotar junto con ellos, las manivelas de los resortes de cierre y la leva de cierre.

Las manivelas de los resortes de cierre tienen terminadores de resortes conectados a dichas manivelas, mismas que a su vez están acopladas con los resortes de cierre. Al girar las manivelas, los resortes de cierre se cargan de electricidad. Cuando los resortes de cierre están completamente cargados de energía, las manivelas de los resortes se mueven hacia un centro muerto y el rodillo de bloqueo al cerrar se mueve hacia el trinquete de liberación del resorte. Los resortes de cierre ahora se encuentran retenidos en posición de carga total.

Los resortes de cierre también se pueden cargar manualmente. Inserte una de las herramientas de mantenimiento en la apertura del dado de

carga manual. Manipule la palanca unas 38 veces, empujándola hacia arriba y hacia abajo, hasta que escuche un sonido como un tronido y pueda a simple vista ver que el indicador de carga de los resortes de cierre marca la leyenda “Cargado”. No se puede continuar manipulando el mecanismo con la herramienta de mantenimiento porque puede resultar que el engrane se desembrague.

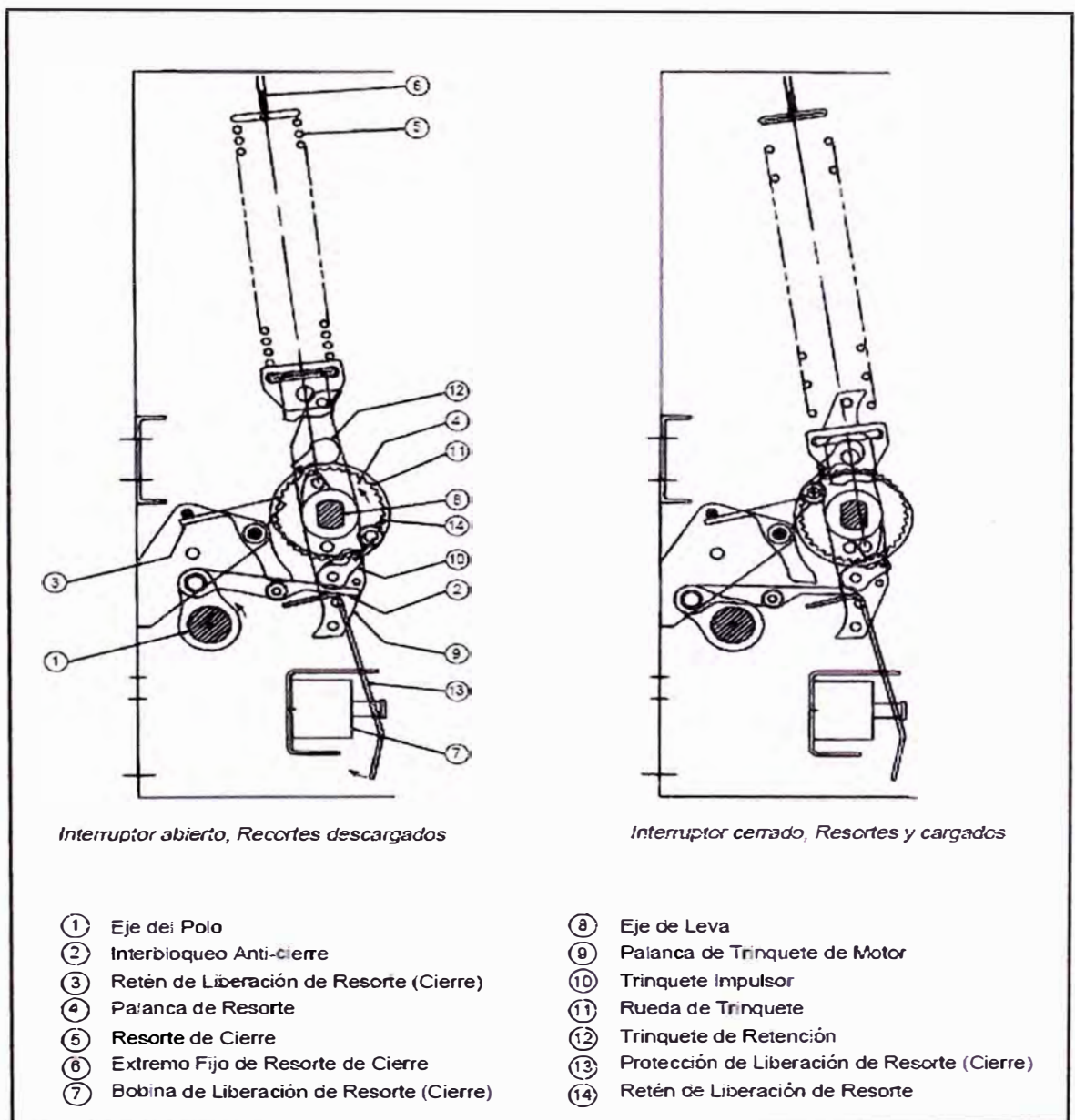


Figura 5.22. Esquema de Carga

5.4 El Rectificador de Potencia

5.4.1 Características Técnicas

Entrada AC:

Voltaje, 3 Fases	: 10.5 kV ($\pm 5\%$)
Frecuencia	: 60 Hz ($\pm 2\%$)
Potencia de Cortocircuito	: max. 450 MVA min. 450 MVA

Salida DC:

Voltaje nominal dc a 20kA	: 460 V
Corriente total nominal dc	: 40kA
Rango de voltaje DC por tiristor	: (0....460)V
Rango de operación del voltaje dc por no carga y cambio de tap	: (85.2...460)V
Rango constante control corriente	: (10....100)% Idn
Elemento rectificador	: Tiristor
Número de unidades	: 2
Numero de pulsos	: 6
Número total de pulsos	: 12
Tipo de control automático	: Corriente constante dc
