

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**INSTALACIÓN, PUESTA EN SERVICIO Y OPERACIÓN  
DE MOTOR EN MT DE MOLINO SAG**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
CARLOS ALEJANDRO BERAUN KOHLER**

**PROMOCIÓN  
2002-II**

**LIMA-PERÚ  
2014**

**INSTALACIÓN, PUESTA EN SERVICIO Y OPERACIÓN  
DE MOTOR EN MT DE MOLINO SAG**

Agradezco en primer lugar a mi madre por su gran esfuerzo incondicional; como también a mi padre, a mi esposa Katherine y a mis pequeños Vasco y Sandro

## SUMARIO

En el presente trabajo se explica el desarrollo del proyecto de instalación, puesta en servicio y operación de motor en media tensión del molino SAG para la nueva planta procesadora de minerales de la mina Toromocho-Junín.

En el informe se desarrolla lo correspondiente al montaje, instalación y puesta en marcha, que es la parte más importante del informe. También se presentan los cálculos y estudios de operatividad y finalmente se explican los métodos de operación del molino SAG una vez instalado.

El objetivo de la planta es producir concentrado de cobre y molibdeno bajo un óptimo cuidado del medio ambiente. El informe se enfoca en el motor de media tensión del molino SAG, el cual es de 12.2 m de diámetro y funciona mediante un motor de 28,000 kW sin engranajes con una transmisión de velocidad variable. En resumen el cilindro está unido al rotor del motor que posee una velocidad infinitamente variable, desde 0 hasta 9.2 rpm, con capacidad total para avance gradual y movimiento paulatino. Parte importante de esta solución es el cicloconvertidor que alimenta al estator y un rectificador que alimenta al rotor.

También se ha considerado el esquema de rechazo automático de carga por mínima frecuencia con el propósito de mantener la seguridad del suministro ante una contingencia severa (o pérdida de un gran bloque de generación en el SEIN) evitando de este modo la exposición prolongada de los equipos del SEIN a variaciones de frecuencia que pueden afectar la vida útil de los mismos.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA</b> .....	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Objetivo del trabajo.....	3
1.3 Evaluación del problema .....	3
1.4 Alcance del trabajo .....	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO</b> .....	7
2.1 Descripción del molino SAG.....	7
2.2 Descripción técnica del motor .....	7
2.2.1 Carcasa de estator .....	9
2.2.2 Paquete magnético.....	10
2.2.3 Bobinado del estator.....	10
2.2.4 Acuñaado de la ranura .....	12
2.2.5 Polo.....	12
2.2.6 Ventilación y refrigeración .....	13
2.2.7 Sensor de entrehierro.....	14
2.2.8 Anillos rozantes y escobillas .....	15
2.2.9 Sistema de sellado.....	16
2.2.10 Especificaciones técnicas .....	17
2.3 Descripción técnica del cicloconvertidor .....	19
2.3.1 Diseño y Operación.....	19
2.3.2 Motor.....	20
2.3.3 Convertidor estático.....	21
2.3.4 Sección de Convertidor de Potencia.....	22
2.3.5 Sistema de enfriamiento.....	22
2.3.6 Descripción de componentes Esenciales .....	23
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MONTAJE, INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO</b> .....	25
3.1 Instalación de las bancadas del motor.....	25

3.2	Estator.....	26
3.2.1.	Comprobación de la redondez del núcleo del estator .....	26
3.2.2	Cambio del estator a la posición de mantenimiento .....	27
3.2.3	Cambio a la posición de funcionamiento (al lado de alimentación) .....	27
3.2.4	Devanado de las juntas de estator.....	27
3.2.5	Fijación del estator .....	27
3.3	Rotor .....	28
3.3.1	Comprobación de la alineación de las corazas del molino. ....	28
3.3.2	Instalación de los polos (en paralelo con el devanado de las juntas de estator)...	28
3.3.3	Instalación de las cubiertas del rotor y las conexiones de anillo deslizante .....	29
3.3.4	Comprobación de la holgura del estator. ....	29
3.4.	Pruebas de resistencia y alta tensión del aislamiento.....	31
3.5	Instalación de las cubiertas del estator, porta-escobillas y escobillas .....	31
3.6	Sistema de sellado de la unidad .....	32
3.7	Sistema de refrigeración .....	33
3.8.	Instalación y cableado de los instrumentos. ....	33
3.9	El Cicloconvertidor.....	34
3.9.1	Fundaciones .....	34
3.9.2	Compartimento de cables .....	34
3.9.3	Instalación del Cicloconvertidor .....	34
3.10	Control Final .....	35
3.11	Puesta en funcionamiento del Cicloconvertidor: Información General .....	36
3.12	Puesta en Funcionamiento del Convertidor Fase 1 (Motor Desconectado) .....	36
3.12.1	Condiciones Previas.....	36
3.12.2	Inspección Visual y Mecánica .....	37
3.12.3	Revisión de desempeño.....	37
3.12.4	Revisión de operación con alta tensión aplicada.....	38
3.13	Puesta en funcionamiento Fase 2: Planta de poder y unidad de enfriamiento .....	38
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>CÁLCULOS, DISEÑO E INGENIERÍA.....</b>		
4.1	Suministro eléctrico en 220 kV - Proyecto minero Toromocho .....	39
4.1.1	Introducción .....	39
4.1.2	Alcances .....	39
4.1.3	Descripción del sistema eléctrico del proyecto.....	40
4.1.4	Implementación del rechazo de carga por mínima frecuencia.....	44
4.1.5	Toma de carga.....	45

4.1.6	Estudio de Protecciones Eléctricas.....	46
4.2	Datos del diseño del cicloconvertidor .....	47
4.2.1	Características técnicas de diseño .....	47
4.2.2	Métodos para Controlar el Cicloconvertidor .....	52
4.3	Filtros de armónicos y compensación reactiva.....	55
4.3.1	Diseño.....	55
4.3.2	Distribución de la energía reactiva capacitiva en grupos de filtros y sub grupos ..	55
4.3.3	Número de subgrupos de filtros y sus frecuencias dentro de cada grupo.....	56
4.3.4	Sistemas de filtro Instalado .....	57
4.3.5	Cargas que producen armónicos .....	59
4.3.6	Descripción de equipamiento .....	60
4.3.7	Lógica de control de los filtros.....	61
4.3.8	Lógica de Control de Filtros de Armónicos y Compensación Reactiva .....	62
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>MÉTODOS DE OPERACIÓN .....</b>		
		<b>64</b>
5.1	Introducción .....	64
5.2	Selección de Lugar de Control .....	65
5.3	Puesta en Marcha del Sistema .....	66
5.4	Secuencia de Arranque del Molino .....	67
5.5	Secuencias de Detención del Molino .....	68
5.6	Restauración Controlada.....	69
5.7	Protección contra Carga Congelada.....	70
5.8	Otros Comandos .....	70
5.8.1	Modo Inching (Posicionamiento).....	70
5.8.2	Modo Creeping .....	70
5.8.3	Modo Normal .....	70
5.8.4	Reducir Mill Rocking.....	70
5.8.5	Manual Lowering .....	71
5.8.6	Turn 180° .....	71
5.8.7	Frozen Charge Remover.....	71
5.9	Función Fallas y Reset.....	71
5.10	Detención de Emergencia.....	72
5.11	Enclavamientos del sistema.....	72
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		
		<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		
		<b>75</b>

## INTRODUCCIÓN

El trabajo surge por la necesidad de la empresa Minera Chinalco de contar con un molino SAG para su nueva planta procesadora de minerales de la mina Toromocho-Junín.

Dada la complejidad del tema, se ha organizado el informe en cinco capítulos:

- El primer capítulo desarrolla la descripción del problema, el objetivo, y la solución de la problemática, en donde se especifica el proceso de molienda y sus etapas, explicando mediante un diagrama de flujo el funcionamiento de la molienda.
- En un segundo capítulo, titulado "Descripción del Caso de Estudio", realiza una descripción más detallada del molino SAG, para luego hacer la descripción técnica del motor, es decir de las partes que la componen (Carcasa de estator, Paquete magnético, Bobinado del estator, Acuña de la ranura, Polo, Ventilación y refrigeración, Sensor de entrehierro, Anillos rozantes y escobillas, Sistema de sellado), así como las especificaciones técnicas del motor. También se realiza la descripción técnica del cicloconvertidor explicando su diseño y operación, el motor, el convertidor estático, la sección de convertidor de potencia, el sistema de enfriamiento, y la descripción de componentes esenciales (Tiristores, Supervisión de Tiristores, Circuito Snubber, Protección de Sobretensión/Sobrecarga, Carga Base, interruptores, Transformador de Corriente y Potencial).
- El tercer capítulo "Montaje, instalación y puesta en servicio) abarca los siguientes ítems: La instalación de las bancadas del motor, la instalación del estator y del rotor, las pruebas de resistencia y alta tensión del aislamiento, la instalación de las cubiertas del estator, porta-escobillas y escobillas, el sistema de sellado de la unidad, el sistema de refrigeración, la instalación y cableado de los instrumentos, el cicloconvertidor, el control final, la puesta en funcionamiento del Cicloconvertidor y finalmente la de la planta de poder y unidad de enfriamiento.
- En el capítulo IV "Cálculos, diseño e ingeniería" se desarrollan los temas involucrados al suministro eléctrico en 220 kV - proyecto minero Toromocho (Conexión al sistema eléctrico interconectado nacional, características de las líneas de transmisión en 220 kV, descripción de la subestación principal Toromocho, principales equipos de la planta concentradora, requerimiento de energía eléctrica del proyecto Toromocho.). También los datos del diseño del cicloconvertidor (Características técnicas de diseño, métodos para

Controlar el Cicloconvertidor, características específicas del sistema.) y finalmente lo relacionado a los filtros de armónicos y compensación reactiva (Diseño, distribución de la Energía Reactiva Capacitiva en grupos de filtros y sus sub grupos, número de sub grupos de Filtros y sus frecuencias dentro de cada grupo de filtros, sistemas de filtro Instalado, cargas que producen armónicos, descripción de equipamiento, lógica de control de los filtros, Lógica de Control de Filtros de Armónicos y Compensación Reactiva).

- Finalmente en el capítulo V se desarrollan los temas involucrados a la operación del sistema de accionamiento sin engranajes del molino SAG.

## **CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA**

En este capítulo se realiza el planteamiento de ingeniería del problema, para ello primeramente se describe el problema y luego se expone el objetivo del trabajo, también se evalúa el problema y se precisan los alcances del informe.

### **1.1 Descripción del problema**

Necesidad de la empresa Minera Chinalco de contar con un molino SAG para su planta procesadora de minerales de la mina Toromocho-Junín.

El molino SAG (semiautógeno) es parte de la planta de procesos de la mina Toromocho. Este molino es el encargado de recibir el material de la chancadora primaria y luego reducir el tamaño del material, para luego distribuirlo a los molinos de bolas.

### **1.2 Objetivo del trabajo**

El objetivo es garantizar la correcta instalación, puesta en servicio y operación del motor en MT del molino SAG, para asegurar su correcto funcionamiento.

### **1.3 Evaluación del problema**

El objetivo de la planta de procesos es producir concentrado de cobre y molibdeno bajo un óptimo cuidado del medio ambiente. Las áreas con las que cuenta la planta son las siguientes: Chancado Primario, Molienda, Flotación BULK, flotación del molibdeno, flotación de Cobre, espesamiento.

El enfoque del presente informe es el motor de media tensión del molino SAG, en el cual se explica su correcta instalación, puesta en servicio y operación, para los fines pertinentes de la empresa minera Chinalco.

Como se mencionó, luego de la etapa de chancado primario, continua el proceso de molienda, el cual se realiza en dos etapas:

- Primera etapa.- Se utiliza un solo molino SAG (28MW) que opera en circuito cerrado junto con dos chancadoras Pebbles, para moler el mineral grueso hasta obtener partículas P80 de 5739 micrones. Una vez molido el material, si este no cumple con los requerimientos, es pasado a las chancadoras pebbles para luego regresar al molino SAG hasta cumplir las medidas específicas.
- Segunda etapa.- Consta de dos molinos de bolas operando en circuito cerrado con hidrociclones para obtener un producto final de 135 micrones como P80. En este caso, el

material primero pasa por los hidrociclones para separar las partículas finas y enviarlas al proceso de flotación. Las partículas gruesas retornan a los molinos de bolas para luego ser enviados nuevamente a los hidrociclones y continuar el proceso. La figura 1.1 muestra el diagrama de flujo de circuito de molienda.

Ampliando la explicación del proceso de molienda, la mezcla del molino SAG se descarga por medio de una zaranda corta, pasa a una zaranda vibratoria de dos pisos que lleva el material que está por debajo del tamaño deseado hasta el tanque de alimentación del ciclón. Dos zarandas una operando y otra en espera, montados en un sistema de rieles, permiten un rápido cambio cuando se realiza mantenimiento a la zaranda.

El material de tamaño superior al deseado (+15mm) es reducido de tamaño posteriormente, utilizando dos trituradoras cónicas de cabeza corta en paralelo con un ajuste de lado cerrado de 13 mm. Los pebbles chancados son devueltos al transportador de alimentación del molino SAG.

Respecto a los molinos de bolas operando en paralelo, estos muelen el mineral para obtener el tamaño final del producto. Los molinos descargan en un sumidero común para alimentar a los hidrociclones.

Cada molino es alimentado por el underflow de dos nidos de hidrociclones. Cada nido consta de 14 ciclones operativos de 660 mm. y 4 en stand-by.

Los productos combinados de la pulpa del molino SAG y de los molinos de bolas se bombean mediante cuatro bombas centrífugas horizontales para pulpa, totalmente construidas de metal, para alimentar a las baterías de ciclones cuyo reboses son dirigidos hacia la flotación rougher del cobre.

Se añade cal seca en los pebbles directamente en el transportador de alimentación SAG para control de pH en la flotación rougher.

Si bien, como se puede observar, la planta posee muchos motores para cada uno de sus procesos, el presente informe se enfoca en el motor de MT del molino SAG, el cual fue seleccionado debido a que es de suma importancia, ya que está en la línea crítica de producción y una falla en este motor, paralizaría toda la producción.



#### **1.4 Alcance del trabajo**

El informe desarrolla preliminarmente el marco situacional del molino SAG, haciendo una descripción detallada, explicando sus componentes más importantes.

Seguidamente se desarrolla lo correspondiente al montaje, instalación y puesta en marcha, que es la parte más importante del informe.

En el cuarto capítulo se realizan los cálculos y estudios de operatividad.

Finalmente se explican los métodos de operación del molino SAG una vez instalado.

## **CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se describe todo lo concerniente al caso de estudio, el molino SAG, y los componentes más importantes: el motor y el cicloconvertidor.

### **2.1 Descripción del molino SAG**

El molino SAG de 40 pies de diámetro (12.2 m) funciona mediante un motor de 28,000 kW sin engranajes con una transmisión de velocidad variable.

El sistema de transmisión sin engranajes suministrará una velocidad infinitamente variable, desde 0 hasta 9.2 rpm, con capacidad total para avance gradual y movimiento paulatino. Cuenta con:

- Un estator (carcaza, paquete magnético y bobinado de estator).
- Un rotor de polos salientes con anillos rozantes y escobillas.
- Un sistema de refrigeración y ventilación.
- un sistema de sobrepresión.
- un sistema de sellado.
- un sistema de sensores de entrehierro y temperaturas.
- un cicloconvertidor que alimenta al estator, y
- un rectificador que alimenta al rotor.

El motor de Molino SAG (GMD) es fuerte y rígido; Diseñado para una máxima rigidez, opone masa y músculo en contra del torque y el calor para retener el control de concentricidad y precisión durante el proceso de molienda. Es sinónimo de bajo mantenimiento programado realizado durante el tiempo planificado de detención con el cual se logra mayor disponibilidad.

El cicloconvertidor desde la década de los treinta solo se utiliza para suministro de máquinas síncronas con frecuencia variable desde la introducción de sistema de semiconductores en las áreas de ingeniería de control electrónico y potencia. En la figura 2.1 se muestra un esquema referencial del molino SAG.

### **2.2 Descripción técnica del motor**

El motor trifásico síncrono, tipo WAZ 1500/137/76 tiene un diseño envolvente. Está provisto de 76 unidades de polos acoplados directamente a la brida del molino. Posee un circuito cerrado de aire enfriado mediante intercambiadores de calor aire-agua.

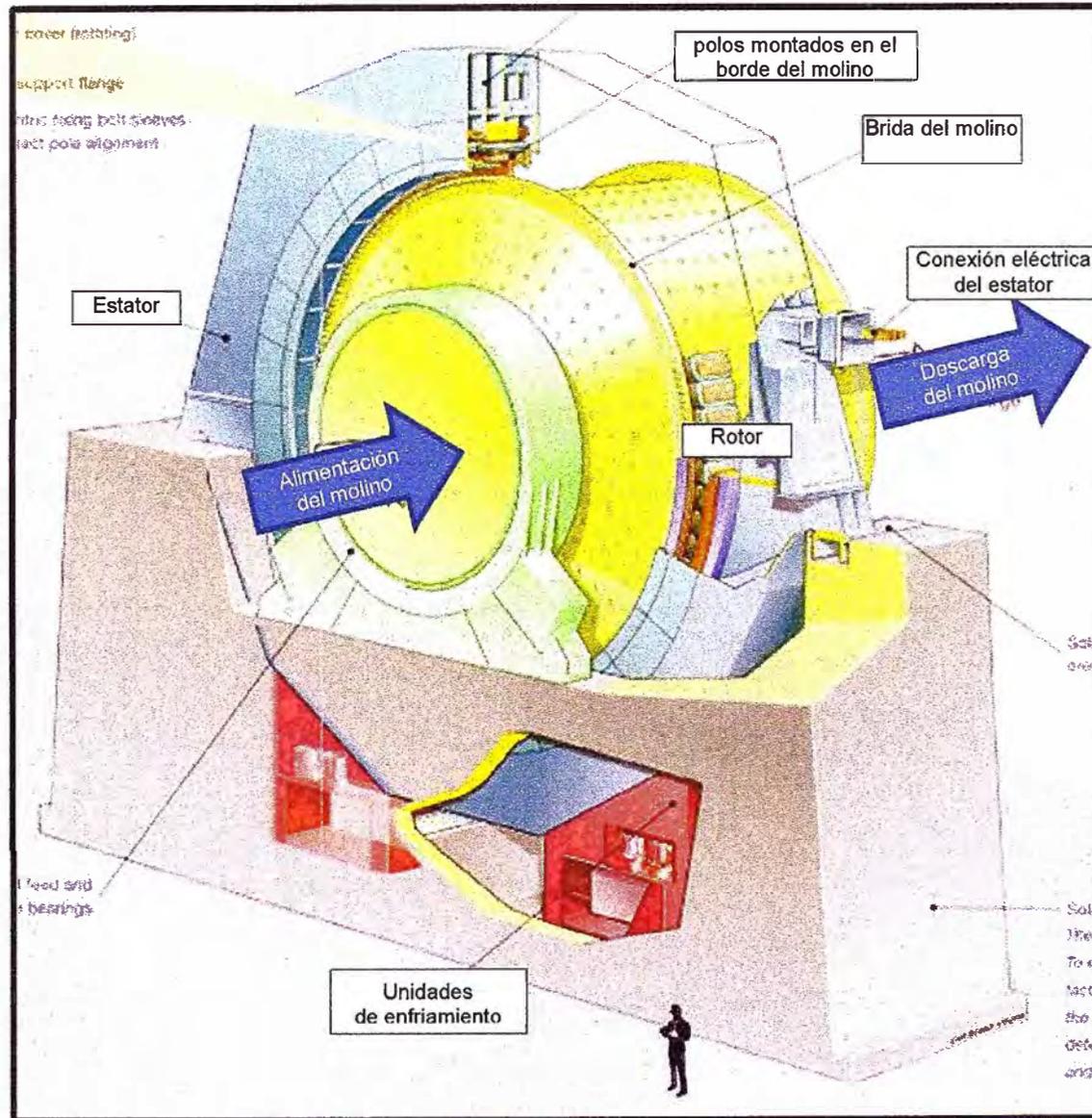
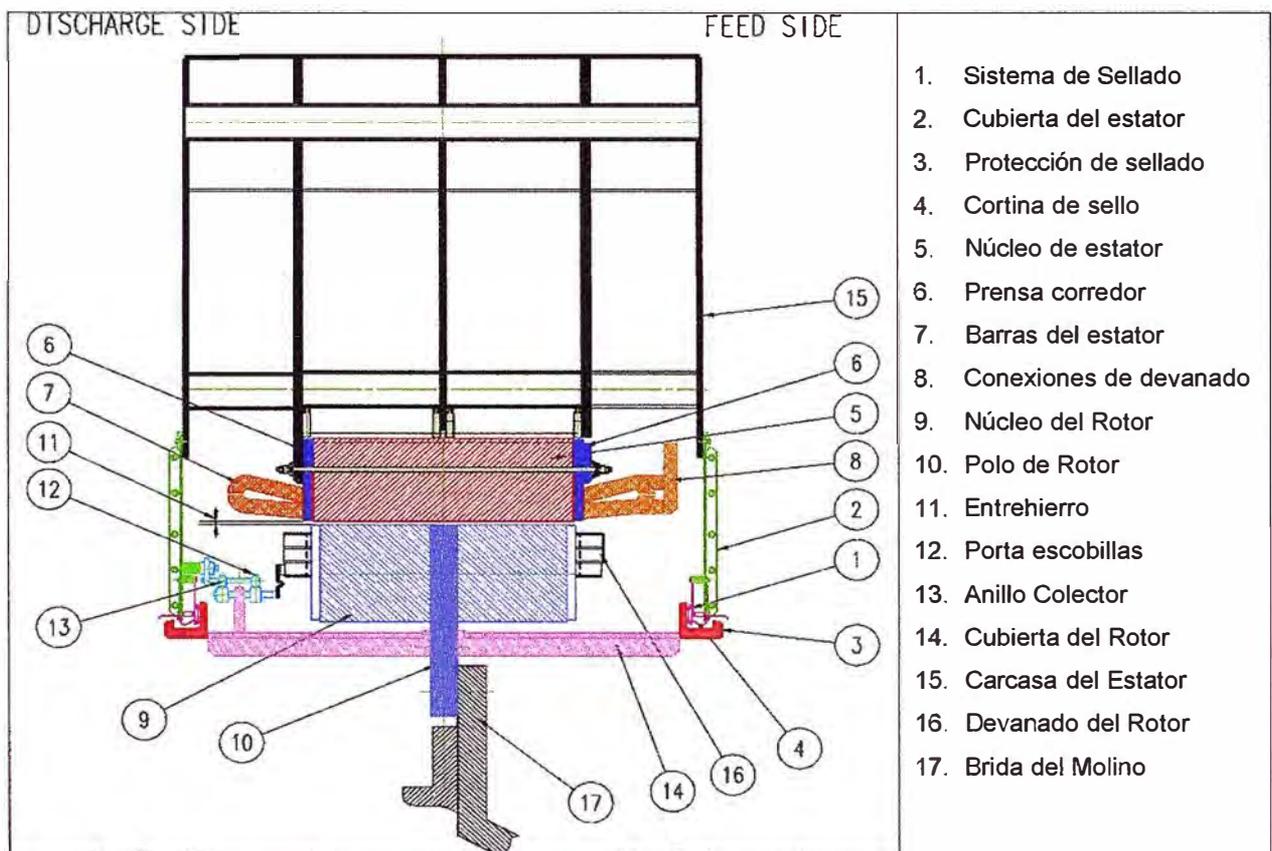


Fig.2.1: Esquema del molino SAG

Estos intercambiadores de calor aire-agua están montados en diferentes cajas de refrigeración. La excitación al bobinado del rotor tiene lugar por medio de escobillas de carbón y anillos rozantes. Dentro de la carcasa del estator hay montadas seis resistencias de calefacción, que previenen de la condensación durante los periodos de parada.

El cableado de señal para la instrumentación así como el suministro de potencia para motoventiladores, ventiladores de sobrepresión y resistencias de calefacción está rutado a cuatro cajas auxiliares situadas en la parte exterior de la carcasa. Todas las piezas distanciadoras y aislantes en el estator y el bobinado son de material aislante clase F.

En la figura 2.2 se muestra un esquema general de sus partes.



**Fig. 2.2:** Esquema general de las partes del motor

A continuación se explican las partes principales del motor (Carcasa de estator, Paquete magnético, Bobinado del estator, Acuña de la ranura, Polo, Ventilación y refrigeración, Sensor de entrehierro, Anillos rozantes y escobillas, Sistema de sellado), así como las especificaciones técnicas del motor.

### 2.2.1 Carcasa de estator

La carcasa del estator (Figura 2.3) es totalmente soldada, consiste en cuartos y aloja el paquete magnético del estator. Su diseño es tal que todas las fuerzas que aparecen en un funcionamiento normal, en condiciones de cortocircuito o las debidas a cambios térmicos se transmiten de forma segura a las fundaciones.

Los componentes principales de la carcasa son:

- Cinco anillos de acero, uno actúa de soporte del paquete magnético, el del medio sirve de refuerzo y el tercero hace de soporte para las placas de presión del paquete. Los dos restantes (en ambos extremos) proporcionan protección y soporte para las cubiertas del estator.
- Tubos de acero, dispuestos a lo largo de todo el diámetro de los anillos y soldados entre estos, actuando de elemento de unión de los anillos y repartiendo los esfuerzos de los bulones de presión del paquete.
- Dos placas de acero, soldadas en la parte inferior de los cuartos inferiores, sirven de soporte y fijación a las placas de fundación.
- Externamente, toda la estructura está cerrada con una envolvente de acero soldada a los anillos.



