

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAB DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA**  
**Y MECÁNICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**INFORME TÉCNICO**

---

**APLICACIÓN DEL MOTOR SINCRONO EN MOLINOS GEARLESS**

---

**PRESENTADO POR:**

Br. JAIME NESTOR SAICO FERNANDEZ.

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO ELECTRICISTA  
POR LA MODALIDAD DE SERVICIOS A  
NIVEL PROFESIONAL.**

**CONSEJERO:**

Ing. PABLO APAZA HUANCA

CUSCO – PERÚ

2023

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** (Consejero) del informe técnico /tesis titulada:.....  
*APLICACIÓN DEL MOTOR SINCRONO EN MOLINOS GEARLESS*

presentado por: *Jaime Nestor Saico Fernandez* con DNI Nro.: *46200519*

para optar el título profesional/grado académico de .....  
*INGENIERO ELECTRICISTA*

Informo que el Informe técnico ha sido sometido a revisión por *03* veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de *3*.....%.

## Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje     | Evaluación y Acciones   | Marque con una (X)                  |
|----------------|---|-------------------------------------|
| Del 1 al 10%   | No se considera plagio.   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las correcciones.  | <input type="checkbox"/>            |
| Mayor a 31%    | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/>            |

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, *29* de *setiembre* de 20*23*



Firma  
Post firma *Pablo Apaza Huanca*

Nro. de DNI *23842746*

ORCID del Asesor *000-0002-3941-1347*

### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: \_\_\_\_\_

<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:2706785967?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**APLICACIÓN DEL MOTOR SINCRONO EN  
MOLINOS GEARLESS**

AUTOR

**Jaime Nestor Saico Fernandez**

RECUENTO DE PALABRAS

**24960 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**144744 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**190 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**9.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Sep 29, 2023 2:32 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

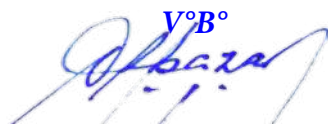
**Sep 29, 2023 2:34 PM GMT-5****● 3% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 3% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)
- Bloques de texto excluidos manualmente

VºBº  


## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, por su amor incondicional, por darme vida y la oportunidad de estudiar una carrera profesional que me apasiona y con ejercerla me permite sumar de forma directa e indirecta a la sociedad.

A mis padres Víctor Saico y Sofía Fernández, por su esfuerzo y dedicación, hicieron posible completar mi carrera profesional, por su motivación constante y por haberme inculcado valores de los que hoy me siento orgulloso. Este logro también es suyo.

A mi novia Katia Dueñas quien me apoyó y alentó para continuar con el informe, cuando parecía que me iba a rendir o seguir posponiendo. Por creer en mi como profesional e impulsarme a buscar nuevos retos.

A mis tíos, primos y hermanos por su acompañamiento, sus consejos, motivación y respaldo durante mis estudios, hasta concretar este logro importante en mi vida.

A todos los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, por los conocimientos adquiridos en los años de estudio.

## Presentación

Señor decano de la Facultad de Ingeniería: Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica de la tricentenario Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco , con el propósito de poder optar al título profesional de ingeniero electricista y en estricto cumplimiento del reglamento de grados y títulos vigentes de nuestra facultad, presento el informe técnico: “**APLICACIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO EN MOLINOS GEARLESS**”; trabajo que tiene como finalidad describir la utilización de motores trifásicos de 24 y 16,4 MW, accionados por convertidores Sinamics SL150, en molinos tubulares sin engranajes de 40’x25’ y 26’x40.5’ respectivamente en el proceso de molienda de una unidad minera importante. El presente trabajo queda a disposición de todos sus lectores con el objetivo de contribuir con la formación de profesionales dedicados al mantenimiento de accionamientos sin engranaje de gran potencia.

## Resumen

Según el Ministerio de Energía y de Minas, en el anuario minero del 2020, sostiene que el Perú es uno de los países que goza de una larga tradición minera en América Latina y el mundo y es el segundo productor de cobre y con el crecimiento de la minería, en la etapa de molienda, las tecnologías convencionales de piñón-corona, empezaron a presentar problemas técnicos y operacionales, dando lugar a los accionamientos gearless (libre de engranajes). Estos accionamientos tienen un lugar importante dentro de la industria minera y representan casi el 60 % del consumo total de energía de una planta concentradora moderna, como es el caso de la Compañía Minera Antapaccay S.A.