Exactitud del control automático	: $\pm 1\%$ corriente nominal

Condiciones Ambientales:

Temperatura ambiente, max	: + 40°C
 min	: + 0°C
Temp. enfriamiento agua fresca, max:	+ 30°C
Rango de voltaje DC por tiristor	: (0....460)V
Altitud (max)	: 1000 m sobre nivel mar

Fuentes Auxiliares:

Voltaje AC, 3 fases	: 460 V – 60 Hz
Voltaje AC, 1 fases	: 120 V – 60 Hz
Voltaje de seguridad	: 125V
Procedencia	: Italia
Marca	: FRIEM

5.4.2 **Características Generales**

El equipo descrito consiste de 2 rectificadores de 6 pulsos basado en tiristores. Cada puente conectado y tiene una salida nominal de 20kA-460 V. La unidad está equipada con un sistema de control de voltaje dc y utiliza un control total sobre la capacidad de los tiristores.

El equipo incluye todos los dispositivos requeridos para el control, señales, alarmas y protecciones necesarias para satisfacer la operación del rectificador.

La unidad del rectificador consiste esencialmente de:

- Un transformador rectificador, sumergido en aceite.
- Un cubicle con los tiristores del rectificador, asociados en secciones la alimentación y el control, incluyendo el enfriamiento y sistemas auxiliares.
- Un set de conexiones AC flexibles.
- Un sistema de medición de corriente DC.
- Un equipo que corrige el factor de potencia y sistema de filtro armónicos.
- Un tablero de control remoto.
- Dos aisladores dc sin carga.

El equipo tiene la capacidad de operación continua por periodos ilimitados dentro de los límites establecidos por la norma.

5.4.3 Tiristor del Rectificador

El cubicle consiste en tiristores tipo disco y fusibles especiales en serie, dispuesto en un sistema de 6 pulsos, puenteado trifásicamente.

El cubicle del rectificador es totalmente hermético y refrigerado por agua desionizada que recircula en circuito cerrado a través del agua desionizada y el agua fresca que les separa el intercambiador de calor.