**Fig. 2.3:** Carcaza de estator

### 2.2.2 Paquete magnético

El paquete magnético del estator está diseñado para transmitir el flujo magnético creado por los polos con la mínima corriente y mínimas pérdidas. El paquete permite una ventilación de aire que circula a través de conductos que lo atraviesan, para asegurar la refrigeración del estator y el rotor.

El paquete del estator está formado por láminas (chapas magnéticas) dispuestas a lo largo del diámetro interior de los anillos centrales. Está formado por chapas de acero magnético de baja pérdida y con un espesor de 0.5 mm.

Después del corte, las chapas magnéticas son esmaltadas por ambas caras.

### 2.2.3 Bobinado del estator

El bobinado del estator está diseñado para soportar la corriente trifásica sinusoidal,

proveniente del cicloconvertidor, que provoca el movimiento del rotor.

En cada ranura del paquete magnético se alojan dos barras del bobinado. La barra del fondo de la ranura se conoce como barra “de fondo” y la barra externa es la barra “de alto”. Ver Figura 2.4.



**Fig. 2.4:** Bobinado del estator

La barra formada debe tener un buen contacto con el paquete; primero para conseguir un perfecto asiento mecánico de la barra en la ranura, de forma que no se vea desplazada por el campo magnético y segundo, para prevenir diferencias entre el potencial de la barra y el paquete. Diferencias de potencial llevan a descargas de efecto corona, las cuales, con el tiempo, acaban dañando el aislamiento.

Las barras aisladas se insertan en las ranuras del paquete y van fijadas mediante cuñas de láminas de fibra de vidrio.

El aislamiento está compuesto por materias primas de excelente calidad y tratado con el proceso Micadur.

Las barras preformadas, que consisten en filamentos aislados, son aisladas con cinta continua de fibra de vidrio y mica de grado fino. Tras el proceso de formación y compactación, se aplica al aislamiento principal las capas de protección contra el efecto corona, tanto a la parte de la ranura como a la de fuera.

Las barras son entonces impregnadas en vacío con una resina sintética, compactadas con herramientas especialmente diseñadas y curadas en el horno Micadur. Las conexiones de las barras son también aisladas con cinta mica glass e impregnadas con resina.

Un proceso de calor cura la resina sintética del aislamiento de las conexiones y los cordones. De esta forma se obtiene un fuerte asentamiento del bobinado, el cual es capaz de soportar todos los esfuerzos, incluso aquellos debidos a cortocircuitos en

condiciones desfavorables.

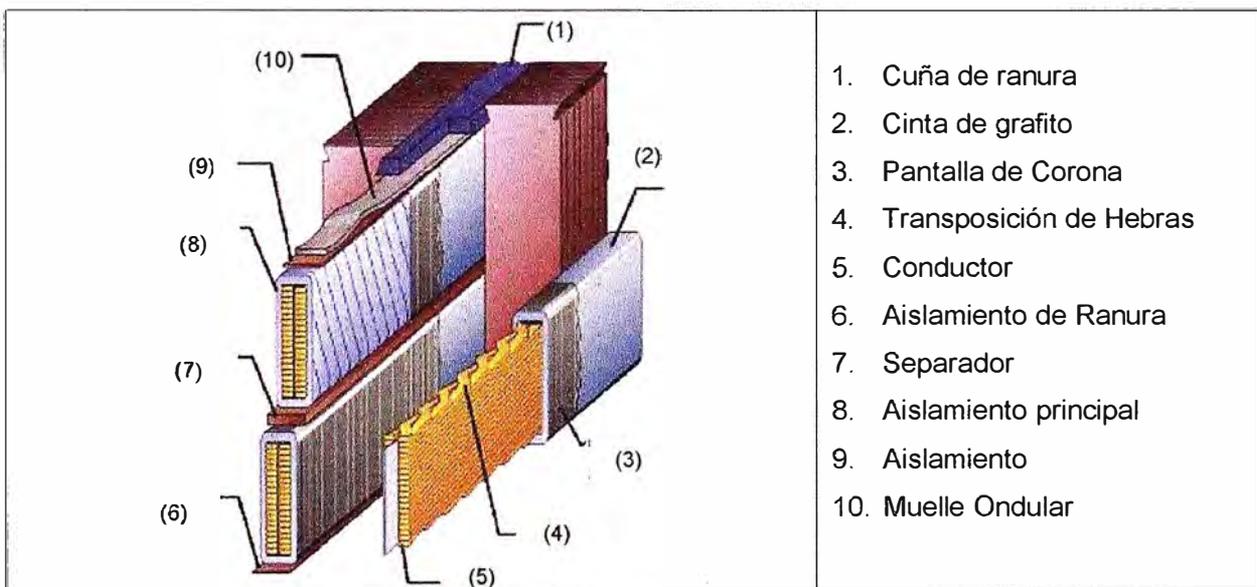
Para obtener un soporte y espaciado del bobinado, se usan cordones que se amarran a las cabezas de las barras y finalmente son inyectados con resina, lo cual, tras el proceso de curado, garantiza que el soporte espaciador sea firme y sólido.

El método de aislamiento, proporciona un aislamiento homogéneo sin inclusiones de aire caracterizado por bajas pérdidas dieléctricas, alta estabilidad térmica e insensibilidad ante la humedad, aceite u otros agentes contaminantes. Los materiales utilizados para el aislamiento cumplen con los requerimientos de clase F.

La temperatura del bobinado del estator se monitorea mediante veinticuatro detectores dobles de temperatura tipo Pt-100 distribuidos uniformemente a lo largo de la periferia y alojados entre las barras de fondo y alto, a media altura.

#### 2.2.4 Acuñaado de la ranura

Durante el funcionamiento, el bobinado es objeto de fuertes esfuerzos electrodinámicos. Si las barras no se ajustan firmemente en las ranuras, las fuerzas electromagnéticas pueden producir vibración en las barras, lo que lleva a un rápido deterioro del aislamiento. Por tanto, es muy importante tener un ajuste firme y un acuñaado duradero.



**Fig. 2.5:** Esquema de la ranura acuñaada

Entre barras de fondo y alto se inserta una tira intermedia aislante. Las ranuras se cierran finalmente con tiras de relleno, tiras onduladas tipo muelle y cuñas de ranura. La pretensión de las tiras onduladas tipo muelle varía en función del número de tiras de relleno.

#### 2.2.5 Polo

El polo (Figura 2.6) es una unidad compacta y básicamente consiste en:

- El cuerpo del polo está compuesto por una placa central y chapas cortadas de 3mm de

espesor, apiladas y compactadas con presión mediante dos placas en los extremos y un bulón que la atraviesa va soldado a éstas últimas. Las pérdidas del polo se minimizan con este método

- El bobinado polar se hace con pletinas de cobre aislado con vidrio de mica. Para compactarlo y evitar que haya aire entre las pletinas, se introduce el polo completo en el tanque de impregnación y tras este proceso se cura en el horno. El bobinado se aísla del hierro mediante cordones de fibra de vidrio impregnados con resina.



**Fig. 2.6:** Esquema de la ranura acuñada

Cada polo se fija a la brida del molino mediante 3 bulones de alta calidad pretenplados. El bulón central conecta los polos a la brida durante el montaje. Los otros dos soportan todas las fuerzas, uniendo la placa central del polo y la brida del molino mediante dos casquillos excéntricos cada uno, de forma que esta unión permite ajustar la posición unos 5mm en todas las direcciones, sobre todo para ajustar el entrehierro.

### **2.2.6 Ventilación y refrigeración**

Las pérdidas del motor (cobre, hierro, caudal de aire, etc.) son disipadas mediante aire refrigerado dirigido en lo posible a los lugares donde se produce el calentamiento.

Las cajas de refrigeración (Figura 2.7) están separadas de la carcasa. La conexión se realiza con juntas de goma elásticas unidas a la parte inferior de la carcasa.

El movimiento del aire de refrigeración se consigue con ventiladores montados en las

cajas de refrigeración y fluye de forma radial entre los polos, el entrehierro, el paquete magnético y el bobinado, para volver de nuevo a las cajas de refrigeración, donde se enfría al atravesar por el refrigerante.

La temperatura se monitorea en los siguientes puntos, para tener un control global de la ventilación y el sistema de refrigeración:

- 48 RTDs en el bobinado (24 funcionando+ 24 en espera).
- 4 RTDs en el lado de aire frío.
- 2 RTDs en el lado de aire caliente.
- 2 RTDs en la entrada de agua fría.
- 2 RTDs en la salida de agua caliente.
- 8 RTDs en paquete del estator.
- 8 TRDs en la carcasa.



**Fig. 2.7:** Caja de refrigeración

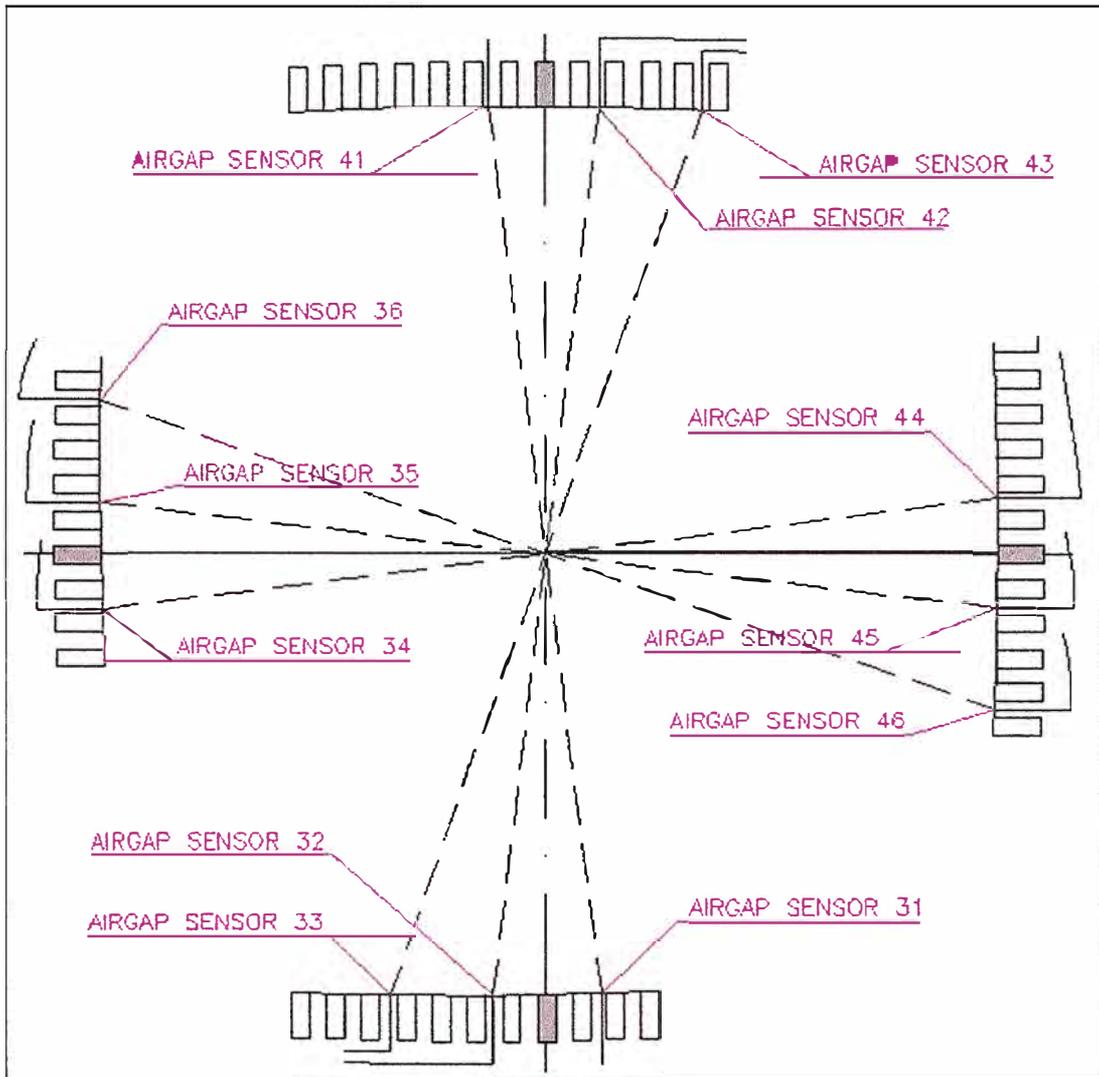
El caudal de agua se chequea mediante dos caudalímetros (uno por cada caja de refrigeración) con indicador local de caudal y detector de caudal bajo.

Posibles fugas de agua son también detectadas mediante dos sensores y dos detectores de humedad, situados estratégicamente en la carcasa. El sistema de refrigeración se ha diseñado de tal forma que el agua está en la parte de abajo del motor, de forma que una posible fuga no afectaría directamente a la parte más sensible de la máquina: el bobinado.

### **2.2.7 Sensor de entrehierro**

El sistema de medida del entrehierro consiste en doce sensores instalados a lo largo del paquete magnético en las verticales y horizontales del mismo, como se indica en la

figura 2.8.



**Fig. 2.8:** Sistema de medida del entrehierro

Las medidas se toman en esas posiciones, para tener valores de medidas de entrehierros en la horizontal y vertical, así como excentricidades.

En cada posición vertical y horizontal se instalan tres sensores, a mitad de altura de paquete, con una configuración de pares diametralmente opuestos.

La razón de usar tres sensores en cada posición es para tener la redundancia necesaria en caso de que un sensor falle (falta de señal) y al mismo tiempo otro sensor quede entre dos polos. En ese caso aun tendríamos un sensor que daría una señal válida del entrehierro incluso estando el molino parado.

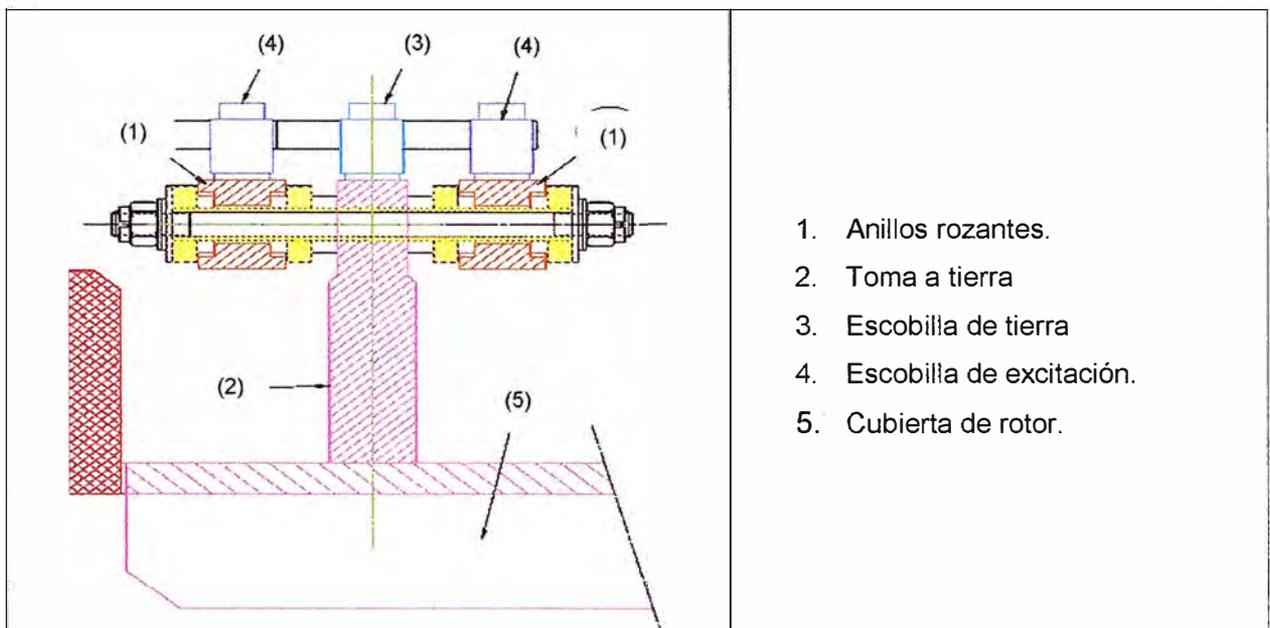
En caso de que un sensor falle (el propio sensor, el convertidor de señal o el cable de unión) no hay inconveniente en arrancar el molino, solamente hay una falta de redundancia en esa posición y el sensor debe ser reparado en la siguiente parada de mantenimiento.

### 2.2.8 Anillos rozantes y escobillas

Los anillos rozantes permiten la transmisión de la corriente de excitación del portaescobillas estático al bobinado del rotor en movimiento. Básicamente está compuesto por doce segmentos de cobre cada anillo, y son soportados en las cubiertas del rotor. Todos los segmentos están conectados al siguiente mediante dos placas en ambos extremos y un pasador, para asegurar una transición suave de las escobillas en las juntas, de forma que tengan menor desgaste.

Atornillados a los anillos se utilizan dos bulones aislados para la conexión a los terminales del rotor.

Las escobillas se fijan al estator por medio de bulones aislados. Hay tres sets de portaescobillas, dos para la excitación del rotor (conteniendo diez escobillas y portaescobillas cada una) y una para la toma a tierra (conteniendo dos escobillas y portaescobillas). Ver detalle en la Fig. 2.9



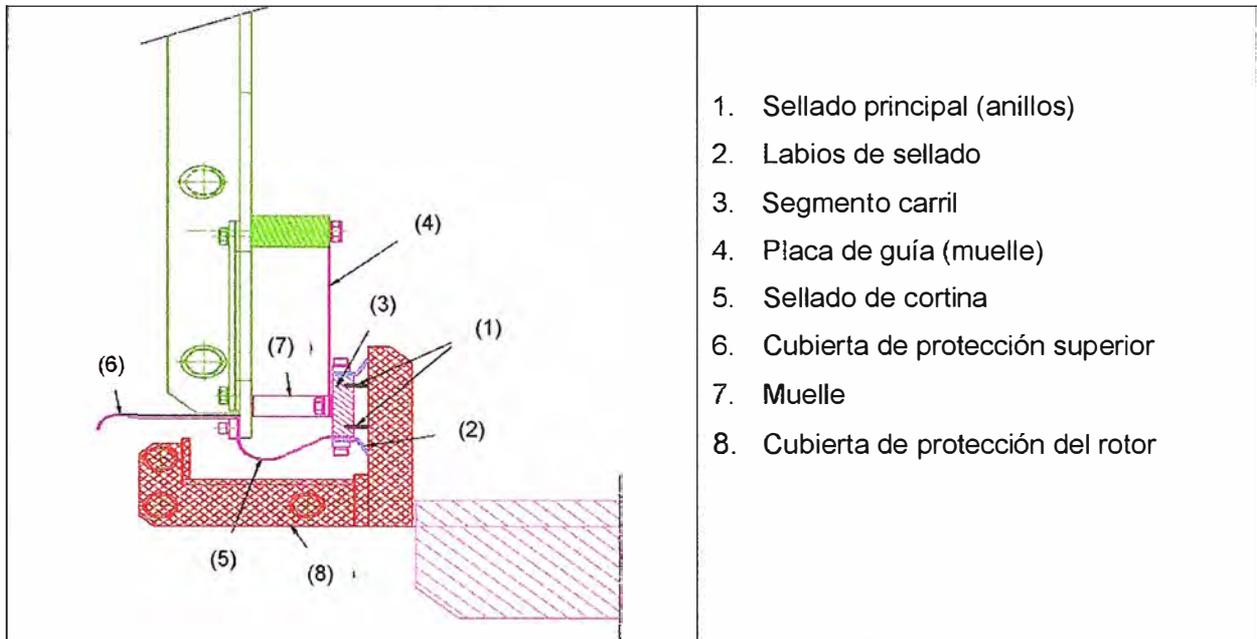
**Fig. 2.9:** Anillos rozantes y portaescobilla

### 2.2.9 Sistema de sellado

Para asegurar el grado de protección requerida, se provee un sistema de sellado entre el rotor y el estator. Las características principales son, en primer lugar, que sea axial, para mantener el funcionamiento bajo la relativa gran deformación que sufre el molino, en segundo lugar, que no se use grasa y en tercer lugar, que se asegure la posición con un muelle para garantizar el sellado aunque exista un movimiento axial del molino de  $\pm 5$  mm. Los límites son alta presión para una larga vida, y baja presión para un sellado adecuado.

Según se muestra en la figura 2.10, la parte activa de este sistema son dos anillos principales (1) de una mezcla de bronce y teflón y recubiertos por una protección mecánica. La vida mínima estimada está en el orden de 16-20.000 horas de

funcionamiento, dependiendo de las condiciones ambientales. El sistema está monitoreado y salta una alarma cuando quedan 2.000 horas de funcionamiento antes de llegar a gastarse completamente (hay un sensor en el segmento carril (3) que hace contacto con el rotor, el cual está conectado a tierra, cuando los anillos de sellado están casi desgastados). Esto permite hacer un planeamiento para trabajos de mantenimiento.



**Fig. 2.10** Sistema de sellado

Para mantener la presión interna del motor por encima de la atmosférica, en ambos lados van fijados a la carcasa dos ventiladores de sobrepresión (4 en total). Este sistema asegura que, en caso de un fallo en el sistema de sellado, será el aire de dentro de la máquina el que salga fuera, evitando así la entrada al motor de partículas, contaminación, etc.

### 2.2.10 Especificaciones técnicas

Se muestran en las siguientes tablas:

**TABLA N° 2.1** Datos Generales 1

<b>Número del Proyecto</b>	G0B050
<b>Tipo de Maquina</b>	WAZ 1500/137/76
<b>Clase de Aislamiento (Estator)</b>	F
<b>Clase de temperatura</b>	B
<b>Estanqueidad</b>	IP 55
<b>Pintado</b>	RAL 7030

TABLA N° 2.2 Datos Generales 2

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia Aparente Natural	29500	KVA
Potencia Natural	28000	KW
Tensión Nominal	5730	V
Intensidad Nominal	2972.4	A
Frecuencia Nominal	5.9	Hz
Par (Arranque)	28720(150%)	KNm
Par (Nominal)	19810	KNm
Numero de Polos	76	
Numero de Fases	3	
Conexión	Y	
Velocidad Nominal	9.31	Rpm
Clase de Aislamiento del (Rotor)	F	
Tensión Nominal de Excitación	490	V
Intensidad Nominal de Excitación	645	A
Estándares	Nema	
Dirección de rotación	both	

Tabla 2.3: Datos Eléctricos 1

	Unidad	Velocidad nominal	Velocidad max.	Arranque
Velocidad	Rpm	9.31	9.8	---
Par	%	100	95	150
Frecuencia	Hz	5.89	6.2	---
U1(a)	V	5730	5730	Aprox 100
I1	A	2972	2972	4458
Factor de Potencia	0.97			
Pt	Kw	28000	28000	Aprox 0
Uf	V	490	460	720
If	A	645	605	945

**Tabla 2.4:** Datos Eléctricos 2

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Resistencia del Bobinado (20°C)	
Estator (cada fase)	0.014819 ohm
Rotor	0.9146 ohm
Capacidad	
Estator en estrella	6.111 uF
Rotor	1.187 uF
Anillos Rozantes	
Diámetro Nominal	14354mm
Numero de Segmentos	12
Escobillas y Porta Escobillas	
Portaescobillas	22
Escobillas	20+2
Calidad	E 436 +CM5H
Dimensiones	25X32mm
Presion	18 Kpa
Max. Densidad de corriente en las escobillas	12 A/cm <sup>2</sup>
Aislamiento	
1. Estator	
Clase	F (155°C)
Temperatura max.	B (120°C)
2. Rotor	
Clase	F (155°C)
Temperatura max.	B (120°C)

### 2.3 Descripción técnica del cicloconvertidor

En esta sección se desarrollan los siguientes ítems: diseño y operación, motor, convertidor estático, sección de convertidor de potencia, sistema de enfriamiento, descripción de componentes esenciales.

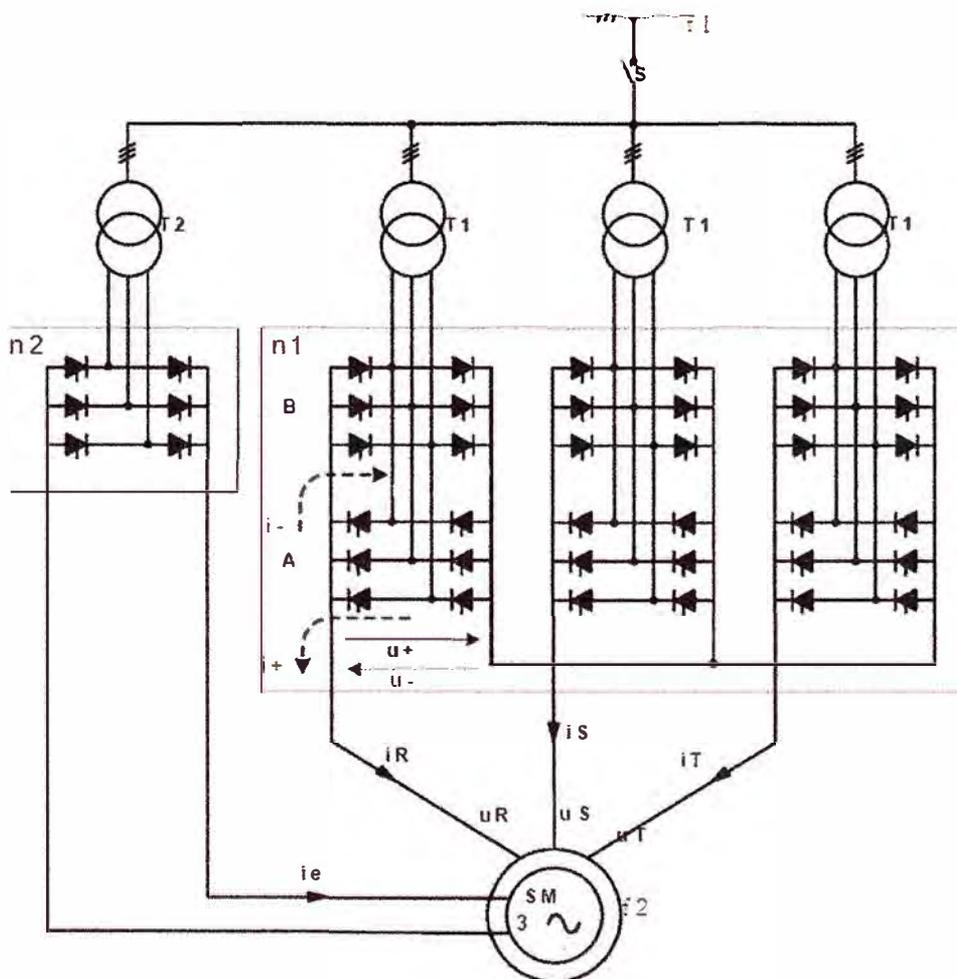
#### 2.3.1 Diseño y Operación

La figura 2.11 muestra el diagrama de circuito de la sección de potencia (sistema de 6 pulsos) con el motor síncrono, el cicloconvertidor para suministro del estator con frecuencia variable y el rectificador controlable para el embobinado de excitación del motor.