El presente informe tiene como objetivo describir la utilización y experiencia práctica de dos motores de anillo (motores síncronos) de 24 y 16 MW, accionados por convertidores Sinamics SL150 en molinos tubulares gearless de 40'x25' y 26'x40.5' respectivamente, dentro del proceso de molienda.

Así mismo, en este informe, se sigue un enfoque de lo general a lo específico, pero el análisis se centra principalmente en el comportamiento del motor síncrono, los cicloconvertidores y en el esquema de control requerido para impulsar los motores de los dos tipos de molinos existentes; Sag y de Bolas, apoyándose de un programa de análisis de datos (IbaAnalyser) y el WinCC. Siendo el motor síncrono parte del molino, es inevitable incluir una descripción breve de los sistemas auxiliares del sistema GMD (Gearless Mill Drives), los modos de operación y mantenimiento.

La evaluación se soporta con resultados obtenidos en el arranque de la máquina y el comportamiento del motor de anillo bajo carga, las variables de monitorización utilizados son las tensiones, corrientes, potencias y energías. Lo anterior sirve para vigilar el normal desempeño de

la maquina por los operadores y mantenedores de la planta concentradora, asegurando la máxima disponibilidad de los mismos, en beneficio de Compañía Minera Antapaccay S.A. también se debe tener presente que en toda actividad de mantenimiento, se ve involucrado la integridad física de los mantenedores, por ser ellos la primera respuesta ante una parada imprevista de los molinos, y mientras mayor sea la cantidad de paradas no programadas, mayores serán las probabilidades de sufrir un evento no deseado.

Como conclusión final, cabe mencionar que la introducción de motores síncronos alimentados por cicloconvertidor en molinos Sag y Bolas mejoran la calidad y el rendimiento global del proceso de molienda.

**Palabras calves:**

Motor, síncrono, molino, Gearless.