El agua desionizada es el enfriador primario para enfriar los tiristores.

El agua fresca es externa al medio de enfriamiento.

El tiristor tipo disco son refrigerados por agua en ambos lados por su carcasa de aluminio. Los fusibles se enfrían con agua desionizada en un lado y por aire forzado por el otro. Se proporcionan fusibles especiales de aislamiento para cada tiristor para aislamiento selectivo en caso de falla. Cada fusible está equipado con un microswitch y un percutor para fácil identificación de falla de los fusibles y tiristores.

El rectificador tiene la capacidad de operar con uno de los tiristores por cada puente fuera de servicio. La pérdida de un tiristor por puente

será solo anunciado; la pérdida de un segundo tiristor en el mismo grupo del puente causa el tripeo de la unidad. El circuito RC de los fusibles está conectado adecuadamente a través de los tiristores como protección de sobrevoltaje.

El sistema de refrigeración esta equipado por dos intercambiadores de calor, dos bombas y todos los dispositivos necesarios para el control y supervisión. Las bombas, los intercambiadores de calor y los otros dispositivos de monitoreo están instalados dentro del sistema de enfriamiento. El intercambiador y la bomba son redundantes.

El material de los componentes del circuito de agua desionizada son resistentes a la corrosión, hecho de acero inoxidable y materiales especiales.

Para ventilar el interior, el gabinete cuenta también con un intercambiador de calor auxiliar aire/agua equipado con un ventilador. Para eliminar el calor el aire recircula a través del intercambiador de calor por las barras, disipadores de calor y las conexiones fusible tiristor. El intercambiador de calor se suministra con el agua desionizada como el sistema principal de enfriamiento.

El circuito cerrado del agua desionizada viene con un medidor de conductividad. Alta conductividad creara: en un primer nivel alarma y en un segundo nivel un tripeo. La unidad de deionización tipo cartucho se proporciona y se conecta en un circuito bypass asegurando la pureza de agua.

5.4.4 Panel de Control

El rectificador es suministrado con un panel de control incorporado en el gabinete del rectificador, contiene regulación de corriente automática, un sistema de PLC, otros dispositivos electrónicos, instrumentos y componentes necesarios para el control y supervisión del rectificador.

El PLC (Programmable Logic Control) es usado para muchas funciones pero no para paradas de seguridad y tripeo. En este caso solo la lógica cableada incluye relés y módulos de seguridad para los más importantes trips y relés.

El PLC (Programmable Logic Control) es usado para realizar funciones de control, alarmas, interface con el operador mediante un

panel operador, para mostrar estados del rectificador, alarma, mensajes de tripeos y valores de medidas.

El operador puede interrogar al PLC a través del panel operador (HMI), disponible en la parte delantera del gabinete, para conocer el estado de operación del rectificador, la lista de eventos, para cambiar localmente la corriente prefijada. El PLC y el panel de operador (HMI) es de la marca Allen Bradley.

5.4.5 Sistema de Regulación

El rectificador es suministrado con un sistema de regulación que permite la variación de voltaje que se obtiene de dos modos:

- Un control fino de 0-460 Vdc por fase de control de tiristores. Este rango será utilizado durante la puesta en marcha y funcionamiento normal.
- El transformador tiene 15 tomas que son cambiadas sin carga manualmente por el operador y permite en orden 15 voltajes en el secundario de 85.2 a 460 Vdc.

El rectificador es suministrado con un sistema de control de corriente DC automático.

El requerimiento de corriente de salida del rectificador es seteada por el operador en el HMI (Human Machine Interface) o por la computadora personal.

El control automático de la corriente se basa esencialmente en el funcionamiento de:

- Un cabezal de medición en DC (marca LEM, tipo DynAmp), dispositivo que sensa la corriente, para ser convertida en la salida.
- Una fuente de referencia (PLC).
- Un regulador automático de corriente.
- Un conjunto de tiristores.
- Las bobinas secundarias del transformador que son los componentes principales del control de lazo cerrado.