Se indican sus partes:

- S = Interruptor de circuito
- T1, T2 = Transformador de Convertidor
- n1 = Cicloconvertidor

- n2 = Convertidor de Excitación
- SM = Máquina Síncrona
- A, B = Puente trifásico conectado en antiparalelo
- $i_+, i_-$  = Corriente de Salida
- $u_+, u_-$  = tensión del cicloconvertidor
- $i_e$  = Corriente de Excitación
- $i_R, i_S, i_T$  = Corrientes del estator
- $u_R, u_S, u_T$  = Tensiones del Estator
- $f_1$  = Frecuencia de líneas
- $f_2$  = Frecuencia de motor síncrono



**Fig. 2.11:** Diagrama Básico del circuito del motor síncrono alimentado por cicloconvertidor (Sección de Potencia)

### 2.3.2 Motor

El motor síncrono alimentado por el cicloconvertidor se usa como un accionamiento individual, que se opera exclusivamente como máquina autorregulada. Esto significa que la máquina síncrona establece su propia frecuencia de modo que las oscilaciones producidas al operar con un sistema de potencia con tensión y frecuencia constante no

pueden ocurrir. De este modo, el embobinado amortiguador necesario para evitar estas oscilaciones del rotor ya no son necesarias. El embobinado sería incluso perjudicial ya que reduce en gran medida la reactancia de la máquina síncrona responsable de las corrientes armónicas, y por ello aumenta los armónicos del estator.

### 2.3.3 Convertidor estático

Dentro del rango operativo con flujo constante de máquina, el motor síncrono requiere tensiones de estator UR, US, UT que se eleva en proporción con la frecuencia  $f_2$ . El cicloconvertidor trifásico (Fig.2.11 ) consiste en tres convertidores estáticos reversible, conmutados en línea, conectados en estrella sin corriente circulante, como los que se emplean en sistemas de accionamiento d.c. como los convertidores son conmutados en línea, usan tiristores de líneas normales.

El cicloconvertidor produce las tensiones de estator de máquina directo desde las tensiones de línea de control de ángulo de fase. El ángulo de control de convertidor se controla de modo que las tensiones de salida del convertidor con un resultado característico sinusoidal. Tanto la frecuencia y la amplitud son ajustables.

Las frecuencias de salida  $f_2$  están restringidas a frecuencias claramente por debajo de la frecuencia de líneas (dentro del rango  $f_2 = 0$  a alrededor del 50% de la frecuencia de líneas), de modo que la velocidad máxima obtenible para un accionamiento, referida a la frecuencia de motores, se ubica aproximadamente a la mitad de la velocidad síncrona. El voltaje de salida y corriente de salida están en fase, lo que corresponde a factor de potencia de  $\cos \varphi_2 = 1$  para máquina síncrona.

El puente trifásico A (Fig.2.11) suministra corriente I+ para el positivo, y la corriente I- de Puente B en antiparalelo, para la media onda negativa de la corriente del estator. Para asegurar que la transferencia entre puentes A y B no significa una corriente circulante, se introduce un intervalo corto sin corriente en cada cambio de polaridad antes de que se libere el puente en antiparalelo.

El cicloconvertidor puede operar como un convertidor estático reversible en cuatro cuadrantes, es decir, la tensión de salida del cicloconvertidor y la corriente pueden asumir ambas polaridades independientes de cada uno. Esta polaridad es necesaria, por ejemplo, para torque. No presentaría problemas el operar el sistema con cualquier factor dado de potencia de máquina. Para  $\cos \varphi_2 = 1$ .

Durante operación como un motor (o  $\cos \varphi_2 = -1$  como generador en frenado). Sin embargo, el cicloconvertidor solo necesita entregar la potencia activa a la máquina síncrona y podría ser dimensionado para la potencia menor posible. El control del sistema obliga la operación de la máquina a un factor de potencia de  $\cos \varphi_2 = \pm 1$ .

Para mejor uso de las características del sistema es útil controlar los tres convertidores reversibles a través de un controlador de corriente  $d/q$ , y así operar el cicloconvertidor como fuente de corriente trifásico en conexión en estrella. El equipo de control regula las tres corrientes del estator  $i_R, S, T$  y la corriente de excitación, es decir, de modo que las características del sistema completo se optimiza estática y dinámicamente en todo el rango de frecuencia.

#### **2.3.4 Sección de Convertidor de Potencia**

El elemento principal del convertidor, el tiristor, está contenido en una abrazadera entre dos elementos de enfriamiento. Los elementos de enfriamiento y el tiristor se montan uno sobre el otro para formar pilas. Un paquete de resortes se monta sobre la parte superior de cada pila y que determina la fuerza de la abrazadera que se exige sobre los tiristores dentro de la pila. Las pilas se montan uno al lado del otro en el centro del cubículo, lo que lo divide en una sección delantera y una sección trasera. La cañería se usa para distribuir el agua fría (entrada y salida) y para conectar el circuito de enfriamiento desionizado. Unidades de disparo de tiristores por gate en media tensión se instalan al lado derecho e izquierdo de cada tiristor.

Los componentes de los circuitos snubber, incluyendo un capacitador y un resistor enfriado con agua. Los terminales de potencia y los transformadores de voltaje y corriente si se requieren, se sitúan en la parte trasera del gabinete.

#### **2.3.5 Sistema de enfriamiento**

La unidad de enfriamiento sirve para remover las pérdidas de calor producidas en la sección de potencia. Estas pérdidas se disipan mediante un intercambiador de calor de agua/agua (desionizada / bruta)

La hoja de Datos de la Unidad de Enfriamiento entrega los principales datos del sistema de enfriamiento. La bomba instalada hace que el agua circule en el sistema de enfriamiento.

El desionizador asegura que haya una baja conductividad de agua desionizada constante. La conductividad del agua se mide con una sonda tipo QT1.1.

Los dispositivos de monitoreo de temperatura se instalan en el sistema de agua desionizada para asegurarse de que el convertidor no se sobre-caliente con agua de enfriamiento demasiado caliente. El flujo del agua se supervisa mediante dos monitores de flujo.

Para la protección del equipo, se realizan chequeos de comisionamiento y chequeos periódicos del sistema de enfriamiento y las válvulas (información sobre entrada de agua y temperatura de salida, presión del agua, conductividad y nivel del agua en el estanque de expansión) se transmite al sistema de control del convertidor.

El estanque de expansión, que contiene agua desionizada bajo presión atmosférica se ubica en el punto más alto del sistema de enfriamiento. Cualquier reducción en el nivel de agua en el estanque de expansión causado por un derrame o por electrólisis es enviado al sistema de control por los dispositivos de monitoreo de nivel instalados en el estanque. El estanque de expansión, regula la expansión de calor y liberación de gases del agua desionizada.

Para prevenir que entre contaminantes a los circuitos de enfriamiento del convertidor durante comisionamiento, el equipo desionizado está equipado con un colector de polvo y un filtro de finos, lo cual se puede remover para limpiarlo.

### **2.3.6 Descripción de componentes Esenciales**

Se explican a continuación

#### **a. Tiristores**

Los principales elementos del convertidor son los tiristores de tipo disco, que poseen cuatro terminales:

- El ánodo y el cátodo como terminales de potencia.
- El cátodo auxiliar y compuerta como terminales de control.

Para asegurar la utilización óptima de los tiristores, la pérdida de calor que se origina de la corriente y caída de tensión a través de los tiristores debe disiparse.

Para lograr una disipación de carga suficiente, la sujeción de los tiristores de disco se lleva a cabo con una fuerza definida entre los dos dispositivos de refrigeración.

#### **b. Supervisión de Tiristores**

Las unidades de disparo de compuerta continuamente verifican la tensión por medio de un par de tiristores conectados en antiparalelo. Mientras el tiristor pueda bloquear la tensión, esta unidad genera una señal, que se envía por medio de un cable de fibra óptica a los tableros, que se localizan en el sistema eléctrico.

En caso que uno de los tiristores pierda la capacidad de bloqueo, la unidad de disparo de compuerta deja de enviar señales, lo cual realizan e indican las tarjetas.

#### **c. Circuito Snubber**

Los circuitos snubber son los circuitos de RC conectados en paralelo a cada conexión en antiparalelo de dos tiristores. Éstos son capaces de amortiguar la sobretensión generada durante el apagado de los tiristores. Los resistores del circuito amortiguador de RC se refrigeran mediante agua.

#### **d. Protección de Sobretensión/Sobrecarga**

La protección de sobretensión protege a los tiristores de sobretensiones del lado de corriente alterna (que se origina del efecto de carga).

#### **e. Carga Base**

La carga base consiste en un número determinado de condensadores y resistores, los cuales, dependiendo de la capacidad nominal, la capacitancia y resistencia respectivamente, se conectan adecuadamente en paralelo y/o en serie.

Estos elementos se instalan en la parte trasera del cubículo, parcialmente bajo la techo y parcialmente en el panel trasero.

La carga base asegura el disparo de tiristores durante la puesta en marcha de la máquina síncrona y protege a los tiristores de sobretensiones. Consiste en un resistor en serie con un condensador, que se conectan en paralelo a la inductancia de carga.

#### **f. Cortocircuitador**

El cortocircuitador se compone de dos tiristores conectados en antiparalelo y protegidos por BOD en serie con un pack de resistores. Los componentes de los cortocircuitadores se instalan en la parte trasera del cubículo.

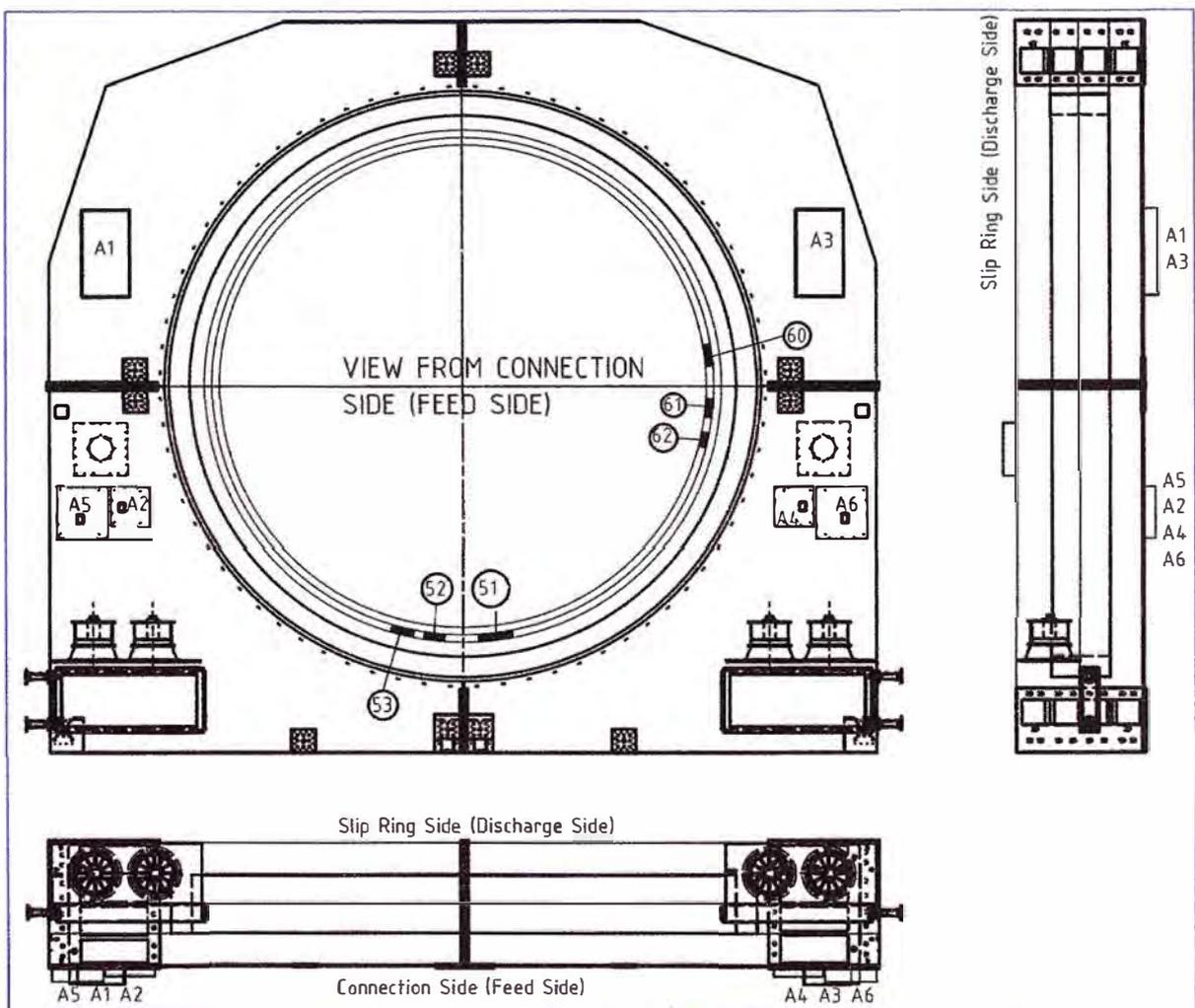
El cortocircuitador es una protección en caso de sobretensiones que ocurren durante el apagado de la máquina síncrona bajo carga, momento en el cual las fases de la máquina se acortan por medio del cortocircuitador de tensión controlada con el propósito de disipar la energía magnética del bobinado de la máquina en el resistor del cortocircuitador.

#### **g. Transformador de Corriente y Potencial**

Para propósitos de medición, existen transformadores de corriente y/o transformadores de potencial con sus cortocircuitadores automáticos.

### CAPÍTULO III MONTAJE, INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO

En el presente capítulo se describe el proceso para el montaje, instalación y puesta en servicio del motor. La figura 3.1 muestra el esquema del molino SAG.



**Figura 3.1** Esquema del Molino SAG

#### 3.1 Instalación de las bancadas del motor

El requerimiento básico fue que se hubiera instalado por completo el armazón del molino, dicho molino deberá poder girar y los frenos estarán en servicio. A continuación se procedió a:

- Verificar y registrar las dimensiones finales de los cimientos.
- Asegurar que la superficie de los cimientos donde se incrusten las bancadas sea irregular, con el fin de conseguir una buena adherencia con el cemento inyectado.

- Apisonar las placas de nivelación para lograr una capa plana y compacta.
- Colocar las tres bancadas con pernos de cimentación, centrando las escobillas y nivelando los tornillos, haciendo que éstos se posen sobre sus placas de nivelado.
- Alinear y nivelar las bancadas, comprobando todas las mediciones del plano, incluyendo las diagonales.
- Aplicar sobre los pernos verticales de los cimientos un par de apriete final de 9000 Nm, equivalente a una fuerza de apriete de 900 kN

### **3.2 Estator**

Antes de montar el motor, se verificó el aislamiento de los devanados de estator de cada segmento, con el fin de comprobar el estado del devanado durante el transporte. Se utilizó las ventanas realizadas con este fin. Se comprobó además el aislamiento antes de la instalación mecánica.

La conexión de la estrella está ubicada en el Cuarto B. Para Megar este cuarto, la conexión de la estrella debió ser desconectada.

Se procedió a la instalación de cuatro arandelas detectoras de presión, y apretar los bulones hasta 95 kN.

Se realizaron las siguientes tareas, las cuales se explican en las subsecciones siguientes:

- Comprobación de la redondez del núcleo del estator
- Cambio del estator a la posición de mantenimiento (lejos del lado de la alimentación)
- Cambio a la posición de funcionamiento (al lado de alimentación)
- Devanado de las juntas de estator.

#### **3.2.1. Comprobación de la redondez del núcleo del estator**

Fue como se explica a continuación:

- Se cambió el estator a la posición de mantenimiento y se montó los dos primeros polos diametralmente opuestos.
- Se cambió el estator a la posición de funcionamiento, se comprobó la redondez del núcleo del estator y se corrió, y cuando fue necesario, modificando el número de suplementos en las aberturas del estator y debajo de éste (entre el estator y las bancadas).
- Se cambió el estator de nuevo a la posición de mantenimiento tirando con los "tracte!" / grúas de tracción. La comprobación de la redondez del núcleo del estator se realizó antes del devanado de las juntas de estator.
- Se registró la temperatura ambiente tres veces al día (realice los registros en momentos en los que la temperatura sea mínima, máxima y media) durante la comprobación de la redondez del núcleo.

### **3.2.2 Cambio del estator a la posición de mantenimiento (lejos del lado de alimentación)**

Fue como se explica a continuación:

- Se levantó el estator de 1 a 2 mm aprox. con los gatos hidráulicos y se colocaron las planchas de acero inoxidable para facilitar la rodadura en la guía de rodadura de las plataformas móviles, sobre las bancadas. Se colocaron las plataformas móviles (patines), bajo los soportes, exactamente en paralelo con el eje de la máquina para que puedan rodar a lo largo de las planchas anteriormente mencionadas. Se aplicaron los suplementos para igualar la altura de cada una de las plataformas móviles con el eje motor y que todas ellas soporten el mismo peso.
- Se retiraron los suplementos de nivelación, "Fijación del estator". Se extrajeron los gatos. Se desplazó el estator axialmente hasta la posición de mantenimiento, tirando con los "tractel" / grúas de tracción.
- Por medio de los gatos hidráulicos se elevó de nuevo el estator, se extrajeron las plataformas móviles y las planchas de la guía de rodadura. Se hizo descender lentamente los gatos hidráulicos.

Durante la ejecución de las operaciones de izado y cambio de ubicación del estator, la separación considerada ("holgura") entre la superficie del núcleo del estator y el rotor fue de 5 mm como mínimo.

### **3.2.3 Cambio a la posición de funcionamiento (al lado de alimentación)**

Fue como se explica a continuación:

- Se alineó el estator con la línea central del rotor por medio de los gatos.
- Se realizó la fijación final del estator.

El cambio del estator para la ubicación de operación se realizó tras finalizar el montaje del rotor y el devanado de las juntas de estator.

### **3.2.4 Devanado de las juntas de estator.**

Fue como se explica a continuación:

- Se realizó la inspección visual de todas las barras simples para asegurarse de que no se produjeron daños durante el transporte.
- Se instalaron las barras superiores e inferiores que se suministran sueltas dentro de las ranuras destinadas para cerrar el devanado del estator y se aseguraron con cuñas.

### **3.2.5. Fijación del estator**

Una vez completado el montaje del rotor, devuélvalo a la posición de funcionamiento final, y proceda según se indica a continuación.

- **Antes del primer giro.**

- Se comprobó la redondez del núcleo y la holgura en frío, según se indica en el capítulo 3.2.1.
- Fije el estator a las bancadas con tornillos M64, aplicando un par de apriete de 8850 Nm “Fijación del estator”.
- La posición final de estator se mantendrá firme por medio de espaciadores de fijación, “Fijación del estator”.
- Se instalarán al menos 4 pasadores temporales. Es obligatoria la instalación de un par de pasadores en el lado carga y el otro par en el lado descarga.
- Tras el primer giro pero antes de las operaciones comerciales (período de puesta en servicio):
- El molino debe haber estado girando como mínimo 8 horas, máximo 4 semanas a plena carga.
- Haga girar el molino según las necesidades de la puesta en servicio.
- Limitación de velocidad según recomendación de fabricante.
- Una vez el motor se encuentra sometido a carga, se espera que la posición del molino cambie en unos pocos milímetros con respecto a su posición original.
- Extraiga los pasadores de 50 mm de diámetro existentes y vuelva a colocar el estator, a fin de reajustar la holgura en frío.
- Taladre orificios de 65 mm de diámetro y aplique los pasadores guía finales “Fijación del estator”. No se necesita de ningún procedimiento de ajuste especial (ajuste por contracción o martillado), tan sólo de colocación.
- Se aplicarán puntos de referencia en las particiones del estator (axial y radial) y entre las bancadas y el marco del estator.

### **3.3 Rotor**

Se realizó lo siguiente:

- Comprobación de la alineación de las corazas del molino.
- Instalación de los polos (en paralelo con el devanado de las juntas de estator).
- Instalación de las cubiertas del rotor y las conexiones de anillo deslizante.
- Comprobación de la holgura del estator.

#### **3.3.1. Comprobación de la alineación de las corazas del molino.**

Se comprobaron las dimensiones y tolerancias de la coraza del molino, tanto radial como axialmente.

#### **3.3.2. Instalación de los polos (en paralelo con el devanado de las juntas de estator)**

Fue como se explica a continuación:

- Se comprobó el aislamiento de todos los polos simples antes de instalarlos.

- Se marcó la línea central de los polos sobre la coraza del molino, monte el polo n° 1 sobre ésta con la herramienta de centrado de polos y se fijó el polo con el perno central, usando la plataforma a instalar en el emplazamiento
- Se hizo girar el molino 180° y se montó el polo n° 39, con el fin de mantener el equilibrio del molino. Se comprobó la redondez del núcleo del estator. Se continuó hasta completar la instalación de todos los polos.
- Cuando se hubo completado la instalación mecánica (incluyendo las cubiertas de rotor y estator), se pintó en el emplazamiento todas las áreas no pintadas en fábrica, con el fin de evitar la posibilidad de que se originara corrosión. Esto incluyó pernos de fijación, tuercas, arandelas, etc. y la coraza del molino.

### 3.3.3. Instalación de las cubiertas del rotor y las conexiones de anillo deslizante

Se completó la instalación del rotor (completaron las conexiones eléctricas del polo y realizaron las comprobaciones, montaje de los anillos deslizantes, completaron la conexión del polo a los anillos deslizantes e instalaron las cubiertas del rotor). Se montaron los anillos rozantes de acuerdo a la Fig. 3.2.

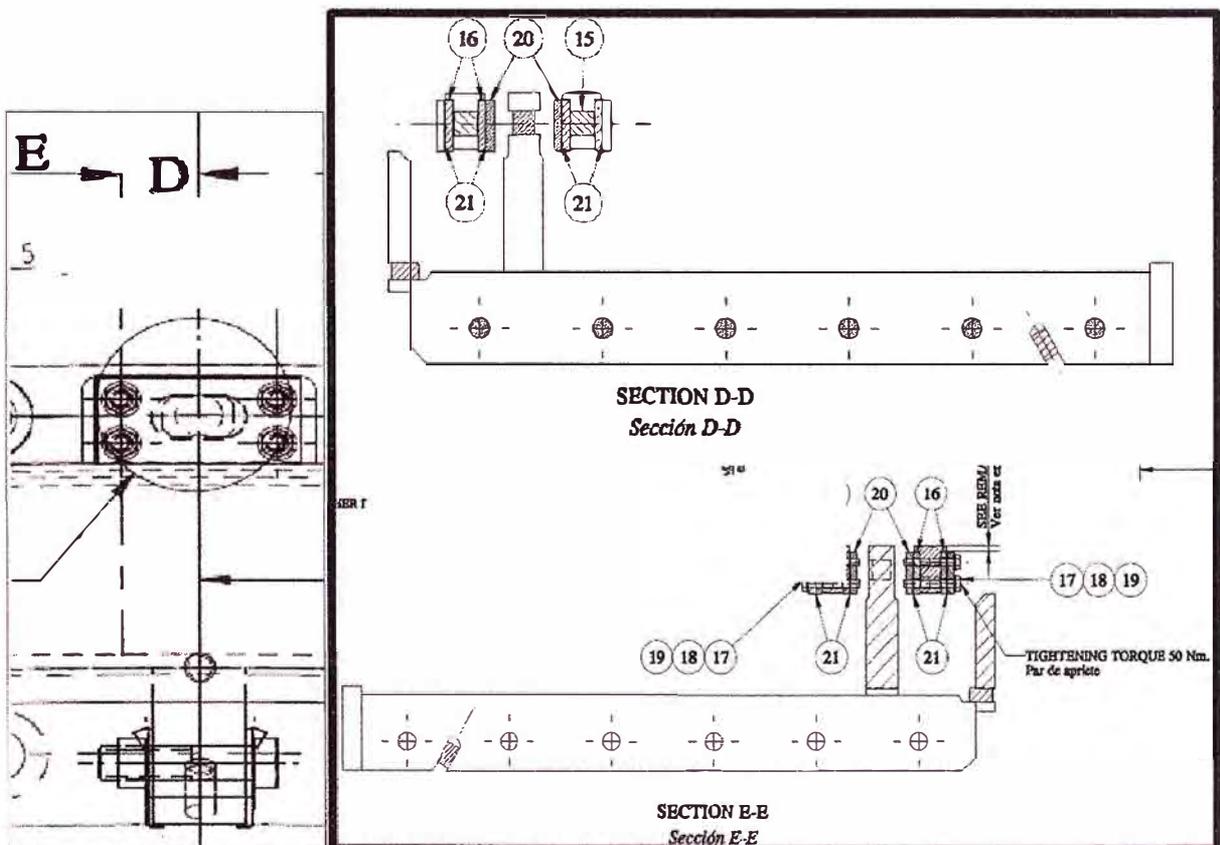


Fig. 3.2 Esquema de Anillos Rozantes

Se montaron los anillos deslizantes de tal modo que la tolerancia radial de su superficie no superaron los 0,5 mm.

### 3.3.4. Comprobación de la holgura del estator.

Se realizó lo siguiente: respecto a la redondez del núcleo y al ajuste de la holgura.

### **a. Redondez del núcleo.**

Se midió la holgura (distancia entre la parte exterior del polo y el núcleo magnético) en ocho puntos alrededor del rotor, a distancias aproximadamente iguales, en ambos lados del núcleo del estator. La comprobación de la holgura se realizó girando el molino.

La tolerancia admisible es de  $\pm 0.3\text{mm}$ . Cuando las lecturas estuvieron fuera de tolerancia:

- Se alineó de nuevo el estator según las instrucciones del supervisor.
- Se actuó sobre las corazas de las particiones del estator o en la coraza de soporte lateral del bastidor del estator y coloque de nuevo los suplementos según las instrucciones del supervisor.
- Se repitió el procedimiento, alineando de nuevo hasta que la desviación de las lecturas sea inferior a  $\pm 0,3\text{ mm}$ .

### **b. Ajuste de la holgura.**

La holgura nominal es de 16 mm.

Se adaptó la holgura de la instalación de tal modo que se obtuvo una desviación máxima de la holgura de 2 mm con la máquina llena y templada.

El punto de ajuste de la alarma por desviación de la excentricidad (1) es: 4 mm. La interrupción del servicio por desviación de la excentricidad (1) es: 5 mm (2)

Se ajustó la holgura en ambos lados delanteros de tal modo que el núcleo del estator quedara en paralelo con el rotor.

Durante la instalación, el supervisor comprobó la holgura con un calibre de espesor.

Una vez finalizado el ajuste y con los sensores de holgura en funcionamiento, se comprobó de nuevo la holgura con dichos sensores.

Se debió calcular la media, ajustar y comprobar las lecturas de la holgura realizadas por los sensores situados juntos con las mediciones realizadas con el dispositivo mecánico.

El cálculo previo de la expansión térmica del motor y el molino durante las condiciones de funcionamiento (media calculada verano-invierno) es motivo de que deba ajustarse durante la instalación las holguras citadas a continuación.

- Instalación (condiciones de frío):
  - Superior
  - Inferior +1 mm que la superior
  - Izquierda y derecha Mismo valor
- Funcionamiento (condiciones templadas):
  - Superior
  - Inferior +1 mm que la superior

- Izquierda y derecha      Mismo valor

Se esperan valores finales dentro de una tolerancia de  $\pm 0,5$  mm.

Se debió asegurar que el valor del entrehierro este dentro de los valores aceptables en las tres siguientes fases:

- Cuando el motor está parado.
- Cuando se arranque por primera vez.
- Cuando el motor se haya calentado.

### **3.4. Pruebas de resistencia y alta tensión del aislamiento**

Antes de realizar la prueba de tensión, se comprobó la resistencia del aislamiento de los devanados.

- Evaluando el valor de resistencia del estator con un medidor de 2.500 V. Verificando este valor con los valores de fábrica.
- Evaluando el valor de la resistencia del rotor con un medidor de 1.000 V. Valor Mínimo de la resistencia del rotor: R 1 Mín.(20° C) en MO, pero con un mínimo de 1 MO

Recién cuando se satisfizo esta condición de resistencia, se pudo poner en servicio la máquina.

En caso la temperatura ambiente difiere de 20° C, se utiliza la tabla de corrección por temperatura:  $R\ 1\ \text{min}\ (20^\circ\ \text{C}) = R\ 1\ \text{Mín.}\ (t) \cdot K$

Se deben obtener valores mínimos para continuar con las pruebas

Tensión de prueba:

- Devanado de estator      12,46 kV / 60 Hz / 1 min (CA)
- Devanado del rotor      5,29 kV / 60 Hz / 1 min (CA)

Los devanados que ya han estado en funcionamiento (y por consiguiente, como ejemplo, detenidos para su reparación) fueron comprobados a no más del 75% de la tensión de prueba nominal indicada más arriba.

El valor mínimo de la resistencia del aislamiento de los anillos deslizantes es el mismo que el del devanado del rotor.

Se debió medir el valor de la impedancia del rotor aplicando una tensión de 220 VAC. Durante el ensayo, se registraron los valores de tensión y corriente para calcular la impedancia y se registraron los valores de tensión del polo, comprobando que esos valores estuvieran equilibrados.

### **3.5 Instalación de las cubiertas del estator, porta-escobillas y escobillas**

Se realizó lo siguiente:

- Se colocó de forma provisional las cubiertas del estator "Accesorios para estator completo" y "Cubiertas del estator" en ambos lados sin ninguna placa de cierre, con el fin de ajustar el mecanismo de las escobillas y el sistema de sellado. Las cubiertas del

estator están contramarcadas.

#### **a. Porta-escobillas y escobillas de carbón.**

Se comprobó que los anillos deslizantes no presentaran bordes rugosos que pudieran provocar un desgaste irregular de las escobillas. Cuando fue necesario, se rehízo la superficie de los anillos deslizantes mediante papel de lija.

#### **b. Ajuste de los porta-escobillas.**

El ajuste de los porta-escobillas es importante para un funcionamiento satisfactorio de las escobillas. Unos porta-escobillas incorrectamente ajustado o instalado puede traer como consecuencia un contacto pobre con el anillo deslizante, lo que causaría un desgaste profundo de las escobillas. Se aseguró que, en el peor de los casos (cuando el rotor está más próximo al porta-escobillas), el borde inferior de la caja del soporte se encontrara a una distancia de 5 mm como mínimo del anillo deslizante y quedara colocado en paralelo con la superficie del anillo deslizante, para que la posición de las escobillas sea exactamente radial.

#### **c. Colocación de las escobillas de carbón.**

Se insertó papel de lija abrasivo de grado medio (80-120) entre la escobilla y el anillo deslizante y se tiró de un lado a otro, manteniéndolo ajustado sobre el contorno del anillo deslizante para evitar desgastar los bordes de la escobilla. La operación se realizó bajo la presión normal ejercida por el porta-escobillas. Evitando presionar nunca sobre la escobilla para aumentar la presión.

Tras el rectificado, se levantaron las escobillas del anillo deslizante y se limpió con cuidado todo el polvo de carbón resultante del lijado presente en anillo deslizante, porta-escobillas y escobillas (incluyendo las superficies de contacto).

Durante las primeras horas de funcionamiento, fue necesario comprobar con cuidado que las escobillas pasaran suavemente por encima de las juntas del segmento, sin ruidos ni indicaciones visibles de que dichas escobillas estén saltando en las juntas del anillo deslizante. Si hubiera ocurrido esto, se hubiera reajustado el anillo deslizante o se hubiera igualado las juntas con piedra de aceite o papel de lija.

### **3.6 Sistema de sellado de la unidad**

Para permitir un ajuste perfecto de los segmentos de sellado, uno de los segmentos mencionados se fabricó con largo extra para que sea montado en último lugar y se ajuste en su longitud.

Este segmento se identificó al principio, antes de iniciar el montaje del sistema de sellado. Se instalaron previamente el resto de los segmentos, para permitir el ajuste de la longitud mediante el recorte del segmento anteriormente mencionado.

- Con un paño, se impregnó con grasa por ambos lados la superficie de rozamiento de

los sellos (elementos 17 y 20).

- Se instalaron los sellos (elementos 16, 17 y 20) en el soporte del segmento según la sección D-D de la Fig. 3.2.
- E instalaron suavemente los sellos interiores (elementos 18 y 19).
- Se ajustó con cuidado la longitud de los elementos 18 y 19 para conseguir un contacto cara a cara con el siguiente segmento de sellado, con el fin de conseguir la protección por sellado necesaria del motor. Se fijó cada uno de los segmentos de los sellos interiores (elementos 18 y 19) mediante punzón
- Se solapó ligeramente las secciones de los sellos (elementos 17 y 20) y se recortó cada unión, de tal modo que sus superficies de contacto comunes se tocaran entre sí para conseguir un buen sellado se aplicó pasta selladora.

### **3.7 Sistema de refrigeración**

Se ajustó y montó la parte superior de la caja de refrigeración “Secuencia de instalación de la parte superior”. Esto se debió realizar antes de posicionar la caja de refrigeración en su posición final.

Fue muy importante verificar la instalación del ventilador de compensación “Instalación de la caja del filtro”, con el fin de permitir que el aire fluya en la dirección correcta.

### **3.8. Instalación y cableado de los instrumentos.**

Se realizó lo siguiente:

- Se ajustaron los 12 sensores de capacitancia para la holgura
- Se instalaron y conectaron los ventiladores de compensación de aire y el resto de instrumental que no hubo sido instalado y conectado por completo en fábrica a las regletas de conexión auxiliares correspondientes,

Todos los RTD fueron enviados instalados de fábrica y con el cableado interno hacia las juntas de los cuartos de estator ya realizado.

Para la instalación de las arandelas sensoras se instalaron 2 cajas de terminales. Las cajas de terminales fueron instaladas por el interior de la carcasa, “Disposición y cableado de los instrumentos”.

- Se conectaron los cables de excitación.
- Se instaló el cable de puesta a tierra del rotor, desde las escobillas de puesta a tierra al punto de conexión en la carcasa.

Para la puesta a tierra del estator, se procedió utilizando, al menos, un punto de puesta a tierra por cuarto inferior con cable de 95 mm<sup>2</sup> a conectar a la malla de puesta a tierra de la planta.

Se aseguró que los puntos de puesta a tierra estuvieran libres de pintura o de

cualquier otro recubrimiento, con el fin de permitir la conexión eléctrica.

### **3.9 El cicloconvertidor**

Se sigue el siguiente procedimiento:

#### **3.9.1 Fundaciones**

La fundación del convertidor tuvo que prepararse de la siguiente manera:

- ajuste horizontal +/- 0,5 %
- desequilibrio permisible general máximo máx. 1 mm
- capacidad de carga correspondiente al peso del módulo del convertidor
- no abrasiva
- protección contra humedad

#### **3.9.2 Compartimento de cables**

El compartimento de cables tuvo que ser preparado como sigue:

- No abrasivo
- protegido contra humedad, polvo y entrada de animales
- protegido contra fuego

Todas las aperturas debieron estar bien cubiertas o selladas para evitar que se extienda algún fuego al convertidor

#### **3.9.3 Instalación del Cicloconvertidor**

Se verificó que todas las entradas y salidas de cables y ductos estuvieran protegidas contra entrada de polvo, humedad y animales.

- 1.- Se puso el convertidor en una fundación preparada y se fijaron todos los tornillos
- 2.- Cuando fue necesario, se apoyó el convertidor con suplementos de nivelación.
- 3.- Se marcó la ubicación de las bridas de cables en la cubierta inferior. Se aseguró que el diámetro de las bridas de los cables coincidiera exactamente con los diámetros de los mismos.
- 4.- Se retiró la cubierta inferior, se preparó la apertura de brida de cable y se montó. Se aseguró que no hubiera tensión mecánica que pudiera afectar los cables y sus terminales, Se puso atención en la ubicación del cable de señal y cable de potencia para evitar interferencias. Nunca se usaron terminales de cable de aluminio combinados con barras de cobre. Esta mezcla de materiales causa corrosión y daños en el convertidor. Se usaron terminales de cable de aluminio niquelado o de cobre
- 5.- Se usaron los cables de las siguientes características:
  - Cables HV y LV: Rango de temperatura desde -55°C a +120°C - Libre de halógenos, retardador de llama, sección transversal de cable de acuerdo a la corriente de operación y condiciones de instalación. Cables recubiertos para conexiones de control y señales.
  - Cables/ barras de tierra: sección transversal min. 1 x 150 milímetros cuadrados

o El nivel de aislación de todos los cables deben estar de acuerdo a las tensiones y regulaciones aplicadas.

- 6.- Se fijó el escudo inferior y se pasaron los cables a través de la entrada de cables. Se apretaron las juntas.

- 7.- Se probó la aislación (en todos los cables de potencia y control) y complete el informe de prueba (Necesario para la puesta en funcionamiento). Las pruebas de aislación se realizaron con las siguientes tensiones de prueba/Baja Tensión (IEC 146-1-1, par. 4.2.1):

**TABLA Nº 3.1** Tensión de Prueba ( $U_m$ = Tensión RMS más alta para el equipo)

$U_m$ /Raiz(2)	Tensión de Prueba
$\leq 60V$	500 V
$\leq 125V$	1000 V
$\leq 250V$	1500 V
$\leq 500V$	2000 V

**TABLA Nº 3.2** Tensión de Prueba / Media Tensión

Tensión de Línea [KV]	Potencia de Impulso [KV Pico] (1.2us/50us)	Potencia AC[KV rms] (Frecuencia de Potencia)
$0.5 < ULN \leq 1.1$	No Aplicable	$1 + 2 U_m / \sqrt{2}$
$1.1 < ULN \leq 3.6$	No Aplicable	$1 + 3 U_m / \sqrt{2}$
$3.6 < ULN \leq 38$	$15 + 3U_m / \sqrt{2}$	$1 + 1.8 U_m / \sqrt{2}$

Para información detallada sobre procedimientos de pruebas de aislación, sírvase consultar IEC 146-1-1, párrafo 4.2.1

- Se fijaron todas las placas de información, señales de seguridad y escudos de protección.

### 3.10 Control Final

Se revisaron:

1. Todas las conexiones de cables (posiciones y presiones).
2. El montaje y posición correctos de las protecciones de cables.
3. Las juntas de las aperturas de cables.
4. Las salidas y entradas de las conexiones de enfriamiento para que estén adecuadamente instaladas.
5. Los cables/barras de tierra.
6. Las placas de información, las señales de seguridad y las protecciones estén ubicadas en la posición correcta dentro y fuera de la cabina del convertidor.
7. La posición y fijación de todas las protecciones de AT dentro del bloque del

convertidor.

8. Que todas las herramientas y materiales sean recogidos cuando se deje el sitio del convertidor.

### **3.11 Puesta en funcionamiento del Cicloconvertidor: Información General**

Se realizó de la siguiente manera:

- Se apagó el convertidor
- Se desconectó el convertidor del suministro principal de energía (interruptor de circuito controlado por el cliente)
- Se tomaron las medidas contra energización involuntaria
- Se revisó que se haya retirado/aislado correctamente la AT
- Se aseguró que el convertidor está desconectado de todos los suministros de potencia laterales de la máquina.

Posteriormente

- Se aseguró que no hubiera alta tensión en las barras de entrada (al lado del transformador) y en las barras de salida (lado de motor) antes de intentar cualquier conexión a tierra.
- Se conectaron las barras de entrada (lado de transformador) a tierra operando los aisladores de tierra de acuerdo con el diagrama de la página siguiente.
- Se conectaron barras de salida (lado de motor) para tierra operando los aisladores de tierra

### **3.12. Puesta en Funcionamiento del Convertidor Fase 1 (Motor Desconectado)**

Se realizó de la siguiente manera:

#### **3.12.1 Condiciones Previas**

Son las siguientes

- El circuito de agua bruta del convertidor debe estar conectado, revisado y puesto en funcionamiento
- El agua desionizada debe estar disponible para el circuito cerrado de agua interno del convertidor (unos 320 litros para cada convertidor)

#### **a. Trabajo Preparatorio**

Todas las herramientas auxiliares que fueron usadas para el proceso de llenado (por eje., bomba, manguera, tanque para agua desionizada) debieron ser limpiadas y enjuagadas con agua desionizada. El agua que se escapaba por las aperturas y válvulas de ventilación durante el procedimiento de llenado no fue reusada.

Se procedió con extrema limpieza para así evitar que se ensuciara el sistema de enfriamiento de agua desionizada.

#### **b. Llenado de lado de agua pura y eliminación de aire:**

No se agregaron inhibidores u otros químicos al agua.

Se verificó la correcta posición de todas las válvulas de agua.

Para llenado del sistema tuvieron que estar abiertas todas las válvulas de cerrado y las válvulas de carga usadas del lado de agua pura. Además, todas las válvulas de los sistemas de ventilación debieron estar abiertas.

No se retiró la tapa de las ventilaciones totalmente: solo se cerraron.

Se revisó que no hubiera aire en el sistema de cañerías y en las bombas, y se cuidó de que no se estuviera operando en vacío.

### **c. Liberación del aire**

Se recomienda operar las bombas alternadamente por aproximadamente 5 a 10 segundos para liberar cualquier aire atrapado en el sistema de cañerías. El lado de agua pura será desaireado a través del contenedor de expansión automáticamente. Repita este procedimiento una o dos veces antes de comenzar a operar las bombas por un tiempo mayor.

Se revisó que no haya aire en el sistema de cañerías, en las bombas y en el cambiador de iones. Se verificó que las bombas no estén operando en vacío, pues el sello de eje mecánico se dañaría.

- Se arrancó la bomba por unos 30 segundos, espere por cinco minutos y luego retire el aire del sistema de cañerías.
- Se repitió el procedimiento de desaireación por unas 3 a 4 veces hasta que no haya aire que pueda ser liberado desde el sistema.

### **3.12.2 Inspección Visual y Mecánica**

Se aseguró que las precondiciones de la sección 3.12 hayan sido cumplidas.

- Se revisaron las conexiones del cable externo en cuanto a:
  - Posición
  - Apantallado
  - Aterrizado
  - Polaridad
  - Hermeticidad del sistema de enfriamiento de agua.
- Se revisó que todos los terminales estén adecuadamente apretados, y montados adecuada y completamente.
- Se revisó que el espacio entre los grupos de cables y la unión de cables esté bien sellada.

### **3.12.3 Revisión de desempeño**

La revisión de desempeño fue realizada exclusivamente por personal de ABB Switzerland Ltda.

### **3.12.4 Revisión de operación con alta tensión aplicada**

La revisión de operación con alta tensión aplicada se realizó exclusivamente por personal de ABB Switzerland Ltda.

### **3.13 Puesta en funcionamiento Fase 2: Planta de poder y unidad de enfriamiento (Motor conectado)**

Se efectuó de la siguiente manera:

#### **a. Inspección Mecánica y Visual**

Se revisaron

- Las conexiones del cable externo y las instrucciones de montaje en cuanto a: posición, escudos; tierra; polaridad, hermeticidad del sistema de enfriamiento de agua.
- Que todos los terminales estuvieran correctamente apretados, y montados adecuada y completamente.
- Que el espacio entre los grupos de cables y la unión de cables esté bien sellada.

#### **b. Revisión de Desempeño**

Se revisó que la interfaz de motor/convertidor: los cables de AT y excitación estuvieran conectados adecuadamente.

#### **c. Revisión de operación**

La revisión de operación fue realizada exclusivamente por personal calificado

## **CAPÍTULO IV CÁLCULOS, DISEÑO E INGENIERÍA**

En el presente capítulo se desarrollan los temas involucrados al suministro eléctrico en 220 kV - proyecto minero Toromocho, a los datos del diseño del cicloconvertidor y a los filtros de armónicos y compensación reactiva.

### **4.1 Suministro eléctrico en 220 kV - proyecto minero Toromocho**

Luego de la introducción se explican los alcances, se describe el sistema eléctrico del proyecto, se describe la implementación del rechazo de carga por mínima frecuencia, la toma de carga y el estudio de Protecciones Eléctricas.

#### **4.1.1 Introducción**

El Proyecto Toromocho es un yacimiento de cobre, molibdeno y plata, ubicado en el distrito minero de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín. Aluminum Corporation of China es la empresa matriz propietaria de dicho megaproyecto cuprífero, cuyo diseño y operación se efectuará en dos etapas:

- Etapa I (Año 1 a 4 de la planta): Correspondiente a una demanda de 156.6 MW.
- Etapa II (Año 5 a 32 de la planta): Correspondiente a una demanda de 167.5 MW.

Minera Chinalco Perú S.A., planeó iniciar la puesta en marcha operacional de su proyecto Toromocho, en la modalidad de tajo abierto, en el cuarto trimestre del año 2013 y alcanzar plena actividad en el cuarto trimestre del año 2014.

De acuerdo al cronograma de actividades y a lo establecido en el Reglamento de Transmisión aprobado por el Decreto Supremo N° 027-2007-EM, publicado en el Diario El Peruano el 17.05.2007, que a la letra dice: “Los titulares de las nuevas instalaciones que se conecten al sistema de transmisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) deben elaborar y presentar al COES estudios de Pre Operatividad y de Operatividad”, a continuación se resume las conclusiones y/o recomendaciones de los Estudios de Operatividad desarrollados para el proyecto.

#### **4.1.2 Alcances**

Los Estudios de Operatividad permiten analizar el comportamiento del sistema eléctrico ante el ingreso de las nuevas instalaciones al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) mediante el uso de simuladores de sistemas de potencia, prestando especial atención al análisis de la zona de influencia del proyecto.

Los Estudios de Operatividad presentados están conformados por los siguientes estudios eléctricos:

- Análisis de Flujos de Potencia.
- Análisis de Cortocircuito.
- Análisis de Transitorios Electromagnéticos.
- Estudio de Coordinación de protecciones.

#### 4.1.3 Descripción del sistema eléctrico del proyecto

Esta sección desarrolla los siguientes ítems:

- Conexión al sistema eléctrico interconectado nacional.
- Características de las líneas de transmisión en 220 kV
- Descripción de la subestación principal Toromocho (220/23 kV).
- Principales equipos de la planta concentradora.
- Requerimiento de energía eléctrica del proyecto Toromocho.

##### a. Conexión al sistema eléctrico interconectado nacional

Para el suministro eléctrico de la planta concentradora y la red de distribución de la mina del proyecto Toromocho se cuenta con la subestación principal Toromocho 220/23 kV, el cual será alimentada desde el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) a través de la subestación Pomacocha mediante dos líneas de transmisión en 220 kV de 9.26 km de longitud, tal como se muestra en el siguiente gráfico:

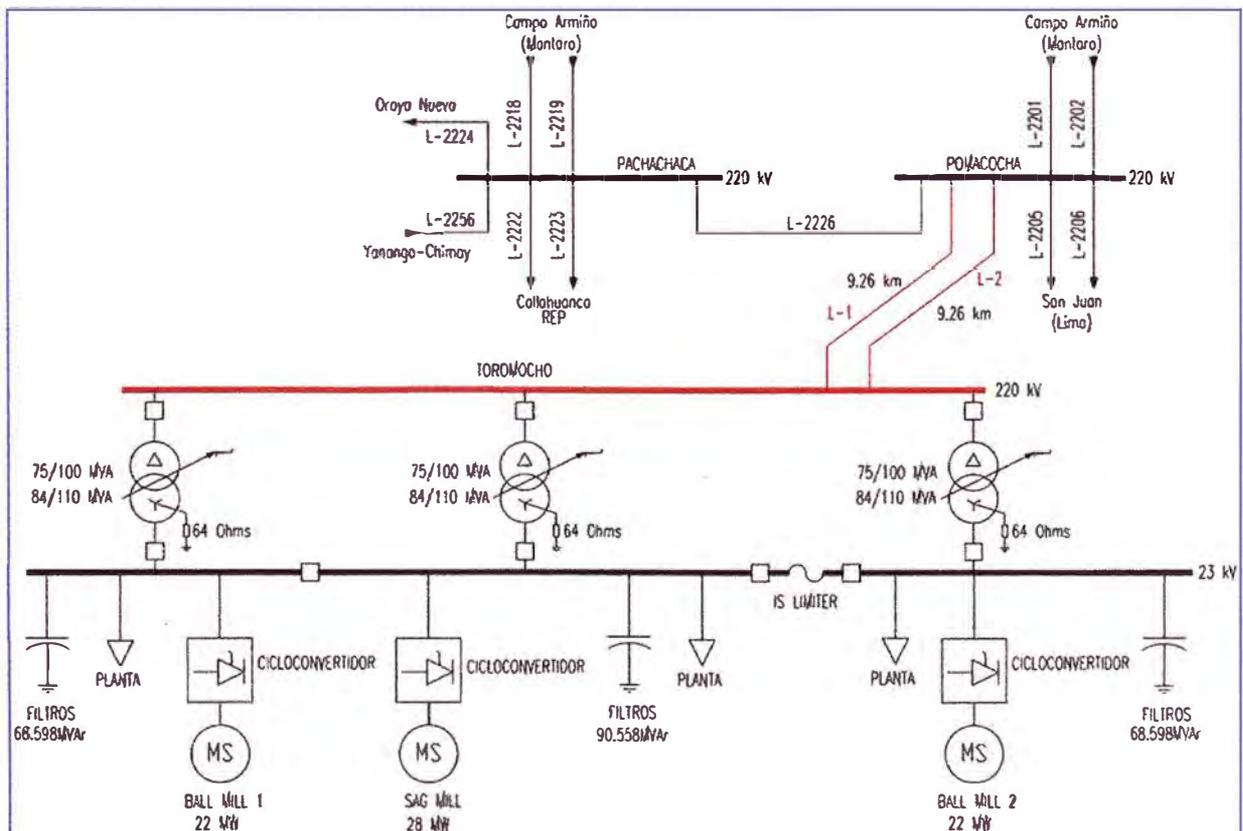


Fig. 4.1: Diagrama Unifilar SET Toromocho

### b. Características de las líneas de transmisión en 220 kV

Las principales características de la línea de transmisión en 220 kV Pomacocha - Toromocho de doble terna montada en una misma estructura, se muestran en las siguientes tablas:

**TABLA N° 4.1** Características Generales de la Línea de Transmisión

Descripción	Valor
Subestaciones que interconecta	Pomacocha – Toromocho
Tensión nominal	220 kV
Frecuencia	60 Hz
N° de circuitos o ternas	2
Capacidad de transmisión	250 MVA
Códigos asignados por el COES -SINAC	L-2284 / L-2285
Longitud	9.26 km
Cable de guarda	2
Cantidad de estructuras	24
Disposición de conductores de fase	Coplanar Vertical
Transposiciones	Ninguna

**TABLA N° 4.2** Tipo de Conductor de la Línea de Transmisión

Tramo	Conductor de fase	Cable de guarda
SE Pomacocha-SE Toromocho	AAAC 1349 kCM	Acero galvanizado 3/8" EHS Clase C (51.14 mm <sup>2</sup> )
		OPGW de 48 fibras ópticas RDC a 20 °C=0.317 Ohm/km (140.75 mm <sup>2</sup> )

**TABLA N° 4.3** Características Generales del Conductor de Fase

Descripción	Und	Valor
Material	N/A	AAAC
<b>SECCIONES</b>		
Número de hilos	N/A	61
Sección nominal del Conductor	kCM	1349
Área de Aluminio	mm <sup>2</sup>	683.4
<b>PESOS</b>		
Masa de aluminio	kg/km	1875
<b>DIAMETROS</b>		
Hilo individual aluminio	mm	3.777
Diámetro exterior del conductor	mm	33.99
<b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS</b>		
Resistencia DC a 20 °C	ohm/km	0.049
Coefficiente de temperatura de conductores AAAC a 20 °C (K <sub>20</sub> )	1/°C	0.00347

### c. Descripción de la subestación principal Toromocho (220/23 kV)

La subestación Toromocho, ubicado en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín a una altitud de 4553 m.s.n.m., es la instalación principal que atenderá el suministro eléctrico del Proyecto Minero Toromocho.