El sistema funciona de la siguiente manera: el cabezal de medición del rectificador regula automáticamente realimentándose con una señal proporcional a la corriente de salida continua. El regulador compara esta señal con una señal de referencia interna que es seleccionado por el operador. La diferencia entre estas señales es amplificada por el regulador en consecuencia por los tiristores y automáticamente mantiene la señal de corriente de salida entre $\pm 1\%$.

Las señales de referencia por fase para la sincronización del tiristor se tomarán de dos transformadores de potencial 10.5kV/100V (potencia total suministrada 30VA) o tres transformadores de potencial 10.5kV/100: $\sqrt{3}$ (potencia total 30VA cada uno), conectado antes del interruptor principal 10.5kV a la misma línea suministrado al rectificador con el fin de evitar la distorsión de la señal.

5.4.6 Protecciones del Rectificador

El equipo incluye protecciones para proteger adecuadamente al rectificador. Las siguientes protecciones están incluidas:

Protección de Sobrevoltaje, protege contra sobrevoltajes transientes del suministro de la red, se logra conectando condensadores a tierra en cada fase del secundario del transformador-rectificador.

Las sobretensiones debido al efecto de almacenamiento (sobrevoltaje de conmutación) y sobretensiones de conmutación primaria son amortiguadas por medio de resistencias-condensadores conectado en paralelo con los tiristores.

Protección de Sobrecorriente, transformador-rectificador esta protegido contra cortocircuitos y sobrecargas por medio de una de las

tres fases del relé de protección alimentado por el lado 10.5 kV del transformador de corriente instalado en el primario del mismo transformador.

Los tiristores están protegidos contra sobrecargas DC por medio de un dispositivo electrónico, cumpliendo la coordinación con la curva de sobrecarga del tiristor y al mismo tiempo asegurar las características de sobrecarga del rectificador: este dispositivo se suministra por la señal que viene del transformador de corriente (CT's) instalado entre el transformador y el rectificador.

Los transformadores de corriente instalados entre el lado AC de las barras de entrada, es decir entre el transformador y el rectificador permiten una protección completa del rectificador.

De hecho estos transformadores de corriente permiten la detección rápida de cortocircuitos del lado DC, sobretodo del cortocircuito interno del rectificador que es un tipo de circuito multicable que no puede ser detectado por los transformadores de corriente en el lado primario del transformador.

Cortocircuitos Internos, la protección contra cortocircuito internos se logra por medio de tiristores aislados de fusibles especiales. Cuando un tiristor falla al bloquear la tensión inversa, ocurrirá un cortocircuito. Con el fin de limitar el efecto de cortocircuito un fusible es conectado en serie con cada tiristor. Un fusible opera cada vez que el tiristor falla. El fusible corta la corriente de cortocircuito que fluye en la falla del tiristor y limite esta corriente a valores seguros. Por lo tanto, protege a todas las bobinas de los tiristores.

Después de una falla del tiristor, el sistema anunciara un mensaje y accionara la bocina de la alarma. El fusible es quemado y la falla del tiristor es detectado por una inspección visual del interruptor que salen de los fusibles. La falla de un segundo tiristor en el mismo lado causa el tripeo del equipo. Para localizar fácilmente la falla de los fusibles y tiristores, el gabinete del rectificador es suministrado con un panel operador que monitorea las fallas.

Falla a Tierra, la unidad de monitoreo de falla a tierra está equipado con un monitor y mide la resistencia de aislamiento bajo tierra entre el lazo positivo y negativo con respecto a tierra. Los dispositivos dan alarma cuando la corriente supera el valor seteado.

Parada de Emergencia, la parada de emergencia es requerido (abres la puerta del gabinete, la falla del segundo tiristor, etc.) para controlar el tripeo del interruptor principal. El reseteo de las seguridades es posible solo del panel de control local.