En el patio de llaves en 220 kV se instalarán los equipos al exterior en un esquema de maniobra de simple barra, el cual contará con 5 bahías equipadas y una bahía de reserva de transformación:

- Salida Línea a Pomacocha.
- Transformador de potencia T1 (700-TF-001).
- Transformador de potencia T2 (700-TF-002).
- Transformador de potencia T3 (700-TF-003).

La subestación está compuesta por tres transformadores de potencia 220/23 kV de las siguientes características:

- Relación de transformación:  $220 \pm 16 \times 0.625\% / 23$  kV (regulación bajo carga)

Potencia:

- 75/100 MVA (Rise 55 °C)
- 84/110 MVA (Rise 65 °C)
- Sistema de enfriamiento: ONAN/ONAF
- Grupo de conexión: Dyn1
- Resistencia de puesta a tierra del punto neutro del devanado de 23 kV: 66.4  $\Omega$

Los transformadores serán conectados a la sala eléctrica en 23 kV, en el cual se ubicarán las celdas GIS (aisladas en SF6), mediante cables de energía 25 kV (cuatro cables en paralelo por fase) instalados sobre bandejas.

En el nivel de 23 kV se tiene tres barras: A, B y C que trabajarán acopladas permanentemente.

Para reducir los niveles de corriente de cortocircuito en el nivel de 23 kV, en el proyecto se ha instalado en la celda de acoplamiento de las barras B y C, un equipo limitador de corriente denominado ABB IS-Limiter, que interrumpe la corriente de cortocircuito que fluye a través de él.

En los sistemas de barras A y C se conectan un conjunto de filtros de armónicos capacitivos del orden 3 y 4 de 12.672 MVar y 12.006 MVar respectivamente y del orden 5, 6.5, 11 y 17 de 10.98 MVar c/u. Todos estos filtros tienen como objeto filtrar los armónicos producidos por las cargas no lineales como son los cicloconvertidores de los molinos de bolas y los variadores de frecuencia instalados en la planta concentradora.

En el sistema de barras B se conectan un conjunto de filtros de armónicos capacitivos del orden 3 y 4 de 12.672 MVar y 12.006 MVar respectivamente y del orden 5, 6.5, 11,

17, 23 y 35 de 10.98 MVar c/u. Todos estos filtros tienen como objeto filtrar los armónicos producidos por las cargas no lineales como el cicloconvertidor del molino semiautógeno (SAG) y los variadores de frecuencia instalados en la planta concentradora.

Los filtros están configurados en un Master y dos No Master. Por condición de armónicos el ingreso del conjunto Master debe ser estrictamente en forma ascendente es decir: 3°, 4° y 5°, 6.5°, 11° y 17°, 7° y 23° y 35°, luego según requerimiento de la carga ingresan los filtros de No Master en forma ascendente también, pero en este caso no es necesario el orden (condición que puede darse en una contingencia).

El sistema de control primero verifica que todos los filtros del Master estén disponibles para ingresar, de lo contrario verifica los otros conjuntos de filtros y si ambos están completamente disponibles eligen un conjunto como Master alternadamente cuando se inicia el arranque del sistema.

En las barras B y C de 23 kV se conectan transformadores de servicios auxiliares de 630 kVA y relación 23/0.4 kV y grupo de conexión Dyn11.

#### **d. Principales equipos de la planta concentradora**

La planta concentradora contará con un molino SAG y dos molinos de bolas con velocidad variable, cuyos equipos asociados tienen las siguientes características:

##### **Molino SAG (40' x 26')**

- Transformadores de Cicloconvertidor: 23/1.23/1.23/1.23 kV, 16/5.333/5.333/5.333 MVA
- Cantidad de transformadores de cuatro devanados: 3
- Grupo de conexión: Dd11d0d0
- Cicloconvertidor: 18 pulsos
- Motor síncrono: 28000 kW (37500 HP), 5.73 kV,  $\cos\phi=0.80$

##### **Molino de Bolas 1 y 2 (28' x 44')**

- Transformadores de Cicloconvertidor: 23/1.81/1.81 kV, 12.5/6.25/6.25 MVA
- Cantidad de transformadores de tres devanados: 3
- Grupo de conexión: Dd0y1
- Cicloconvertidor: 12 pulsos
- Motor síncrono: 22000 kW (29500 HP), 5.65 kV,  $\cos\phi=0.80$

#### **e. Requerimiento de energía eléctrica del proyecto Toromocho**

El Proyecto Toromocho inicio la construcción de la planta el 2011 teniendo previsto iniciar a tomar carga desde el 2013 para el precomisionamiento, comisionamiento y puesta en servicio para lo cual se presentó el requerimiento de potencia según el siguiente cuadro:

**TABLA N° 4.4** Requerimientos de Potencia del Proyecto (MW)

Meses/ Años	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	0	55	156.6	156.6	156.6	156.6
Febrero	0	100	156.6	156.6	156.6	156.6
Marzo	0	110	156.6	156.6	156.6	156.6
Abril	0	120	156.6	156.6	156.6	156.6
Mayo	0	130	156.6	156.6	156.6	156.6
Junio	0	140	156.6	156.6	156.6	156.6
Julio	10	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5
Agosto	12	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5
Septiembre	17	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5
Octubre	31	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5
Noviembre	45	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5
Diciembre	52	156.6	156.6	156.6	156.6	167.5

#### 4.1.4 Implementación del rechazo de carga por mínima frecuencia

El informe técnico COES-SINAC/DP/SNP-064-2012 propone un Esquema de Rechazo Automático de Carga por Mínima Frecuencia para el año 2013, el cual fue implementado por las empresas distribuidoras y clientes libres a fin de mantener la seguridad del suministro ante una contingencia severa (pérdida de un gran bloque de generación en el SEIN) evitando de este modo la exposición prolongada de los equipos del SEIN a variaciones de frecuencia que pueden afectar la vida útil de los mismos.

En el siguiente cuadro se muestra las especificaciones del Esquema de Rechazo Automático de Carga por Mínima Frecuencia establecidos por el COES-SINAC para la zona operativa centro del SEIN, para una demanda de referencia de 156.6 MW, el cual es la máxima demanda proyectada de la mina Toromocho:

**TABLA N° 4.5** Porcentaje de participación de rechazo de carga por mínima Frec. 2014

Base (MW) 156.6	% de Rechazo de carga en cada etapa				Relés de Umbral		Relés de derivada		
	%	%acum	MW	MW acum	Frecuencia Hz	Temp. s	Arranque Hz	pend. Hz/s	Temp. s
Etapa									
1	4.0%	4.0%	6.26	6.26	59.0	0.15	59.8	-0.65	0.15
2	6.0%	10.0%	9.40	15.66	58.9	0.15	59.8	-0.65	0.15
3	7.0%	17.0%	10.96	26.62	58.8	0.15	59.8	-0.65	0.15
4	5.0%	22.0%	7.83	34.45	58.7	0.15	59.8	-1.10	0.15
5	5.0%	27.0%	7.83	42.28	58.6	0.15			
6	8.0%	35.0%	12.53	54.81	58.5	0.15			
Reposic.	2.5%	37.5%	3.92	<b>58.73</b>	59.1	30.00			

Del análisis desarrollado se concluye que:

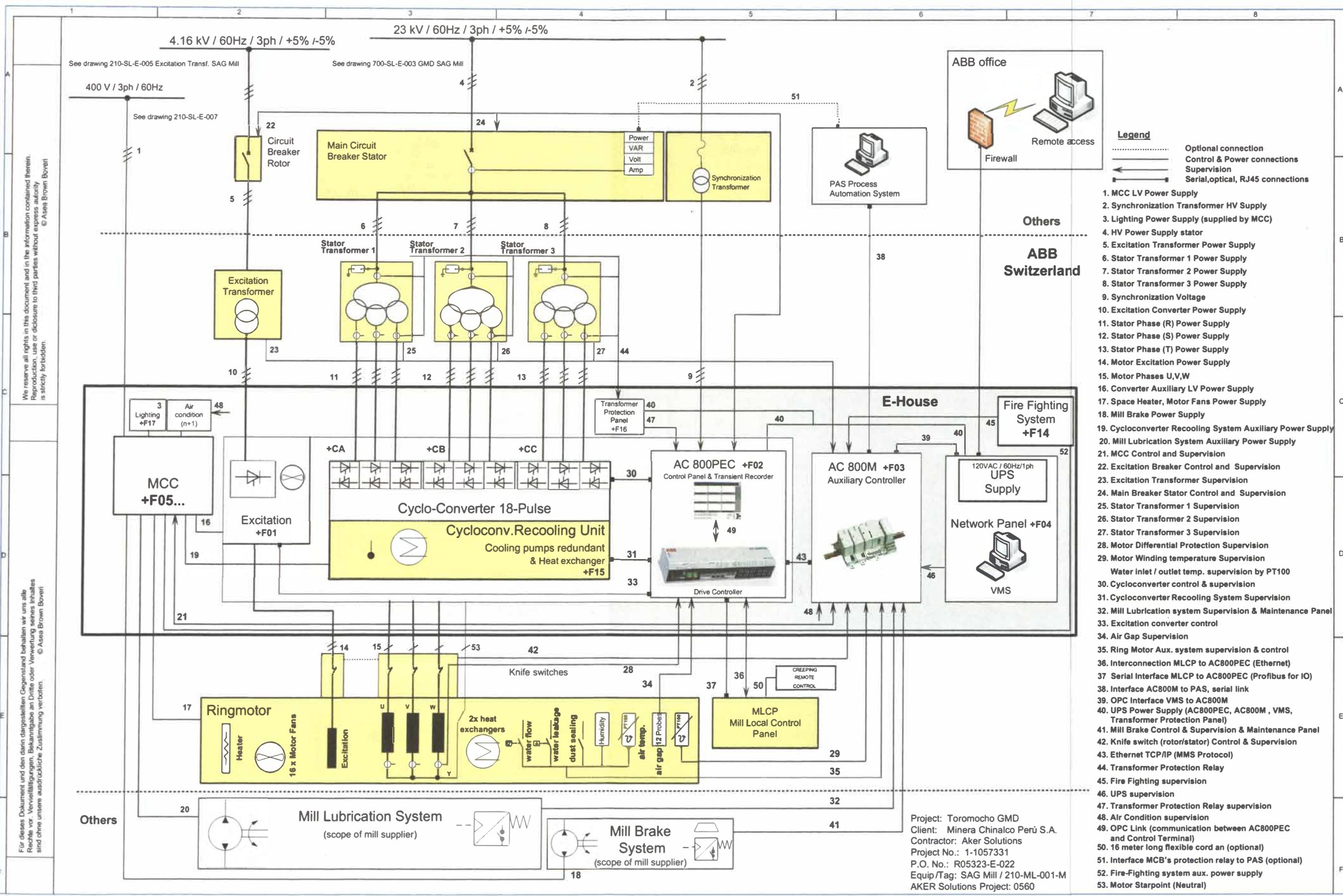


Fig. 4.4: Visión general del Sistema

We reserve all rights in this document and in the information contained therein. Reproduction, use or disclosure to third parties without express authority is strictly forbidden. © Asea Brown Boveri

Für dieses Dokument und den darin dargestellten Gegenstand behalten wir uns alle Rechte vor. Vervielfältigungen, Bekanntgabe an Dritte oder Verwertung seines Inhaltes sind ohne unsere ausdrückliche Zustimmung verboten. © Asea Brown Boveri

Project: Toromocho GMD  
 Client: Minera Chinalco Perú S.A.  
 Contractor: Aker Solutions  
 Project No.: 1-1057331  
 P.O. No.: R05323-E-022  
 Equip/Tag: SAG Mill / 210-ML-001-M  
 AKER Solutions Project: 0560

- Se ha determinado los bloques de carga a rechazar por etapa con la mayor proximidad posible a las especificaciones establecidas por el COES-SINAC y la criticidad de los diversos procesos y necesidades de la mina y la planta concentradora de Toromocho:

**TABLA N° 4.6** Esquema de Rechazo de Carga por Mínima Frecuencia

Etapa	Alimentador, circuito o carga	Código del interruptor	Demanda MW
1	Moly hydromet circuit 2,	J41	4.6
1	Mine Loop Circuit 2 (2 palas & 2 perforadoras)	J30	2.6
2	South Line (Kingmill, Estación de agua 1 y 2, Fresh water 1, 2, y 4	J39	3.5
2	Moly hydromet circuit 1	J17	3.6
2	North Line (Chancadora primaria, conveying)	J04	5.8
3	Ball Mill 1	J10	21.9
6	Grinding Circuit Line 1	J07	4.1
6	Cooper Flotation Line 2	J33	6
7	Grinding Circuit Line 3	J31	4.1
		Total	56.2

Se decidió unir las etapas 3,4 y 5 establecida por el COES-SINAC, cumpliendo con la carga total a rechazar en dichas etapas.

- La cantidad de carga total a rechazar, en las dos etapas establecidas para el sistema eléctrico de la Mina Toromocho sería de 56.2 MW.

**TABLA N° 4.7** Potencia total a rechazar por Mínima frecuencia.

Potencia a Rechazar (A Implementar)	56.2 MW
Potencia a rechazar COES-SINAC	58.73 MW

#### 4.1.5 Toma de carga

El proceso de toma de carga de la planta de producción de la mina tiene una duración aproximada de 90 minutos a partir de tener las barras de 23 kV energizadas y a tensión nominal.

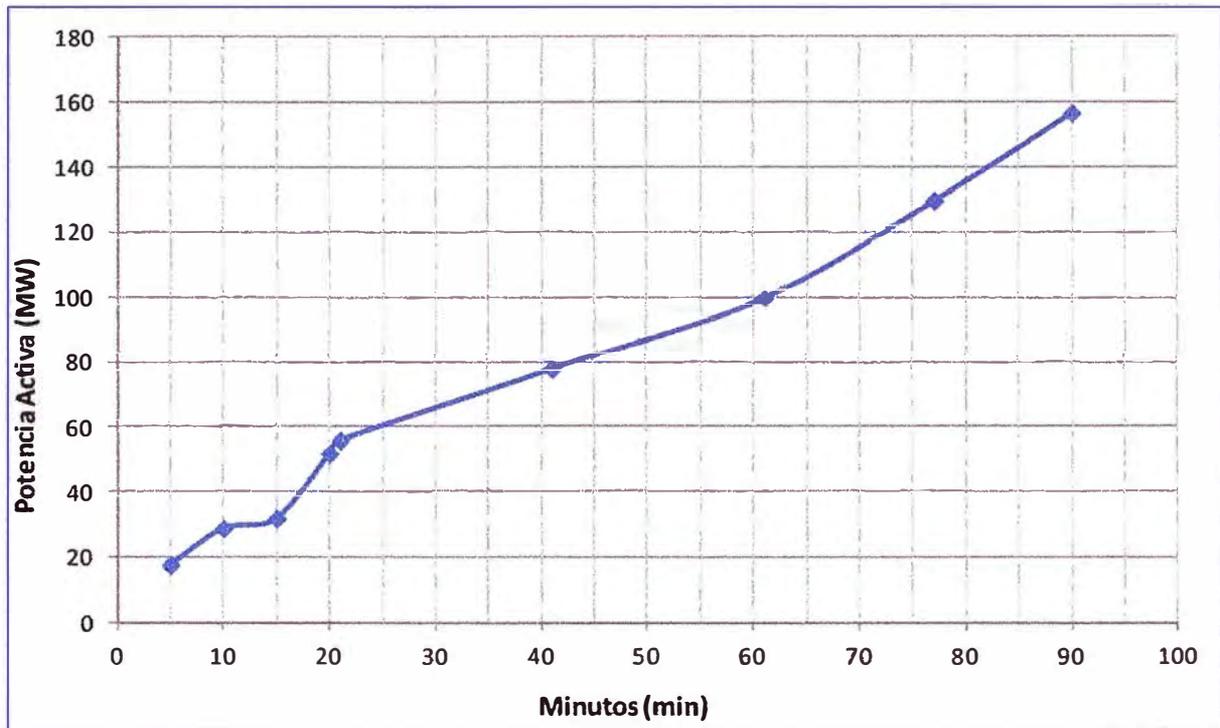
El proceso se inicia con la energización de los circuitos principales de la mina llegando a alcanzar unos 17.7 MW en 5 minutos. Luego continúan los circuitos auxiliares que consumen 11.2 MW mas con un tiempo de 5 minutos adicionales.

El proceso continua con la puesta en marcha del molino SAG que consume 3.1 MW durante su periodo de arranque que dura 5 minutos y luego tiene una rampa de toma de carga de 4 MW / min. Luego continúan los dos molinos de bolas de 21.9 MW cada uno, cuyos tiempos de toma de carga total es de 20 minutos cada uno.

Finalmente el resto de la planta toma carga gradualmente hasta alcanzar los 156.6 MW en total.

Los tiempos considerados en el diagrama de toma de carga, incluyen los tiempos necesarios de coordinación con los entes responsables de la operación y la rampa de

toma de carga de los motores.



**Fig. 4.2:** Diagrama de toma de carga – Toromocho

#### 4.1.6 Estudio de Protecciones Eléctricas

El molino SAG y su cicloconvertidor son equipos altamente costosos y delicados por lo que tienen diversas protecciones mecánicas, eléctricas y térmicas para asegurar que ante una falla de cualquier componente o problema en la red de energía no le genere daños que podría afectar la producción por averías que se puedan generar de estos eventos.

Las protecciones eléctricas en el interruptor principal son parte del estudio de coordinación de Protecciones de todo el proyecto Tabla 4.8 y las protecciones ajustadas en el controlador electrónico de Potencia del Molino son designadas por el fabricante (ABB) ver tabla 4.9

La protección de sobretensión protege a los tiristores de sobretensiones del lado de corriente alterna (que se origina del efecto de carga del molino).

**TABLA N° 4.8** Ajuste de protección de Rele de Alimentación Principal de Molino SAG

Función	Estado	Inicial	Final
Sobre Frecuencia	No Usado	-	-
Sobre corriente a Tierra	No Usado	-	-
Sobre corriente Sensible a Tierra CT: 100/5	Tiempo Definido	-	-
	Corriente de Arranque	-	-
	0.15% $\times$ I <sub>n</sub>	10 A	15 A
	Tiempo de Operación	-	-
	0.15s	0.15 s	0.15 s

Corto Circuito entre Fases CT:1500/5	Tiempo Definido	-	-
	Corriente de Arranque	-	-
	1.15xI <sub>n</sub>	1725 A	1725 A
	Tiempo de Operación	-	-
	0.15s	0.15 s	0.15 s
Sobre Corriente entre fases CT: 1500/5	IEEE EXT. INV.	-	-
	Corriente de Arranque	-	-
	0.70xI <sub>n</sub>	1050 A	1050 A
	Tiempo de Operación	-	-
	0.05s	0.05 s	0.05 s
	IEEE Tiempo de Dial	-	-
	6	6	6

**TABLA N° 4.9** Ajuste de protección del Controlador Electrónico de Potencia del SAG

Función	Estado	Inicial	Final
Sobre Frecuencia	102% F <sub>n</sub>	60.6 Hz	61.2 Hz
Tiempo Sobre Frecuencia	20ms	20ms	20 ms
Sub Frecuencia	97%F <sub>n</sub>	58.2 Hz	58.2 Hz
Tiempo de Sub Frecuencia	20ms	20ms	20 ms
Sobre Voltaje	110% U <sub>n</sub>	25.3 KV	25.3 KV
Tiempo Sobre Voltaje	10 ms	10 ms	10 ms
Sub Voltaje	95%U <sub>n</sub>	21.85KV	21.85 KV
Tiempo de Sub Voltaje	60 s	60 s	60 s
Sub Voltaje	85%U <sub>n</sub>	19.55 KV	19.55 KV
Tiempo de Sub Voltaje	200 ms	20ms	200 ms
Sobre Voltaje Excitación	110%V <sub>nexc</sub>	25.3 KV	25.3 KV
Tiempo Sobre Voltaje Excitación	Instantáneo	Inst.	Inst.
Sub Voltaje Excitación	80%U <sub>nexc</sub>	18.4KV	18.4 KV
Tiempo de Sub Voltaje Excitación	300 ms	300 ms	300 ms

#### 4.2 Datos del diseño del cicloconvertidor

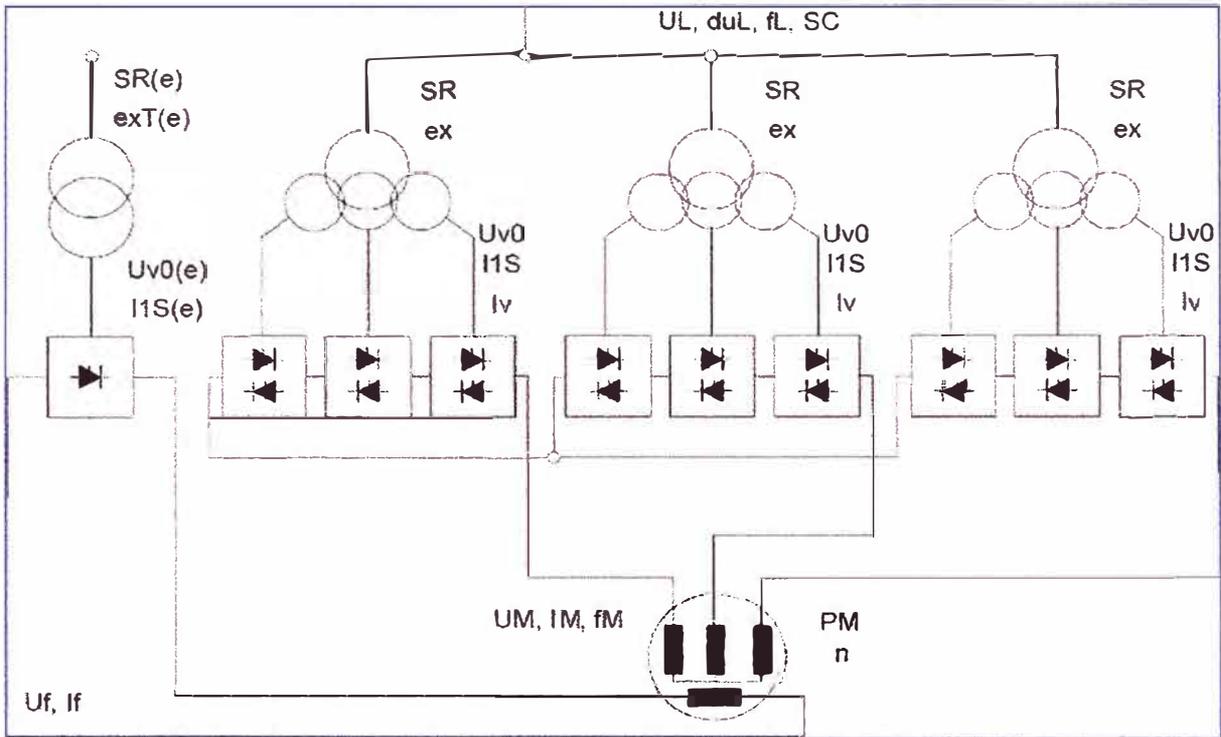
El cicloconvertidor está conformado por varios sub sistemas que realizan trabajos específicos para obtener el control de la velocidad y torque del motor SAG (Semiautogeno) estos sub sistemas fueron diseñados bajo las especificaciones técnicas solicitadas para el Proyecto Toromocho.

- Características técnicas de diseño.
- Métodos para Controlar el Cicloconvertidor.
- Características específicas del sistema.

##### 4.2.1 Características técnicas de diseño

El cicloconvertidor está conformado básicamente por tres transformadores de potencia y nueve bancos de tiristores a la salida del secundario de los transformadores

llamado circuito de la sección de potencia (sistema de 18 pulsos) con el motor síncrono, el para suministro del estator con frecuencia variable y un rectificador controlable para el embobinado de excitación del motor.