El controlador gestiona la alarma y el tripeo mientras la seguridad de los trips son gestionados por los módulos y relés solo si esta cableado.

Otras Protecciones, también hay protecciones proveídos por el transformador (relé buchholz, termómetro, nivel de aceite, etc.), todos los circuitos auxiliares también están protegidos necesariamente.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA ECONÓMICA

6.1 Lista de Equipos

Para la implementación de los rectificadores y la arquitectura de control propuesta en el capítulo IV, la lista de equipos y accesorios se divide en los siguientes grupos:

- a. Equipos eléctricos, interruptores, transformadores, celdas de media tensión, tablero de protección-control y paneles de control.
- b. Accesorios, en este grupo estará el cableado de campo que cumple con la norma IEC y tuberías revestidas de PVC, tableros eléctricos y accesorios.
- c. Sala de Operaciones, en este grupo estará una estación para los operadores y las licencias de software.
- d. Subestación eléctrica, en este grupo estará una estación para mantenimiento y las licencias de software.

6.2 Cronograma de la Implementación

La ejecución del proyecto se divide en siete etapas:

Tabla 6.1. Etapas para la implementación de los Rectificadores

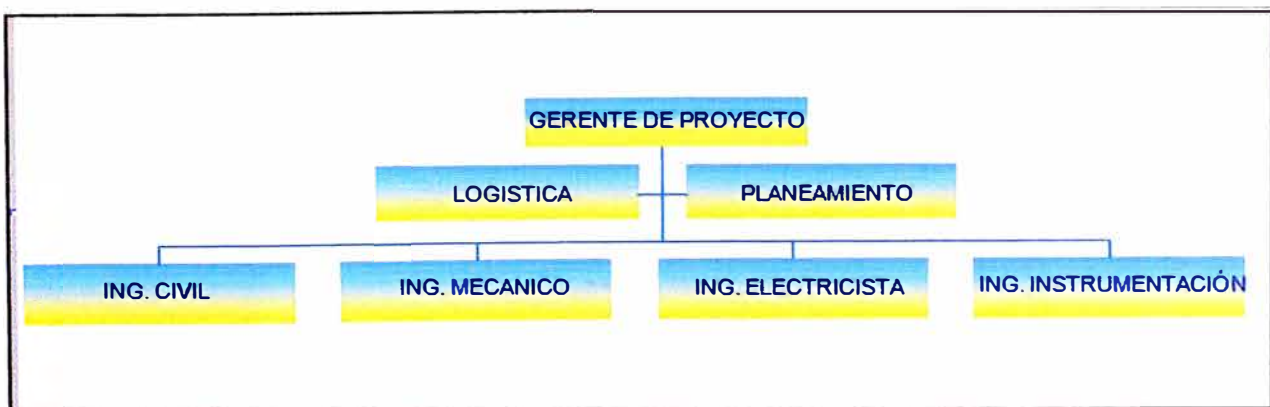
Ítem	Etapa	Fecha Inicio	Fecha Final
1	Inicio del Proyecto	07/01/09	13/02/09
2	Procura de Equipos y Accesorios	10/02/09	01/07/09
3	Ingeniería Básica	10/02/09	15/03/09
4	Ingeniería de Detalle	15/03/09	21/06/09
5	Construcción	02/07/09	12/11/09
6	Comisionamiento	13/11/09	23/11/09
7	Puesta en Marcha	02/12/09	03/12/09

La duración de la implementación es de 1 año.

6.3 Organigrama

El Organigrama para la implementación del Proyecto se muestra a continuación:

Figura 6.1. Organigrama del Proyecto



6.4 Costos Estimados

Se realiza el costeo total del proyecto donde se detalla los precios de los equipos eléctricos y control.

6.4.1 Costos del Proyecto

De la lista de equipos y accesorios, se realiza una estimación de costos. \$

Tabla 6.2. Estimación de Costos

Item	Descripción	Costos(\$)
	Implementación de Rectificadores	4'713,000.000
1	Lista de Equipos	4'063,000.000
1.1	Rectificadores de 1x25kA y 2x20kA	2'008,000.000
1.2	Metalclad Switchgear 10.5kV	450,000.000
1.3	Tablero de Protección 10.5kV Barra 1 y 2	150,000.000
1.4	Tablero de Protección 138kV Trafo 42MVA	50,000.000
1.5	Tablero de Protección 138kV Trafo 22.4MVA	40,000.000
1.6	Metalclad Switchgear 10.5kV Rectificador 2x20kA	80,000.000
1.7	Metalclad Switchgear 10.5kV Rectificador 1x25kA	35,000.000
1.8	Metalclad Switchgear 10.5kV Filtros Nuevos	150,000.000
1.9	Torre de Enfriamiento	140,000.000
1.10	Circuit Switcher	360,000.000
1.11	Transformador de 42MVA	600,000.000
2	Implementación del Proyecto	650,000.000
2.1	Procura de Equipos	400,000.000
2.2	Ingeniería de Detalle	50,000.000
2.3	Construcción	200,000.000

CONCLUSIONES

1. La implementación de este rectificador se adquirió principalmente por motivos de darle confiabilidad a la producción.
2. El estudio de flujo de potencia y análisis de cortocircuito permitió recomendar, verificar y corregir:
 - a. Ajustar el transformador de corriente del lado de 138 kV del transformador RT2 22.4 MVA en 400/5 A, con la finalidad de evitar su saturación ante fallas.
 - b. Cambiar el transformador de corriente del RT1 42 MVA.
 - c. La posición de los TAPs de los transformadores de 42 MVA y 22.4 MVA, estos deben ser posicionados en el TAP 1 de modo que los voltajes de media tensión estén cercanos a los 10 kV, para todos los escenarios simulados.
 - d. Trabajar con una tensión nominal de 10.5 kV en lugar de 10 kV, se logra ahorrar en pérdidas de energía 4,344 dólares por año.
 - e. La barra que alimenta a los filtros existentes y al rectificador de 30 kA, así como sus interruptores deben ser cambiados para evitar posibles daños irreversibles porque supera la capacidad de cortocircuito.
 - f. Los futuros equipos que se compren para el sistema de 460 V y 220 V, tengan capacidades de cortocircuito de 65 kA y 25 kA respectivamente.

3. El estudio de coordinación de protecciones permitió recomendar, verificar y corregir:
 - a. No existe una adecuada coordinación de protecciones en los sistemas de filtros existentes, rectificador 30 kA, planta de ánodos y metales preciosos, tank house, local 1 e intake. Realizar nuevos ajustes a los relés.
 - b. Reemplazo de transformadores de corriente para evitar la saturación y tener una mejor precisión.
4. El estudio de armónicos verifico que la distorsión total armónica es menor a los límites que exige la norma.
5. La implementación de una arquitectura de control permite tener información en tiempo real, historiador para permitir acciones preventivas para la planta.
6. La arquitectura de control mejora la disponibilidad de la planta ya que tiene la capacidad de monitoreo y diagnostico para evitar paradas de planta.