**Fig. 4.3:** Diagrama Unifilar del Cicloconvertidor y convertidor de Excitación

**TABLA N° 4.10** Datos Principales del Suministro

Descripción	Parámetro	Und	Valor
Tensión de red	UL	[V]	23'000
Variación de tensión de red (NTCSE)	duL	[%]	± 5
Frecuencia de red	fL	[Hz]	60
Variación de frecuencia de red	dfL	[%]	± 1
Corriente mín. de corto circuito	Iscmin	[kA]	23.4
Corriente máx. de corto circuito	Iscmáx.	[kA]	40.0

**TABLA N° 4.11** Transformadores del Cicloconvertidor

3 x transformador de cuatro bobinados	Parámetro	Und	6 x 30 s/h	Operación Cont.
Potencia nominal ( IEC 61378-1)	Sr	[kVA]		16'000 / 3 x 5333
Tensión nominal de entrada del transformador	UL	[V]		23'000
Tensión nominal sin carga del convertidor	Uv0	[V]		3 x 1230
Corriente de salida nominal de transformador (fund.)	I1S	[ARMS ]	3476	2503
Impedancia de corto circuito e <sub>x</sub> [%]	e <sub>x</sub>	[%]		17.4
Grupo vectorial				D d0 y1

TABLA N° 4.12 Cicloconvertidor

CICLOCONVERTIDOR	Ciclo	Und	6X30 s/d	1800 s/d	Nominal
Corriente de Entrada (Inlcuye armónicos)		[ARMS]	3640	2682	2321
Tipo de convertidor	VERITHYR WX M para MEGADRIVE-CICLO de18-pulsos				
Tipo de Tiristor	108 x 3BHB023623 (4" / 5200 V)				
Conexión en Serie de tiristores	$n_s$				1
Enfriamiento					Agua
Temperatura máx. de toma de agua cruda	$T_{in}$	[°C]			25
Temperatura máx. ambiente	$T_a$	[°C]	Sala eléctrica		25

TABLA N° 4.13 Motor SAG

Nominal de estator	Parámetro	Und	valor máx. (uL = 95 %)	Nominal
Potencia de salida	PM1	[kW]	28'000	28'000
Voltaje	UM1	[V]	5444	5730
Corriente (fund.)	IM1	[A]	3128	2972
Frecuencia (base / frecuencia máx.)	fM1	[Hz]	5.9/6.21	5.9/6.21
Velocidad (base / velocidad máx.)	$n_1 / n_{máx}$	[rpm]	9.31 / 9.80	9.31 / 9.80
Velocidad lenta /velocidad de pulgadas	$n_c$	[rpm]		0.3/1.0
<b>Sobrecarga</b>				
Corriente de sobrecarga 1.05 p.u de motor	IM,ovld	[Arms]	(1800 s/d)	3285
Corriente de inicio 1.5 p.u de motor	IM,start	[Arms]	(6 x 30 s/h)	4458
<b>EXCITACIÓN ESTÁTICA</b>				
<b>TRANSFORMADOR DE EXCITACIÓN</b>				
Potencia nominal (acc. a IEC 61378-1)	SR(e)	[kVA]		800
Tensión de entrada de transformador de excitación	UL(e)	[V]		4160

Tensión nominal sin carga de transformador	$U_{v0}(e)$	[V]		950
Corriente nominal de salida de transformador (fund.)	$I_{1S}(e)$	[Arms]	561	486
Impedancia de corto circuito	$exT(e)$	[%]		4
<b>RECTIFICADOR DE EXCITACIÓN</b>			<b>Valores máx.</b>	<b>nominal</b>
Tensión nominal de salida	$U_{out}$	[VDC]		1282
Corriente nominal de salida	$I_{out}$	[ADC]	720	490
<b>EXCITACIÓN DE MOTOR</b>			<b>Valores máx.</b>	<b>nominal</b>
Voltaje de excitación	$U_f$	[VDC]	945	645
Corriente de excitación	$I_f$	[ADC]	720	490

A continuación se indica en el cuadro del voltaje y corriente de Motor como Función de Variaciones de Voltaje de Línea

**TABLA N° 4.14 Sobrecarga**

Descripción	Parámetro	Und	capacidad	Nominal
Corriente de Sobrecarga de 1.05 p.u. de motor	$I_{M,ovld}$	[Arms]	(1800 s por día)	3285
Corriente de Inicio de 1.5 p.u. motor	$I_{M,start}$	[Arms]	6 x 30 s por hora)	4458

**TABLA N° 4.15 Condiciones de Protección**

Descripción	Parámetro	Und	Nominal
Corriente de Entrada del Cicloconvertidor			
Límite de corriente de entrada de convertidor	$I_{v,peak}$	[Apeak]	7620
Condición de sobre corriente de convertidor	$I_{peak,max}$	[Apeak]	8940
Proteccion $I^*t$			
Límite de Corriente	$I_{limit}$	[Apeak]	4680
Duración de la Liberación retrasada de sobre corriente		[s]	10

### Descripción General del Cubículo del Convertidor

El cubículo de convertidor descrito en estas instrucciones consiste en dos partes:

- El convertidor;
- La parte mecánica que incluye la unidad de enfriamiento, todos los accesorios de protección y auxiliares.

Sub-Cubículos y componentes, que están integrados al contenedor aparecen en la lista siguiente.

**TABLA Nº 4.16** Sub-Cubículos y componentes

Designación
Panel de Control de Excitación
Panel de Control de Accionamiento (Controlador AC800 PEC)
Panel I/O
Panel de Red
Paneles de Centro de Control del Motor
UPS
Panel Control Local del Motor
Sistema Contra Fuego
Sistema de Enfriamiento del Cicloconvertidor (con agua)
Panel de Protección del Transformador
Panel de Iluminación
Unidad de Aire Acondicionado
Parte de Potencia del Cicloconvertidor

El contenedor completo (Sala eléctrica) es un espacio cerrado accesible que contiene el convertidor y todos los accesorios integrados en él.

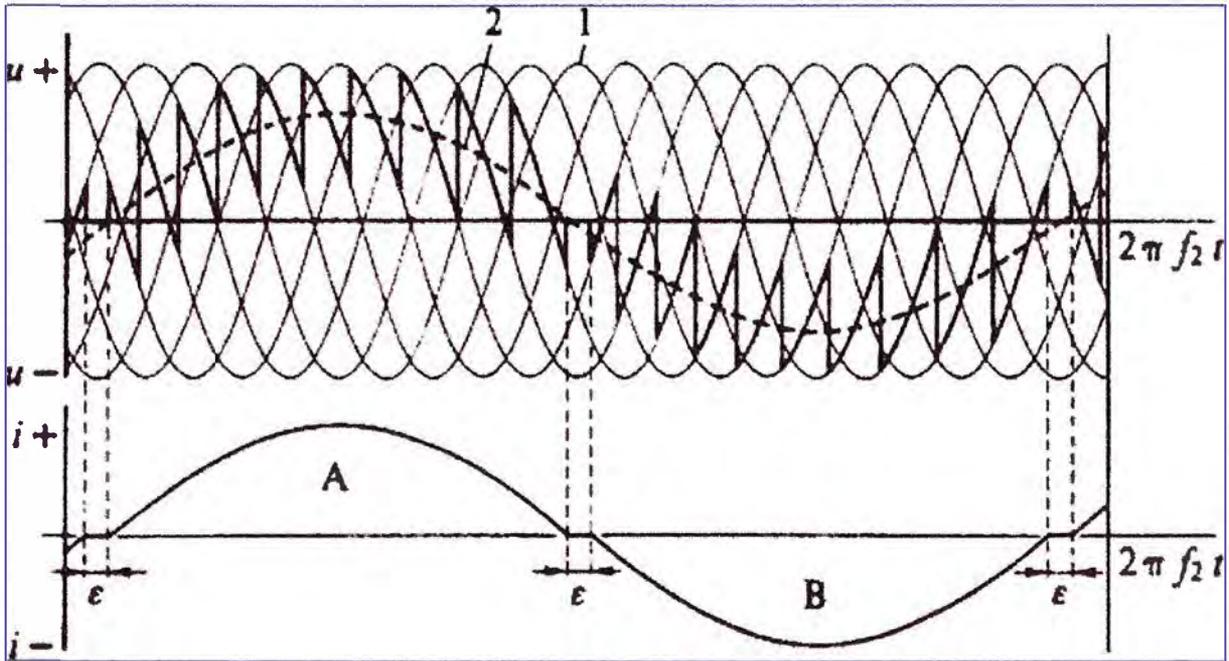
#### 4.2.2 Métodos para Controlar el Cicloconvertidor

Se usan dos modelos diferentes de operación para controlar el rango completo de velocidad (es decir, rango de frecuencia) del accionamiento:

- Operación sinusoidal
- Operación trapezoidal.

En la modalidad sinusoidal para el rango de velocidad más bajo, las tensiones de máquina, y por tanto las tensiones que se generan en el cicloconvertidores son bajas. Los convertidores siempre operan con ángulos de disparo parciales y las tensiones de salida retienen su característica sinusoidal (Fig. 4.5). Esta modalidad de operación es posible en tanto los convertidores no alcancen sus límites naturales de control a medida que aumentan las amplitudes de tensiones (rectificador e inversor en su posición final). Una

limitación es la potencia reactiva relativamente alta necesaria para el control. A bajas velocidades, esto produce un factor de potencia bajo correspondiente en las líneas de alimentación.

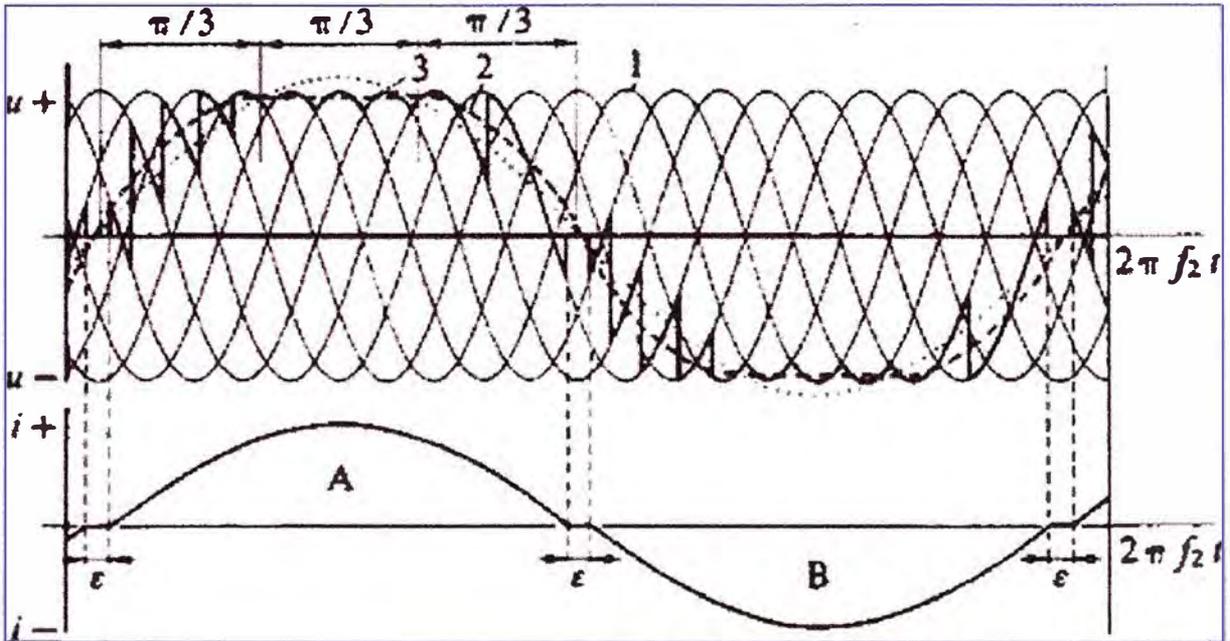


**Fig. 4.5:** Tensión de salida ( $u$ ) y corriente ( $i$ ) del cicloconvertidor que opera en modalidad sinusoidal

- A = Puente trifásico A en modo rectificador
- B = Puente trifásico B en modo rectificador
- $\epsilon$  = Intervalo de intercambio de corriente
- $f_2$  = Frecuencia de salida en convertidor
- 1 = Tensión trifásica de entrada con frecuencia de líneas
- 2 = Valor medio de tensión de salida

Para mejorar el factor de potencia, el modo trapezoidal se emplea en el rango de velocidad mayor, donde el cicloconvertidor también tiene que suministrar tensiones mayores de suministro.

En el modo trapezoidal, los convertidores estáticos son operados en sus límites de disparo por la mayor longitud posible del ciclo de baja frecuencia  $1/f_2$ , es decir, durante la operación como motor con rectificador en su posición final y durante la operación como freno con inversor en su posición final. El ángulo de control solo se desvía desde éste en el área donde cambia la polaridad de las tensiones de salida de convertidor. Como muestra la Fig. 4.6, estos tienen una característica casi trapezoidal. Como no existe una conexión en estrella entre la máquina y el cicloconvertidor, las tensiones de máquina aun retienen la forma sinusoidal. La diferencia entre los puntos de la estrella en una frecuencia tres veces la de la frecuencia de máquina.



**Figura 4.6:** Tensión de salida ( $u$ ) y corriente ( $i$ ) del cicloconvertidor en trapezoidal

- A = Puente trifásico A en modo rectificador
- B = Puente trifásico B en modo rectificador
- $\epsilon$  = Intervalo de intercambio de corriente
- $f_2$  = Frecuencia de salida en convertidor
- 1 = Voltaje trifásico de entrada con frecuencia de líneas
- 2 = Valor medio de tensión de salida
- 3 = Tensión de entrada de motor

Mientras más tiempo se operen los convertidores con un ángulo de disparo completo durante un ciclo de frecuencia de máquina  $f_2$ , mejor será el factor de potencia de las líneas de alimentación.

### Armónicos de Corriente

El motor síncrono alimentado por cicloconvertidor provoca armónicos de corriente en las líneas de la misma forma que con el motor d.c. alimentado por convertidor. Como los convertidores estáticos del cicloconvertidor trifásico también operan en modo de estado estacionario con un ángulo de disparo que varía continuamente, no solo se producen los armónicos de corriente de las líneas conocidas que se aplican al sistema de convertidor clásico, sino también las bandas laterales que resultan de la frecuencia de salida  $f_2$  del cicloconvertidor.

El cicloconvertidor trifásico ideal genera armónicos de corriente de línea con los siguientes números ordinales:

$$v = (kp \pm 1) \pm 6n \frac{f_2}{f_1} \quad (4.1)$$

Donde

- V = Numero Ordinal del Armónico
- K = 1,2,3,etc
- P = Numero de Pulso del Circuito del convertidor estático.
- n = 0,1,2,3,etc
- f1 = Frecuencia de las líneas.
- F2 = Frecuencia de la salida del cicloconvertidor

La magnitud de los armónicos individuales depende en gran medida del ángulo de disparo del cicloconvertidor, y se obtienen diferentes valores para operación en modo sinusoidal en el rango de inicio y modo trapezoidal a altas velocidades. Sin embargo, las amplitudes obtenidas nunca son tan altas como las de un convertidor alimentado con motor d.c. de rango comparable, sin importar las condiciones de operación.

### **4.3 Filtros de armónicos y compensación reactiva**

Los equipos HF & PFC están conectados a la red al sistema eléctrico trifásica de 23 kV, 60 Hz, 40 kA rms de corto circuito simétrico trifásico, neutro a tierra por resistencia 200 A, 10 s.

Las fluctuaciones de tensión pueden ser de  $\pm 10\%$  por menos de 30 segundos. La frecuencia puede presentar fluctuaciones instantáneas de  $\pm 1\%$ . El nivel de diseño de corto circuito es de 40 kA, a 23 kV (barra principal 700-SG-001, barras 1, 2 y 3) e instalado en un patio abierto, dentro de la nueva subestación Toromocho a una altura de 4,600 m.s.n.m.

#### **4.3.1 Diseño**

El diseño de los equipos HF & PFC está basado en las variaciones normales de operación, como ha sido definido en el estudio de Filtros de Armónicos,

Los Filtros deben ser capaz de limitar la tensión máxima de armónicos y corrientes establecidas para cada caso particular, incluyendo la condición de estado estacionario, así como la corrección de factor de potencia, según el estudio de los Filtros de Armónicos y compensación reactiva las actividades de operación se realizan de la siguiente manera:

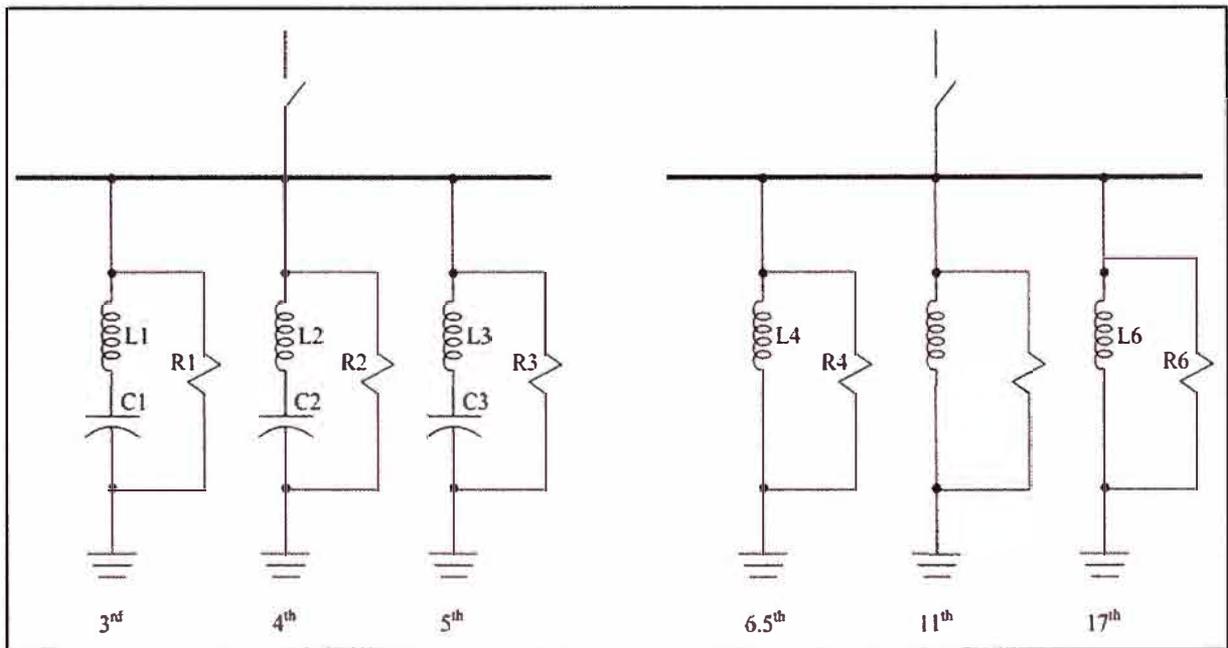
- Factor de potencia (Cos Phi)  $0.96 < PF < 1$  en la barra de 220 KV de la Subestación Pomacocha.
- Distorsión de armónicos de voltaje THDv: El contenido total de armónicos deberá cumplir con NTCSE.
- Distorsión de armónicos de corriente THDi: el contenido total de armónicos deberá cumplir con el IEEE 519 at 23 kV y la NTCSE.
- Tensión de conmutación será menor de 3% en la red principal de 23 kV.

#### **4.3.2 Distribución de la Energía Reactiva Capacitiva en grupos de filtros y sus sub**

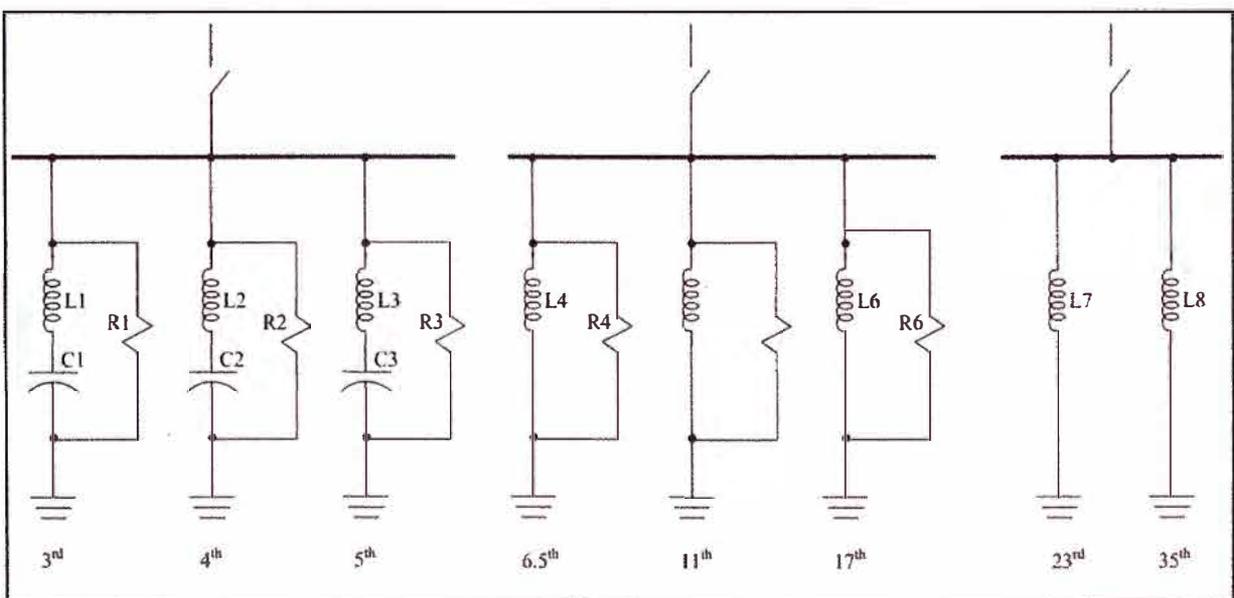
## grupos

Ya que las tres barras de 23KV en las que están instalados los filtros de armónicos deben trabajar juntas o separadas se debe considerar:

- Dos sistemas de Filtros idénticos de 28.5 MVar instalados en las barras uno y tres de la barra principal 700-SG-001 (dos grupos de filtros y 6 sub grupos de filtros por sistema) ver Fig. 4.7
- Un sistema de filtros con 38 MVar, instalado en la barra dos de media tensión 700-SG-001 (3 grupos de filtros y 8 sub grupos de filtros) ver fig 4.8
- La potencia instalada Total es de 95 MVar.



**Fig. 4.7:** Filtros de Armónicos y Compensación reactiva de barras 1 y 3



**Fig. 4.8:** Filtros de armónicos y Compensación Reactiva de barra 2

### 4.3.3 Número de sub grupos de Filtros y sus frecuencias dentro de cada grupo de

## **filtros**

Hemos encontrado que los siguientes 8 subgrupos de filtros representan el número mínimo de filtros que son capaces de asegurar el cumplimiento de los límites de filtración de armónicos:

- **Filtro de Sub grupo sintonizado para la Tercera armónica:** éste tiene que alejarse de la resonancia en paralelo de los otros filtros, sintonizados en la parte superior a 180 Hz; la resonancia paralela al tercer armónico es de gran riesgo durante la energización de los grandes equipos eléctricos de núcleo de hierro.
- **Filtro de Sub grupo sintonizado para la cuarta armónica:** éste tiene que alejarse de la resonancia en paralelo de los otros filtros, sintonizados por la parte superior a 240 Hz; resonancia paralela al cuarto armónico es un riesgo, ya que puede amplificar las llamadas inter armónicos "banda lateral" que vienen de los GMDs.
- **Filtros de Sub grupos sintonizados para las armónicas 5, 6.5, 11, 17, 23 y 35 :** tienen el deber de filtrar suficientemente los armónicos típicos de los cicloconvertidores.

### **4.3.4 Sistemas de filtro Instalado**

FPC & HF (Corrección del factor de Potencia & Filtro de Armónico) consta de 3 sistemas de filtrado por un total de 95 MVAR de potencia capacitiva instalados en la barra de 23kV (700-SG-001).

Nombre de la rama Filtro explicación:

FX-Y-Z

- F = Filtro de sub grupo
- X = Sintonizado al Armónico X
- Y = Tiene Y MVAR de Potencia capacitiva
- Z = Pertenece al sistema de filtrado Z

Los sistemas de filtros A y C se compone de los siguientes grupos:

#### **Grupo 1 (14.25 MVAR) con 3 sub grupos de Filtros.**

- F03-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-C 3<sup>rd</sup> con 4.75 MVAR
- F04-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-C 4<sup>th</sup> con 4.75 MVAR
- F05-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-HP 5<sup>th</sup> con 4.75 MVAR

El grupo 1 está conectado en cada una de las 03 barras de 23KV (700-HF-001 A, 700-HF-002 A, 700-HF-003 A)

#### **Grupo 2 (14.25 MVAR) con 3 Sub grupos de Filtros.**

- F06.5-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-HP 6.5<sup>th</sup> con 4.75 MVAR
- F11-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-HP 11<sup>th</sup> con 4.75 MVAR
- F17-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-HP 17<sup>th</sup> con 4.75 MVAR

El grupo 2 está conectado en cada una de las barras de 23KV (700-HF-001 B, 700-

HF-002 B, 700-HF-003B)

Además de los grupos 1 y 2, la barra 2 tiene un grupo más:

**Group 3 (9.5 MVAR) con 2 sub Filtros.**

- F23-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-LC 23<sup>rd</sup> con 4.75 MVAR.
- F35-4.75 Sub grupo de filtro de armónica Tipo-LC 35<sup>th</sup> con 4.75 MVAR.

Este grupo 3 está conectado a la barra 2 de 23KV (700-HF-002C)

**Notas:**

- Filtro tipo "LC": Consiste en el único banco de condensadores y reactores. Este tipo de filtro se sintoniza para la frecuencia específica y absorbe eficientemente los armónicos de corriente en la banda muy estrecha alrededor de la frecuencia de sintonización.
- Filtro tipo C: Reduce el efecto de sintonización de la frecuencia (en comparación con las del tipo LC) se presentan pérdidas en las resistencias de amortiguamiento
- "Filtro tipo HP": Filtro de paso alto, a diferencia del tipo "LC" tiene una resistencia de amortiguación. El propósito de la resistencia de amortiguamiento la resistencia es para redondear resonancias paralelas peligrosos, Al mismo tiempo, se completan los valles de la serie frecuencias de sintonización de resonancias.

**TABLA N° 4.17** Características de filtros de armónicos y compensación reactiva

Condiciones Ambientales	
La altitud del sitio [m snm]	4600
Temperatura del aire ambiente [° C]	-4 / +20
Humedad relativa [%]	0 / 68.5
Velocidad del viento de diseño [km / h]	135
Condiciones eléctricas	
Frecuencia de línea nominal [Hz]	60
Variación de la frecuencia de línea [% de la frecuencia nominal de línea]	-1 / +1
Tensión de línea nominal (fase a fase) [kV]	23
Variación de la tensión de línea [% de la tensión nominal de línea]	-5 / +5
Max. potencia de cortocircuito en el punto de conexión de filtros [MVA]	1600
Descripción de componentes del filtro	
Condensadores (IEC 60871-1-2005)	IP00
Reactores (IEC 60076-6-2002)	IP00
Resistencias (IEC 60694)	IP01
Colocación	Exterior

**TABLA N° 4.18** Características de los filtros de armónicos y compensación reactiva

Nombre de Filtro	F03-5 A,B,C	F04-5 A,B,C	F05-5 A,B,C	F06.5- 5 A,B,C	F11-5 A,B,C	F17-5 A,B,C	F23-5 B	F35-5 B
Cantidad	1	1	1	1	1	1	1	1
Frecuencia de sintonización de Filtro [Hz]	170	232	299	390	666	1032	1379	2106
Tipo de filtro	C	C	HP	HP	HP	HP	BP	BP
Potencia de grupo de Filtro capacitivo 23 kV y 60 Hz [kVAr]	4746	4746	4945	4862	4785	4763	4755	4750
Corriente nominal del filtro a 23 kV y 60 Hz [kVAr]	119	119	124	122	120	119	119	119
Máximo valor eficaz de todas las corrientes armónicas de filtro en condiciones de estado estacionario (A)	34	50	75	70	225	165	150	130
Valor pico de tensión [kV] a soportar cada grupo de filtros por efecto de descargas atmosféricas.	325	325	325	325	325	325	325	325
Distancia mínima de fuga [mm]	1770	1770	1770	1770	1770	1770	1770	1770

#### 4.3.5 Cargas que producen armónicos

Todas las cargas que producen armónicos (excepto Molino SAG y molinos de bolas) están representados por sus correspondientes espectros de corriente armónica. Actual espectro armónico depende del tipo de la unidad y la carga de la máquina. Para baja tensión impulsa espectros de corriente armónica.

Molino SAG es modelado por su correspondiente espectro de armónicos de corriente de acuerdo con "Corrientes armónicas e Inter-armónicas generadas por los cicloconvertidores de 18 pulsos"

Molinos de Bolas se modelan mediante su correspondiente espectro de armónicos de corriente de acuerdo con "Corrientes armónicas e Inter-armónicas generadas por los cicloconvertidores de 18 pulsos"

Todas las unidades de bomba de desplazamiento positivo 18 pulsos operan con desplazamiento de fase transformadores para lograr la configuración de 36 pulsos, con el fin de reducir la emisión de armónicos. A los efectos del cumplimiento de los límites definidos por la norma que consideramos configuración de 36 pulsos. Para el propósito de simulaciones de carga del filtro consideramos configuración de 18 impulsos.

**TABLA N° 4.19** Espectro de armónicos de cada unidad de pulsos

<b>Orden de Armónico</b>	<b>36-pulso configuración corriente [% De la fundamental actual]</b>	<b>18-pulso configuración corriente [% De la fundamental actual]</b>
5	2.2	2.2
7	1.9	1.9
11	1.7	1.7
13	0.8	0.8
17	0.6	6
19	0.5	4.7
23	0.4	0.4
25	0.7	0.7
29	0.5	0.5
31	0.4	0.4
35	2.5	2.5
37	2.1	2.1
41	0.3	0.3
43	0.2	0.2
47	0.2	0.2
49	0.1	0.1

#### 4.3.6 Descripción de equipamiento

Para el control del factor de potencia hay disponibles dos lecturas de la Subestación Pomacocha medidos en cada circuito de 220 kV del doble circuito. Estas lecturas están disponibles a través de Modbus TCP / IP maestro o DNP 3.0 TCP / IP Maestro (en ese orden de prioridad).

El interruptor 23 kV se suministra con un modelo de relé REF545 de ABB con las funciones 50/51, 50N/51N, 27, 59 y 81.

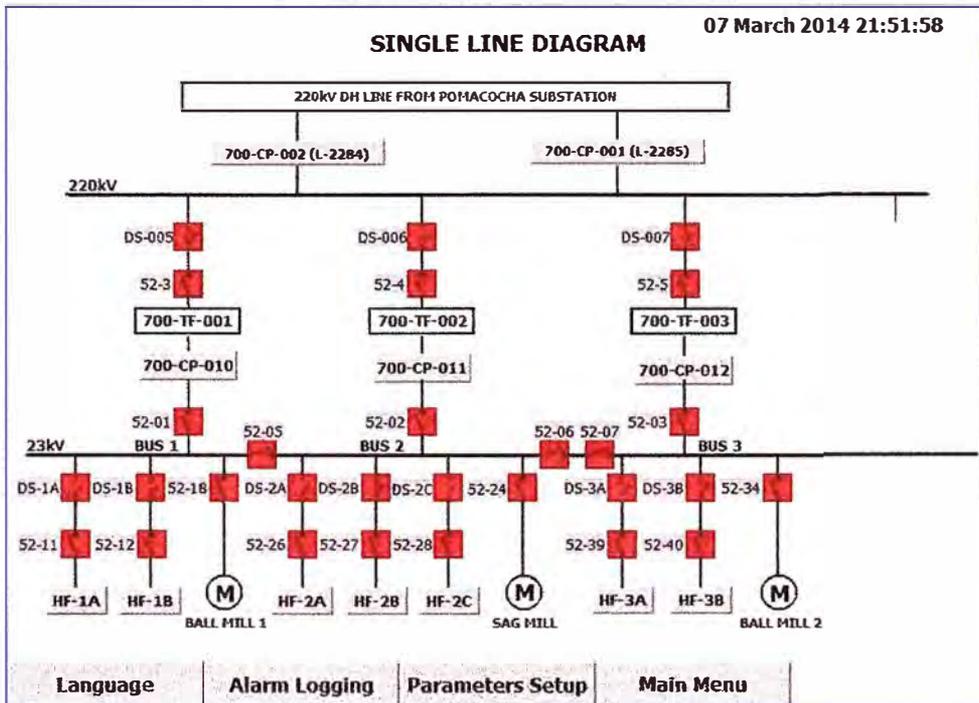
Las líneas aéreas en 220 kV Pomacocha-Toromocho están equipadas con medidores ION 7650 en ambos extremos, que se integran a un sistema de Micro-SCADA.

El sistema de Micro-SCADA tiene disponibles las siguientes señales en ambos lados (Pomacocha y Toromocho) :

- Distorsión armónica total de corriente (THDI)
- Distorsión armónica total de tensión (THDV)
- Potencia Real
- Potencia Reactiva
- Factor de Potencia

### 4.3.7 Lógica de control de los filtros

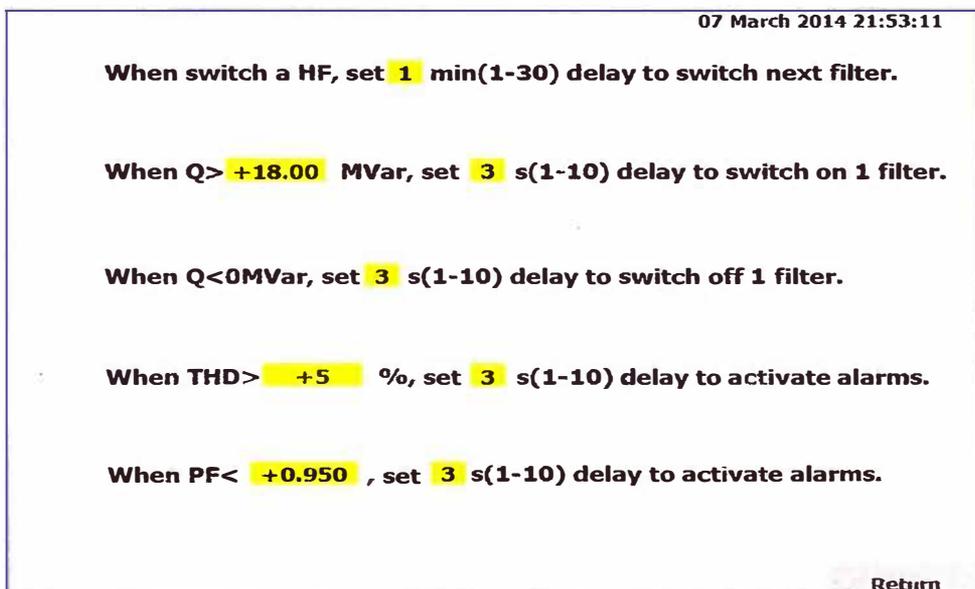
Los filtros de armónicos son controlados por un PLC Siemens el cual recibe información de los Medidores ION 7650 ubicados en las dos Líneas de Pomacocha y de los 03 medidores de la salida de cada transformador de Potencia mostrados en la pantalla principal del HMI del PLC:



**Fig. 4.9** Pantalla Principal del Panel de Control de Los Filtros de Armónicos

Para el control de operación de los filtros se tiene una lógica de control en manual, Semi automático y automático

En los tres casos se debe seguir una lógica de control gobernada por los siguientes parámetros :



**Fig. 4.10** Pantalla de ajustes de Parámetros de Control de Filtros

#### 4.3.8 Lógica de Control de Filtros de Armónicos y Compensación Reactiva

Para el control de los filtros de Armónicos primeramente se debe seleccionar el selector a manual /semiautomático /Automático:

- Modo Manual: Se pueden ingresar o sacar filtros en cualquier orden, esto en condiciones normales no se debe realizar salvo una emergencia o falle el control automático.
- Modo Semi Automático: En este modo se pueden ingresar o retirar los filtros pero en el orden y tiempos de retardo ajustados en el modo automático, se usa en caso el modo automático tenga problemas de control.
- Modo Automático: Los filtros siempre deben trabajar en este modo, para cumplir las condiciones y exigencias en rapidez y orden de ingreso de filtros según diseño del proveedor. Y ante un evento no deseado controlan la salida correcta de los filtros para evitar sobretensiones en la red.

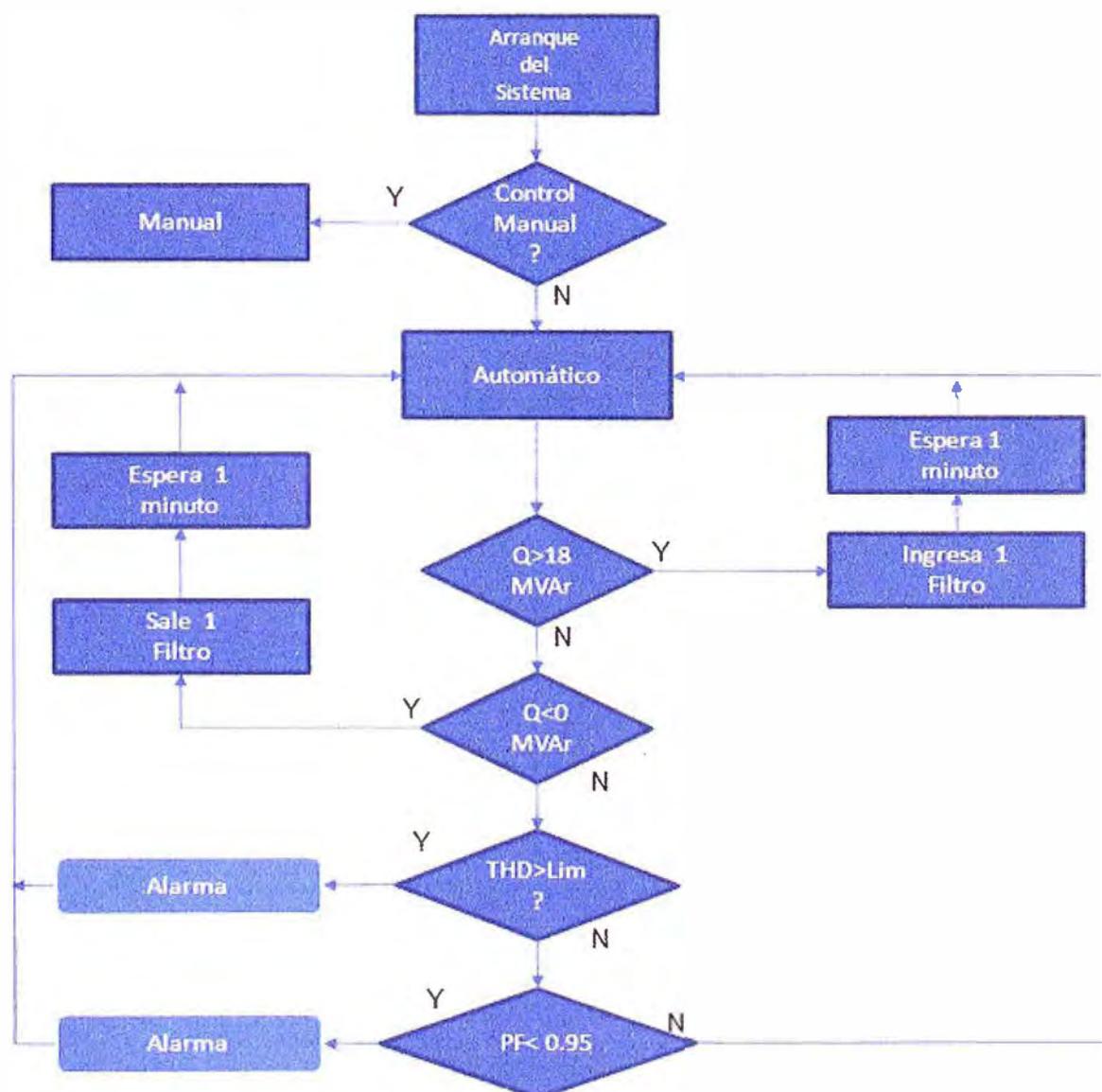


Fig. 4.11 Lógica de Control de Filtros de Armónicos

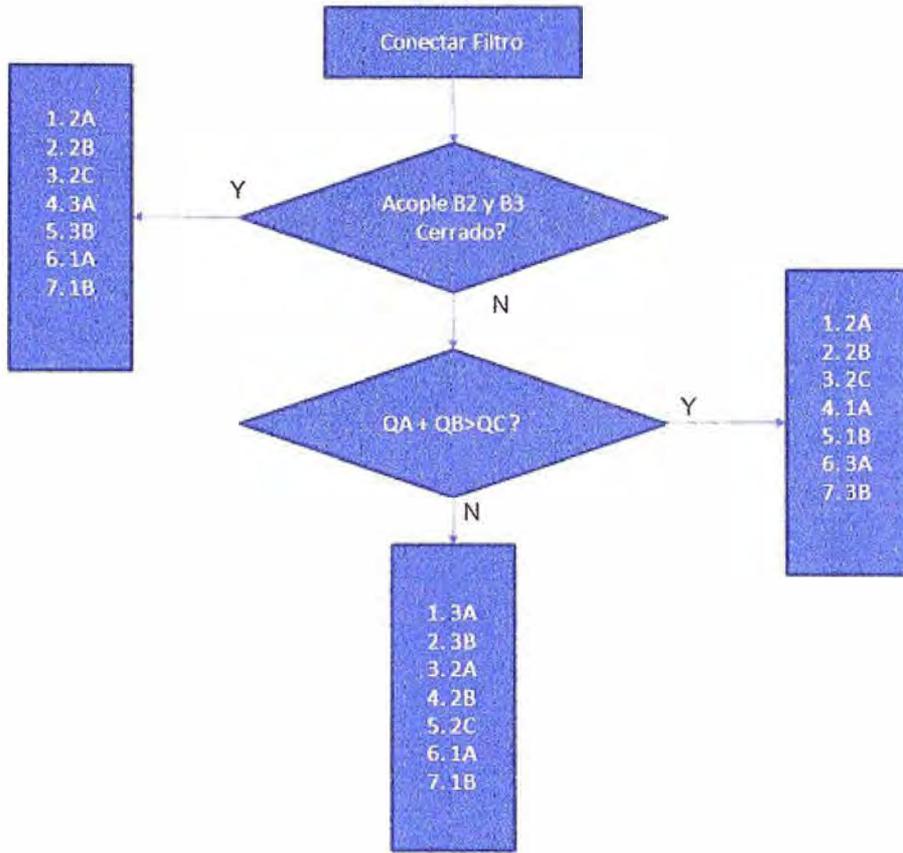


Fig. 4.12 Secuencia de Ingreso de Filtros de Armónicos

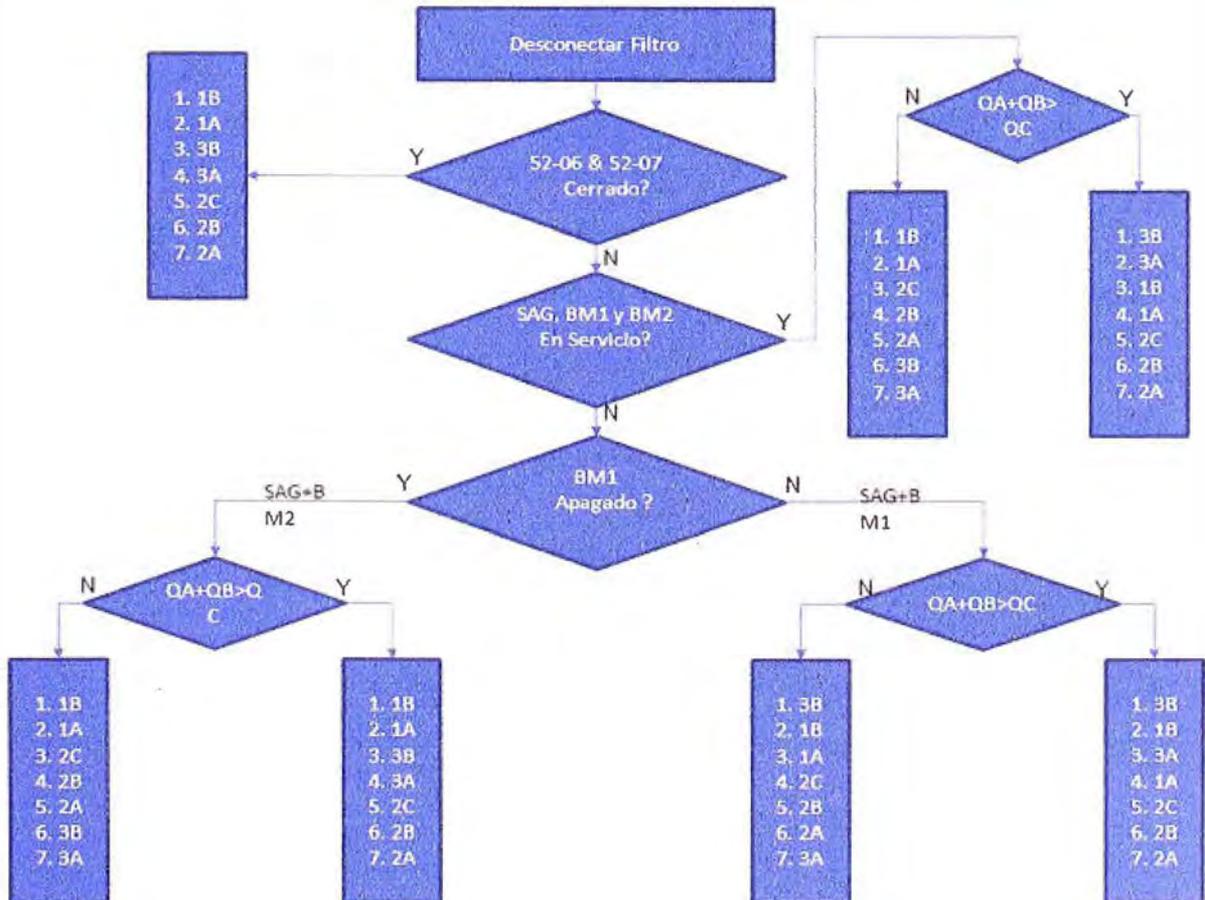


Fig. 4.13 Secuencia de Salida de Filtros de Armónicos

## CAPÍTULO V MÉTODOS DE OPERACIÓN

En el presente capítulo se tocan los temas involucrados a la operación del sistema de accionamiento sin engranajes del molino SAG.

### 5.1 Introducción

El convertidor opera como una parte integral de la planta. Normalmente el convertidor es controlado remotamente por la sala de control de DCS. El control local del convertidor por medio del uso del sistema de control del convertidor es posible para mantenimiento, pruebas y puesta en marcha. El sistema de control principal inicia el proceso de puesta en marcha del convertidor.

El control local del accionamiento sólo es posible si el DCS proporciona la liberación local.

El convertidor le proporciona a la máquina síncrona tensión y corriente de frecuencia variable, causando que acelere desde el modo detenido hasta la velocidad preseleccionada.

Las señales de interface estándar con el sistema de control remoto se transfieren por medio de una conexión de datos seriales Profibus.

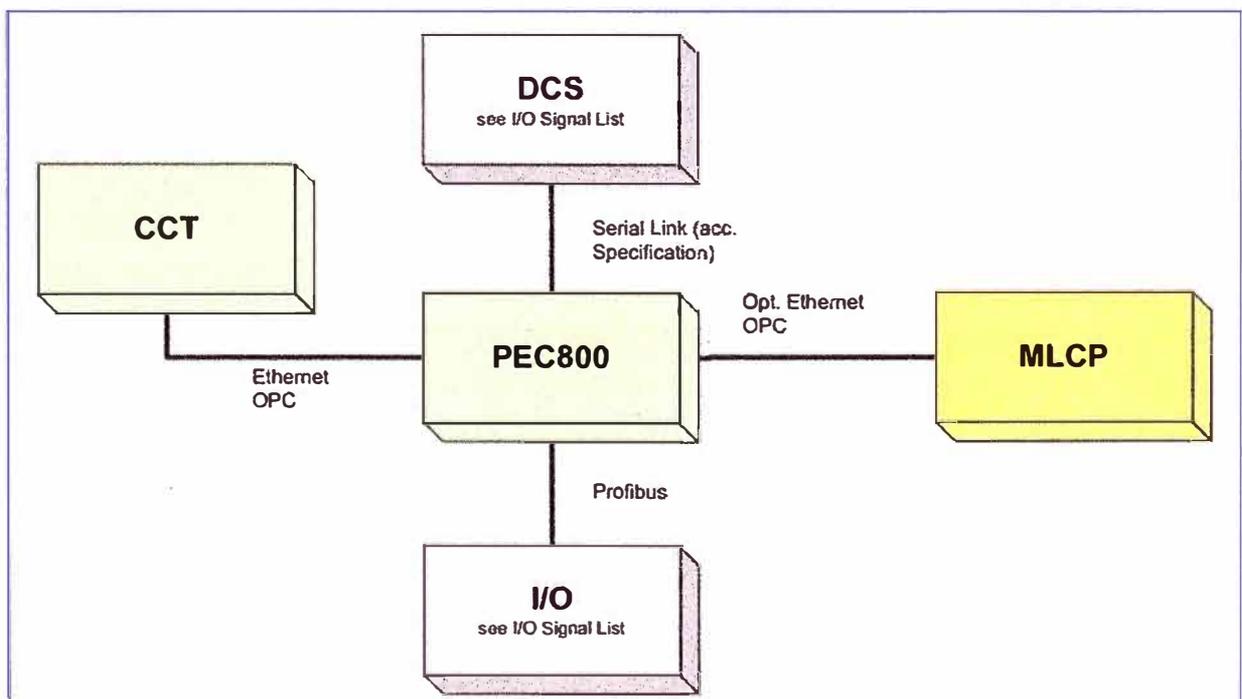


Fig. 5.1: Cicloconvertidor /Planta

- PEC800: Controlador Electrónico de Potencia
- DCS: Sistema de Control Distribuido
- MLCP: Panel de Control Local de Motor
- CCT: Terminal del control del Cicloconvertidor
- I/O: Entradas y Salidas Digitales /Analógicas

## 5.2 Selección de Lugar de Control

El mando del molino puede ser operado desde diferentes lugares de control como:

- DCS (para producción- Sala de Control);
- MLCP (principalmente para mantenimiento de molino);
- E-House (principalmente para comisionamiento e ingenieros de soporte técnico).

El lugar de control inicialmente se programa a DCS (Sistema de Control Distribuido)

**Tabla 5.1** Lugares de control

Comando CCR	Posición Llave de Switch MLCP	Lugar de Control	Observaciones
Remoto o local	CENTRAL	CCR	
Remoto	MLCP/E-HOUSE	CCR	
Local	MLCP/E-HOUSE	MLCP/E-house/Penda nt	El punto de control por defecto es MLCP. Cambio de ciclo control aplicándose Botón de Control del Panel
Remoto	MLCP/E-HOUSE	MLCP/E-house/Penda nt	Comando CCR se encontraba previamente en Local. No se puede contar con un cambio de lugar de control hasta que el switch de llave no es regresado a Central.
Local	MODO SEGURO	-	El molino se encuentra bloqueado, (motor apagado y freno activado). No se puede realizar ninguna operación.