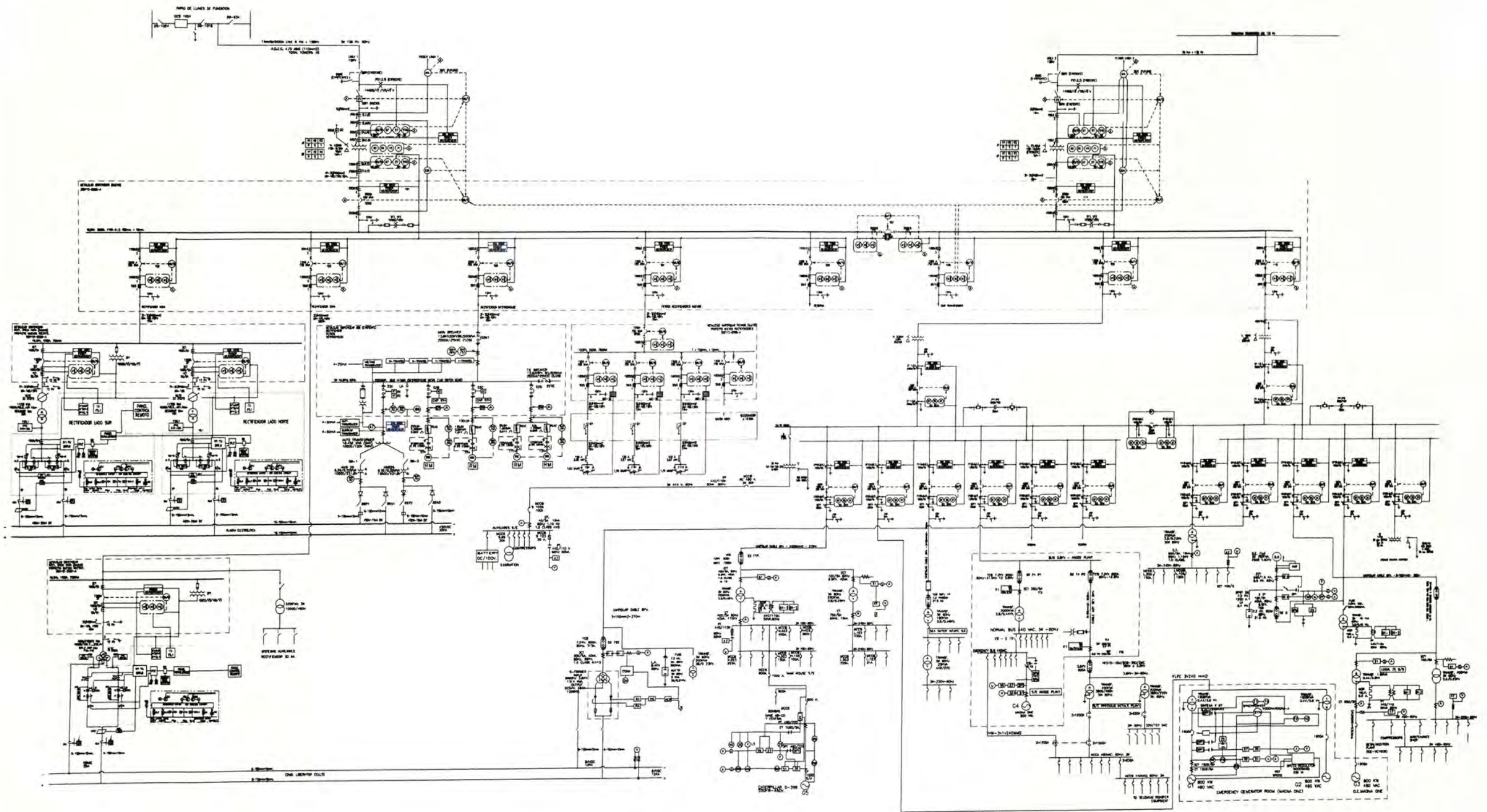
BIBLIOGRAFÍA

1. Creus Solé, Antonio. “Instrumentación Industrial”. 1997. 6ta edición-Editorial marcombo 1997
2. Manuales de los Equipos
 - Manual del Rectificador 2x20 kA-FRIEM
 - Manual del Rectificador 1x25 kA-FRIEM
 - Manual del Transformador TOSHIBA.
 - Manual de Circuit Switcher C&S.
3. Minería en el Perú
 - Website: <http://www.minem.gob.pe/>
4. Refinación del Cobre
 - Website: http://en.wikipedia.org/wiki/Refining_metallurgy

APÉNDICE

APÉNDICE A

DIAGRAMA UNIFILAR

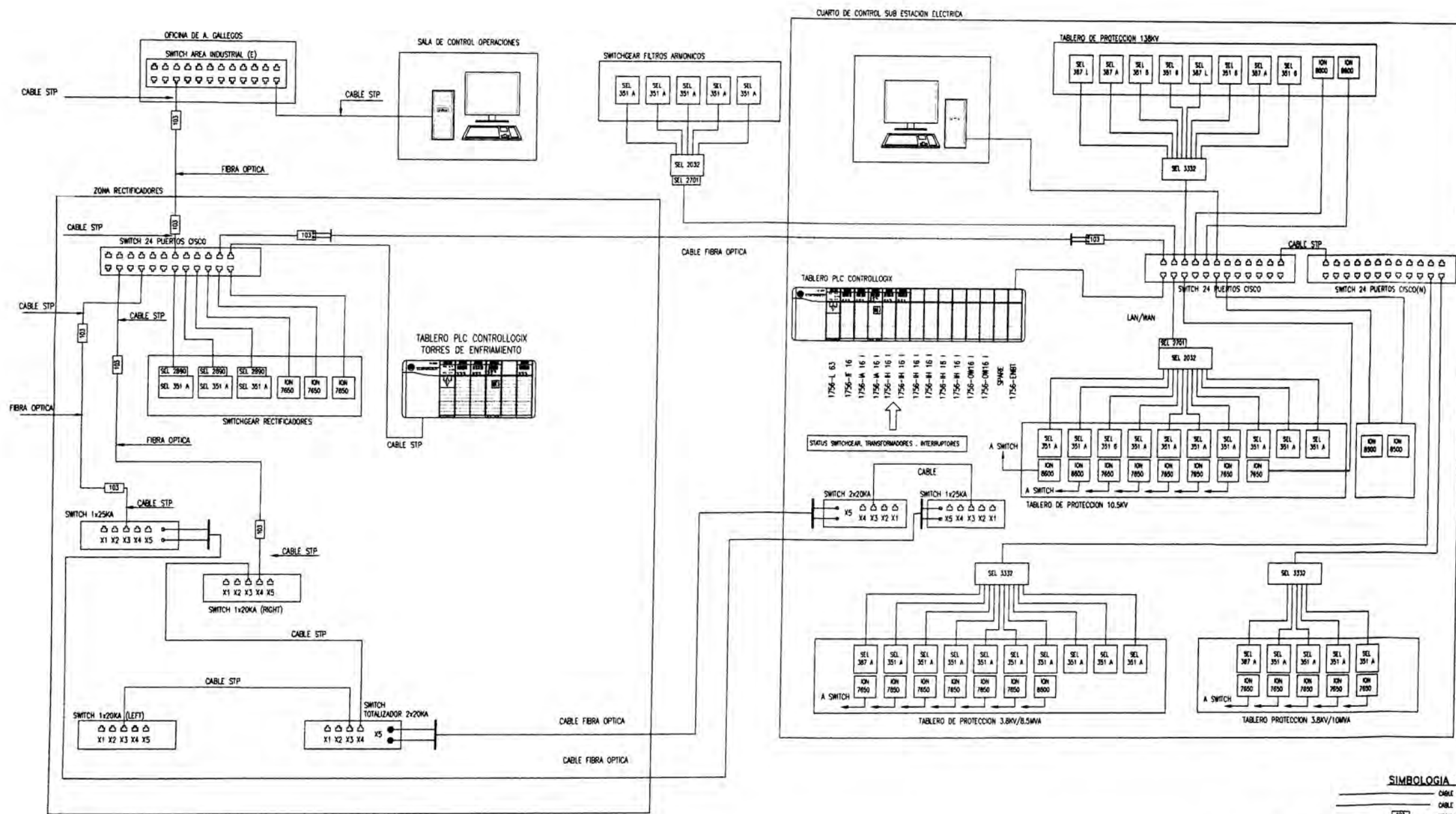


UNI

DIAGRAMA UNIFILAR 138kv, 10.5kv, 3.8Kv

APÉNDICE B

ARQUITECTURA DE CONTROL



UNI

ARQUITECTURA DE CONTROL