Los cambios de modo de control son sólo posibles cuando el molino se encuentra detenido.

- Switch de Llave.- El Switch de Llave que se encuentra en la puerta frontal del panel selecciona el lugar de Control del Molino una vez que la preselección se ha programado a Local desde el DCS. En este caso, el control no puede ser asumido por el DCS hasta que la llave se coloca nuevamente en modo CENTRAL/E-HOUSE. Aquellas selecciones que no sean compatibles no cambiarán el modo de operación previamente seleccionado. Por razones de seguridad, la llave se puede remover en cualquiera de las posiciones para prevenir un control no autorizado.
- Operación de MLCP.- Debido a que el Panel de Control está equipado con el mismo tipo de Terminal de Ciclo Control del Power Pack en E-House se aplica las mismas reglas

de operación del cicloconvertidor en el instante que el sistema es programado a modo de operación MLCP.

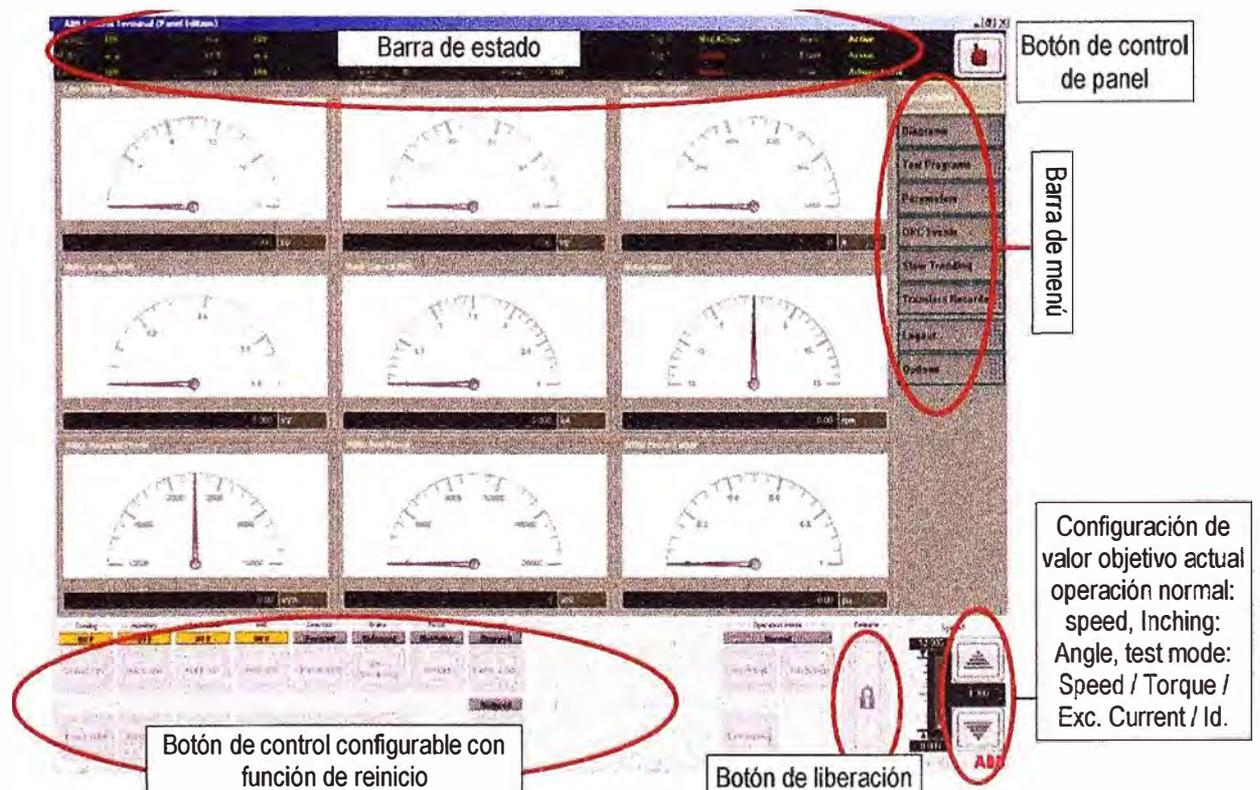
- Modo Seguro.- Modo bloqueo de acceso al molino. Los frenos se encuentran activados y el ring motor se encuentra desenergizado. En modo Seguro se desactiva cualquier tipo de operación, todos los botones del panel de control se encuentran desactivados, freno no puede ser liberado y ring motor del molino no puede ser energizado. Asegura que el molino permanezca detenido mientras el switch de llave se encuentre en la posición "Modo Seguro". El "Modo Seguro" es considerado por el personal de mantenimiento para "bloquear" el ring motor del molino para proteger la seguridad de su personal antes de ingresar al molino.

### 5.3 Puesta en Marcha del Sistema

El CCT (Terminal de Control del Cicloconvertidor) es un panel PC integrado con Windows XP como sistema operativo y los programas del cicloconvertidor. Se opera tocando el ítem del menú deseado en la pantalla.

Cuando el panel (por, ejemplo tras una interrupción eléctrica) se reinicia, Windows XP se carga automáticamente. El servidor OPC luego se inicia, lo que establece la comunicación con el PEC. Esto puede tomar algunos minutos. El AC 800 PEC debe encontrarse en línea para este propósito.

Luego se inicia el software del panel, lo que también toma un momento. Por defecto se muestra lo siguiente en la pantalla:



**Fig. 5.2:** Pantalla por defecto

## 5.4 Secuencia de Arranque del Molino

La secuencia de inicio GMD cuenta con 3 pasos:

- Inicio de auxiliares.
- Inicio de Interruptores,
- Inicio de Molino.

Para el encendido de la alimentación de energía principal y de bajo voltaje antes de iniciar el convertidor. Debe asegurarse que no se está mostrando una alarma o señal de falla en el terminal de control del cicloconvertidor o en la pantalla.

- Secuencia de Inicio de Auxiliares.- El comando de inicio de auxiliares es dado, bajo una operación normal (modo Central), por el DCS. Sin embargo, también es posible contar con el comando desde el Terminal de Control del Cicloconvertidor (modo E-House) o desde el Panel de Control Local del Molino (modo MLCP). Este comando libera la secuencia de inicio del Sistema de Lubricación, Sistema de Frenos y Auxiliares del Ringmotor. Una vez que los auxiliares se encuentran disponibles, el PLC envía a los auxiliares el feedback disponible del Controlador de Mando.

- Comando de Cerrar Interruptor de Circuito.- Una vez que se inician los auxiliares, la Aplicación DriveControl se encuentra lista para cerrar el (los) Interruptor(es) del Circuito MV. Durante la operación normal, el DCS envía el comando cerrar interruptores al PLC ABB (Modo Central) y luego se deriva al Control de Mando. En modos locales (E-House o MLCP) los Interruptores MV se pueden cerrar directamente desde los terminales locales de control. Este comando primero cierra el Interruptor del Estator y 2 segundos más tarde el Interruptor del Rotor. El control de mando espera 2000 ms para recibir el feedback Interruptor(es) cerrado(s). En caso de no recibirse feedback, se genera una falla.

- Inicio del Molino.- Con los Interruptores del MV cerrados, el Control de Mando se encuentra listo para iniciar el molino. Bajo una operación normal (modo Central) el comando lo envía el DCS al PLC ABB y luego se deriva al Controlador de Mando. En modo local (modo E-House o MLCP), la orden es dada por los terminales locales de control (CCT). Una vez recibida la orden del Control de Mando, el convertidor de Excitación se libera. Seguidamente se liberan los pulsos del tiristor del cicloconvertidor, el molino comienza a girar lentamente y aumenta velocidad hasta que se alcanza la Velocidad de Referencia. El aumento de velocidad del molino se realiza aplicándose las rampas de velocidad internas de DriveControl (dependiendo del modo de operación, Normal o Inching / Creeping). La velocidad de referencia la programa el DC bajo operación normal (modo Central). Sin embargo, en modo local (modo E-House o MLCP),

debe ser programada en el Terminal de Control del Cicloconvertidor o en el Panel Local de Control del Motor utilizando los botones UP/DOWN

- Durante la operación del molino, la velocidad de referencia puede ser cambiada en cualquier momento para cumplir con los requisitos del proceso.

### **5.5 Secuencias de Detención del Molino**

La secuencia de detención del GMD puede ser dividida en 3 diferentes secuencias de detención:

1. Detención normal;
2. Detención anormal de auxiliares;
3. Falla de E-Stop / Cicloconvertidor / Alarma de Combate de Incendio;

La detención normal del molino se realiza mediante el comando Detener Molino del DCS (Modo Central) u oprimiéndose los botones Detener Molino en el Terminal de Control del Cicloconvertidor (modo E-House) o en el Panel Local de Control del Motor (modo MLCP). Una vez que el Control de Mando recibe el Comando Detener Molino procede a aplicar un freno eléctrico para reducir suavemente la velocidad. Al momento que el molino alcanza un valor de velocidad programable el Control de Mando inicia automáticamente la Función Inicio Controlado la cual detiene completamente al molino. No se aplica los frenos mecánicos.

El Comando Interruptor Abierto lo envía, bajo operación normal (Modo Central), el DCS. En modo E-House o MLCP el comando abierto lo envía el terminal local de control de mando o el Panel Local de Control de Molino (MLCP). Una vez recibido el Comando Abrir, el Control de Mando inmediatamente abre los interruptores del Circuito del Estator y del Rotor.

El comando detener auxiliares es iniciado por el DCS, bajo operación normal (modo Central). En modo local, el comando es iniciado por el Terminal de Control del Cicloconvertidor (modo E-House) o por el Panel Local de Control del Motor (modo MLCP). El PLC ABB inicia la secuencia de detención de auxiliares (por ejemplo, sistema de frenos, sistema de lubricación). Como parte de la secuencia Inicio, los auxiliares del ring motor se detienen según el tipo de temperatura de bobina del ring motor. Esto causa que, aún después que se detengan el molino y los auxiliares, los ventiladores de refrigeración continúen operando por un período de tiempo hasta que la temperatura de bobina alcance el valor programado. No se recomienda detener los auxiliares. Pueden permanecer operando aún cuando el molino se encuentra detenido.

En modo stand-by el convertidor puede ser desenergizado para ahorra energía. En este caso, apagar el interruptor de MT. En modo stand-by, el suministro de energía de bajo voltaje (MCC, UPS, Iluminación) no debe ser apagado puesto que el sistema de aire

acondicionado siempre debe estar encendido para evitar daños ocasionados por una humedad extrema o fluctuaciones extremas de temperatura.

- **Secuencia normal de parada.**- La secuencia normal de detención cuenta con tres pasos: Detención de molino, Interruptores Abiertos y Auxiliares Apagados.

- **Secuencia de parada anormal.**- Las secuencias de detención anormal se presentan cuando sucede una falla en el sistema auxiliar. En caso de un enclavamiento crítico, se aplica el freno (si se encuentra disponible). En caso de un enclavamiento no crítico, no se aplica el freno.

- **Fallas de E-stop / Cicloconvertidor.**- El botón de detención de emergencia se mantiene oprimido, solo el ring motor conectado realiza la detención de emergencia; no se detienen todos los motores de auxiliares o auxiliares del cicloconvertidor. Se impide que el ring motor se reinicie hasta que se libera el botón de emergencia y se resetee el corte (El cliente debe definir la filosofía de control para las detenciones de emergencia). Dos E-Stops son emitidas como mínimo por ABB, una de ellas se encuentra instalada en el MLCP y la segunda se encuentra montada en la puerta del gabinete del PowerPack. Todas las E-Stops se encuentran conectadas con el relé E-Stop.

## 5.6 Restauración Controlada

Para reducir que el molino vibre violentamente (rocking) al detenerse el sistema, el torque de referencia se reduce lentamente a cero. Para una detención normal, el control trata de operar el molino a baja velocidad (igual a o por debajo de la velocidad de creeping) por un tiempo predefinido a una banda de velocidad predefinida.

Cuando el molino alcanza esta condición, se observa el torque real, se mantiene y es lentamente reducido a cero. Para una detención más suave, la aceleración del molino se mide y un valor inverso y proporcional se agrega al torque de desaceleración lenta. El concepto se muestra en la figura 5.5.

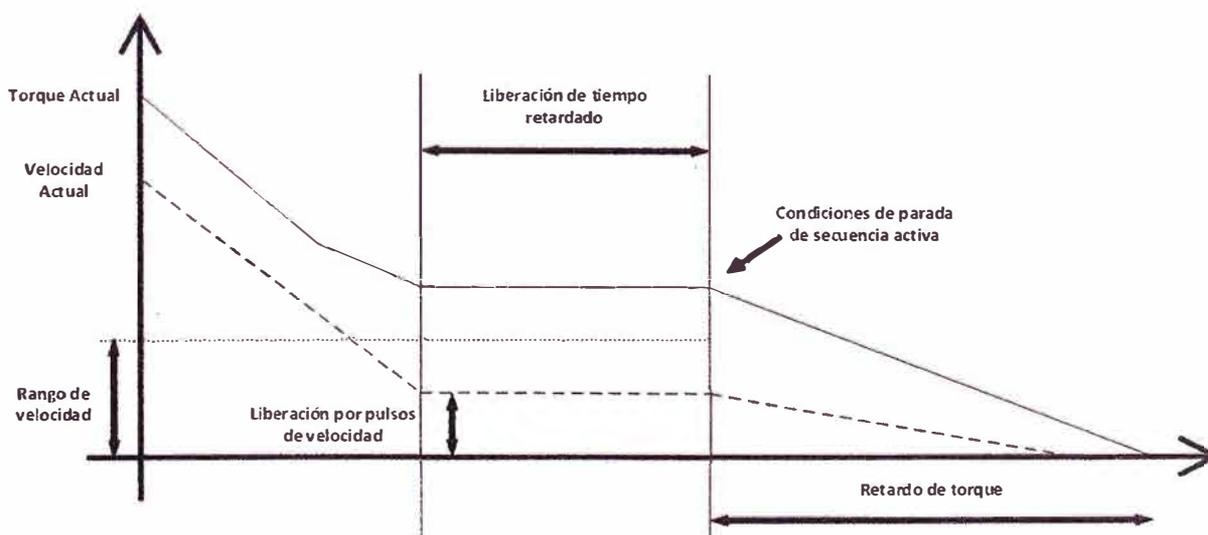


Fig. 5.3: Rampa de Torque (Desaceleración Controlada)

## 5.7 Protección contra Carga Congelada

La protección contra carga congelada protege a los cojinetes durante el arranque del material cargado congelado que cae del molino luego de superar un ángulo de arranque específico. Esta falla se activa si el ángulo contabilizado desde el arranque se encuentra dentro de un rango definido y la carga no ha caído. La detección de cargas congeladas sólo se realiza una vez durante el arranque.

En el momento que el sistema detecta una Carga Congelada el procedimiento de arranque es detenido inmediatamente y la Función Restauración Controlada asume control, lo cual restaura el equilibrio del molino de manera segura.

## 5.8 Otros Comandos

Funciones y comandos adicionales que se operan por medio de botones de comandos opcionales que se muestran a continuación:

### 5.8.1 Modo Inching (Posicionamiento)

Para posicionar el accionamiento del molino en un ángulo específico, es necesario seleccionar "Mill Positioning Mode". El ángulo puede ingresarse por medio del Terminal de Control Local. Después de que se presiona Start PB, el Molino comenzará a girar con velocidad de avance lento. Además, el sistema detectará el ángulo en el cual la carga comienza a ir en cascada. El molino continua girando hasta que la rotación del molino alcanza al valor del punto establecido del ángulo deseado más el ángulo de carga en cascada ( $\alpha_{Rot} = \alpha_{Cascade} + \alpha_{Setpoint}$ ). Tan pronto como se alcanza este ángulo, el sistema iniciará la función Controlled Rollback, lo que equilibrará el molino. Como resultado de esto, el molino se detendrá en la posición definida previamente. La posición angular deseada puede establecerse desde 0° ... 720°.

### 5.8.2 Modo Creeping

Para probar el accionamiento localmente con velocidad mínima, se selecciona "Mill Creeping Mode". Presionando Start PB la velocidad del molino se incrementará hasta que alcance la velocidad de Creeping. Stop PB detiene la rotación del molino.

### 5.8.3 Modo Normal

Para hacer funcionar el molino entre las velocidades MIN y MAX, debe seleccionarse Mill Normal Mode. Tan pronto como se presiona Start PB, puede aumentarse/ disminuirse el punto establecido de velocidad deseada con los botones de referencia. Al presionar Stop PB, la velocidad del molino disminuye, siguiendo una función de rampa, para reducir el balanceo. Los frenos no se aplicarán en este modo.

### 5.8.4 Reducir Mill Rocking

Para evitar que el Molino se balancee, se utiliza la función "Re-Rocking". Básicamente corresponde a un Freno manual – se aplica siempre que el botón se encuentre

presionado. Debido al hecho que el freno rápido se aplica automáticamente al detener el modo Inching/Creeping, Reduce Mill Rocking se utiliza al cambiar de “MLCP” a modo CENTRAL/E-HOUSE o después de que ha ocurrido una Parada de Emergencia. La función Reduce Mill Rocking se habilita en cualquier modo siempre que el motor se encuentre detenido.

#### **5.8.5 Manual Lowering**

Acoplamiento del freno en una posición en la que el establecimiento en cascada de la carga aún no ha ocurrido, sumado a un gran esfuerzo en las mordazas de los frenos. Con manual lowering (que básicamente es una liberación del freno manual mientras el botón se encuentre presionado) es posible equilibrar el molino. La función Manual Lowering se habilita en cualquier modo, pero solamente si el Motor se encuentra detenido y el Sistema de Lubricación se encuentra en funcionamiento.

#### **5.8.6 Turn 180°**

Este botón obliga al Molino a girar 180°. Dependiendo de la aplicación esta función puede utilizarse para evitar la tensión mecánica del molino.

Las paradas del molino a plena carga no deseadas pueden causar que el molino se doble, lo que incluso puede desencadenar el disparo del sistema dentro del próximo procedimiento de arranque, debido a que los sistemas de supervisión de entrehierro detectan excentricidad (especialmente en el caso de los molinos de cemento). El uso regular de esta función puede ayudar a evitar los efectos recién mencionados.

#### **5.8.7 Frozen Charge Remover**

Si el sistema detecta carga del molino cementado / congelado durante la puesta en marcha, éste se detiene con el propósito de evitar que la carcasa del molino y los rodamientos se vean afectados por la caída de material desde la parte superior de la carcasa hacia el fondo.

En este caso, la función “Frozen Charge Remover” puede ser utilizada para separar la carga congelada de la carcasa del molino. Tan pronto como se selecciona esta función presionando el pulsador respectivo, el sistema inicia el arranque del molino, durante el cual la rampa de par real se ve superpuesta por pasos de par que se pueden configurar libremente. Estos golpes de par separan la carga congelada de la carcasa del molino. Tan pronto como se alcanza el ángulo de cascada (parámetro ajustable) se lleva a cabo una parada controlada del molino.

Esta función puede reiniciarse cada vez que se requiera.

### **5.9 Función Fallas y Reset**

Diferentes tipos de alarmas y señales de corte indican fallas o mal funcionamiento del convertidor y componentes del sistema. Estas fallas se clasifican de la manera siguiente

- Fallas generales.- Estas fallas se indican en el terminal de control del convertidor bajo el menú de Eventos. Uno o varios mensajes de falla en el terminal de control describen la(s) falla(s) indicando el tipo de evento, la señal de Corte, Alarma, o Evento y mensaje de texto asignado.

- Fallas de Controlador de Excitación.- Fallas derivadas del control de excitación son mostradas en el panel de control del convertidor y en el componente controlador tal como se indica a continuación:

- La falla se indica en el terminal de control del convertidor bajo el menú Eventos OPC y se muestra como: 'DCF\_Tripped'.
- El número de falla (por ejemplo, 'F07') de la primera falla parpadea en la pantalla del controlador de excitación; para indicar cualquier otra falla posterior o resultante oprimir botón UP en el panel del convertidor de excitación.

La Lista de Fallas AC800 PEC ofrece una vista general de todas las señales de Advertencia y Corte que pueden mostrarse en el terminal de Control.

Así mismo, informa sobre posibles causas de raíz y ofrece consejos para solucionar el/los problema(s) pendiente(s).

Las diferentes señales de salida binaria para cortes y mal funcionamientos son indicaciones provenientes del convertidor, interruptor y componentes externos del sistema. Asegúrese que haya integrado estas señales en el sistema de control de energía de la planta y el panel de control principal para controlar debidamente el convertidor.

### **5.10 Detención de Emergencia**

El botón de detención de emergencia del PowerPack y MLCP está especialmente diseñado para situaciones de emergencia. Si oprime este botón:

- Se apaga el convertidor (y equipo auxiliar);
- El interruptor principal (estator y rotor) se abre inmediatamente;
- Se aplica los frenos (si se encuentran disponibles).

### **5.11 Enclavamientos del sistema**

El sistema de control GMD involucra diferentes tipos de enclavamiento, y, dependiendo de cuan crítica es la falla, se inician diferentes acciones. Los enclavamientos pueden ser divididos en dos tipos: enclavamientos de Molino/Mando (Críticos, no críticos, de proceso, de inicio o permisivos y de conexión directa) y enclavamientos específicos para grupos de dispositivos/funciones (Controlados por PLC, Estos inhiben la operación de dispositivos auxiliares específicos).

Los enclavamientos de Molino/Mando detienen el molino, pero no el equipo auxiliar, mientras que los enclavamientos de grupo son específicos y sólo detienen el dispositivo en cuestión.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se garantizó la correcta instalación, puesta en servicio y operación del motor en MT del molino SAG, asegurando así su correcto funcionamiento.
2. En la puesta en servicio el molino SAG se tenía ajustes de protección de Sub tensión, sobre frecuencia a valores de fábrica pero en la operación se tuvieron que cambiar debido a que estos ajustes eran muy sensibles ante perturbaciones que se presentaron en la red eléctrica generados por tormentas eléctricas y problemas propios de la red, estos valores fueron cambiados con previa coordinación con el proveedor del equipo para no sobrepasar los valores límite de protección. El ajuste de sobre frecuencia se subió en 1%, el tiempo de disparo de actuación por sub tensión se elevó en 180ms.
3. En el arranque del molino SAG se presentaba una corriente homopolar en el orden de los 4 a 10 amperios, la cual se presumía que era generada por la corriente de inserción de los tres transformadores del cicloconvertidor que era detectada por el interruptor principal del molino disparando por falla a tierra impidiendo el arranque, este ajuste estaba en 10 amperios, en 0.15ms, se cambió el ajuste a 15 amperios en 0.15ms verificando que coordine la protección con las protecciones aguas arriba y abajo y se evitó el disparo.  
  
Pero la corriente homopolar se mantenía en operación normal del molino en el orden de los 5amperios, se evaluó y se encontró una mala conexión de las pantallas de los cables se corrigió el problema y desapareció la corriente homopolar existente.
4. Para el control de ingreso y retiro de filtros de armónicos fue necesario cambiar la lógica de control de los filtros, y el Set Point de tensión de 23KV a 23.3KV ya que inicialmente era necesario que ingrese un filtro de armónicos antes que arranque cualquier molino, ya que la sub tensión generada (-3%) por el arranque de un segundo molino provocaba parada de planta por mínima tensión, el problema era que el filtro ingresaba cuando se cerraba el interruptor principal de cualquier molino pero no necesariamente arrancaba el molino después de cerrar el interruptor lo que generaba inyección de reactiva capacitiva al sistema e incremento de tensión en (+2.8%).
5. Para los tiempos de ingreso y retiro de los filtros de armónicos se midieron los tiempos

de arranque y parada de los molinos (SAG y Bolas) (05 segundos) con esos tiempos se ajustaron los tiempos de ingreso y retiro de cada filtro (3 segundos) evitando así que la tensión de la red caiga por el arranque de un molino (-3%) o se eleve al ingresar un filtro (+2.8%).

### **Recomendaciones**

1. Para el comisionamiento y puesta en servicio se documentaron todas las pruebas de parámetros eléctricos y de puesta en servicio las cuales deben guardarse adecuadamente a fin de servir de referencia a otros grupos de trabajo.
2. Para el buen funcionamiento y mantención del molino SAG se recomienda seguir los procedimientos de operación indicados los cuales previenen una mala secuencia de operación que sobre esfuerce el molino SAG o sus partes.
3. Grabar historiales y tendencias de las señales monitoreadas como tensión, corriente, frecuencia, potencia torque, temperaturas holguras y distancias mínimas permitidas tanto del molino como del cicloconvertidor, para poder determinar anomalías y poder corregirlas antes que genere problemas graves.
4. Preparado el programa de inspección y servicio para el Molino, Cicloconvertidor y sistema de enfriamiento, respete las frecuencias y duración de las inspecciones, verificaciones, reemplazo de partes de desgaste y lubricación y lleve registros de estas actividades.
5. Consulte con el proveedor ante cualquier duda o problema que se presente y desconozca enviándole las alarmas, eventos y señales anómalas presentadas, el proveedor al tener más experiencia y ser fabricante del equipo brinda un buen soporte técnico.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Estándar para el control de armónicas en sistemas de energía eléctrica IEEE Std. 519-1992
- [2] Norma técnica de calidad de servicios eléctricos NTCSE – 08/2010
- [3] Estándar para capacitores IEC 60871-1 (2005)
- [4] Estándar para reactores IEC 60076-6 (2002)
- [5] Estándar para resistencias IEC 60694
- [6] Estándar para transformadores de cicloconvertidores IEC 61378-1