## Contenido

|   |              |
|---|--------------|
| <i>Dedicatoria</i> .....  | <i>ii</i>    |
| <i>Presentación</i> .....   | <i>iii</i>   |
| <i>Resumen</i> .....  | <i>iv</i>    |
| <i>Lista de figuras</i> .....   | <i>xii</i>   |
| <i>Lista de tablas</i> .....  | <i>xvii</i>  |
| <i>Glosario de abreviaturas</i> .....                                 | <i>xviii</i> |
| <b>Capítulo I. Aspectos generales</b> .....                           | <b>1</b>     |
| 1.1 Introducción .....  | 2            |
| 1.2 Descripción de la empresa .....                                   | 3            |
| 1.2.1 Datos de la empresa .....                                       | 5            |
| 1.2.2 Valores Corporativos de la Compañía Minera Antapaccay S.A. .... | 6            |
| 1.2.2.1 Seguridad .....   | 6            |
| 1.2.2.2 Integridad .....  | 6            |
| 1.2.2.3 Responsabilidad .....   | 6            |
| 1.2.2.4 Transparencia .....   | 6            |
| 1.2.2.5 Simplicidad .....   | 6            |
| 1.2.2.6 Espíritu empresarial .....                                    | 6            |
| 1.3 Sistema eléctrico en la planta concentradora Antapaccay .....     | 7            |
| 1.3.1 Ubicación de las salas eléctricas. ....                         | 9            |
| 1.4 Estructura organizacional.....                                    | 12           |
| 1.4.1 Visión de la gerencia de mantenimiento .....                    | 12           |
| 1.4.2 Misión de la gerencia de mantenimiento .....                    | 12           |
| 1.5 Funciones del puesto de trabajo .....                             | 13           |
| 1.6 Objetivo general .....  | 13           |
| 1.6.1 Objetivos específicos .....                                     | 13           |
| 1.7 Alcances del informe.....   | 14           |
| 1.8 Limitaciones del informe .....                                    | 14           |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo II. El Proceso de Molienda .....</b>                   | <b>15</b> |
| 2.1 Introducción .....   | 16        |
| 2.2 Diagrama general del flujo de explotación y del proceso .....  | 16        |
| 2.2.1 Explotación .....  | 16        |
| 2.2.2 Procesamiento de Sulfuros .....                              | 17        |
| 2.2.3 Molienda primaria .....                                      | 20        |
| 2.2.4 Molienda secundaria .....                                    | 21        |
| 2.3 Producción minera metálica en el contexto de la pandemia ..... | 22        |
| 2.4 Cotización del cobre .....                                     | 23        |
| <b>Capítulo III. Molinos sin Engranaje .....</b>                   | <b>25</b> |
| 3.1 Introducción .....   | 26        |
| 3.2 Aspectos básicos de los molinos sin engranaje .....            | 26        |
| 3.3 Molino Sag y Bolas en Antapaccay .....                         | 27        |
| 3.3.1 Datos técnicos del molino Sag .....                          | 27        |
| 3.3.2 Datos técnicos de los molinos de Bolas .....                 | 28        |
| 3.4 Principales componentes del molino gearless .....              | 28        |
| 3.4.1 Casco del molino .....                                       | 31        |
| 3.4.2 Tapas del molino .....                                       | 31        |
| 3.4.3 Descansos del molino .....                                   | 31        |
| 3.4.4 Rejillas o parrillas en molinos SAG .....                    | 31        |
| 3.4.5 Revestimientos o lanners para molinos .....                  | 32        |
| 3.5 Descripción del sistema sin engranajes .....                   | 35        |
| 3.5.1 Parte de potencia del accionamiento sin engranajes .....     | 37        |
| 3.6 Modos de operación del molino .....                            | 43        |
| 3.6.1 Operación remoto normal .....                                | 44        |
| 3.6.2 Operación local normal .....                                 | 44        |
| 3.6.3 Modo paso a paso .....                                       | 44        |
| 3.6.4 Modo lento .....   | 45        |
| 3.6.5 Modo balanceo .....  | 46        |
| 3.7 Procedimiento de arranque del molino .....                     | 47        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 3.7.1                                      | Arranque de los elementos auxiliares del molino .....                   | 47        |
| 3.7.2                                      | Arranque del sistema de lubricación del molino .....                    | 48        |
| 3.7.3                                      | Cierre de interruptores.....  | 48        |
| 3.7.4                                      | Arranque del Molino .....   | 49        |
| 3.8  | Procedimiento de paro del molino. ....                                  | 50        |
| 3.9  | Grupos de funciones técnicas.....                                       | 50        |
| <b>Capítulo IV. El Motor Síncrono.....</b> |   | <b>52</b> |
| 4.1  | Introducción .....  | 53        |
| 4.2  | Motor síncrono .....  | 54        |
| 4.2.1                                      | Estructura del motor de síncrono aplicado en molinos sin engranaje..... | 54        |
| 4.2.1.1                                    | Estatador .....   | 54        |
| 4.2.2                                      | Rotor .....   | 55        |
| 4.2.2.1                                    | Colector de anillos del motor .....                                     | 59        |
| 4.2.2                                      | Caja de conexiones de fuerza del motor .....                            | 60        |
| 4.2.3                                      | Conexión de los circuitos auxiliares .....                              | 60        |
| 4.2.3.1                                    | Conexión de los calefactores.....                                       | 60        |
| 4.2.3.2                                    | Conexión de las sondas de temperatura .....                             | 61        |
| 4.2.4                                      | Sistema de refrigeración.....   | 61        |
| 4.2.5                                      | Supervisión del entrehierro de la máquina.....                          | 62        |
| 4.3  | Principio de funcionamiento .....                                       | 66        |
| 4.4  | Circuito equivalente de un motor síncrono .....                         | 67        |
| 4.5  | Arranque de motores síncronos.....                                      | 69        |
| 4.4.1.1                                    | Reducción de la frecuencia .....  | 69        |
| 4.4.1.2                                    | Primomotor externo: .....   | 69        |
| 4.4.1.3                                    | Devanados amortiguadores:.....  | 69        |
| 4.5.1                                      | Arranque del motor de anillo .....                                      | 69        |
| 4.6  | El motor síncrono de polos salientes en régimen permanente .....        | 72        |
| 4.6.1                                      | Curva de capacidad de una máquina síncrona .....                        | 75        |
| 4.7  | Comportamiento general del motor anillo bajo carga.....                 | 79        |
| 4.7.1                                      | Corrientes de fase.....   | 79        |
| 4.7.2                                      | Tensiones de fase .....   | 80        |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 4.7.3   | Corrientes y voltajes de fase: .....   | 81         |
| 4.7.4   | Voltaje y corriente de excitación: .....   | 82         |
| 4.7.5   | Potencia activa, reactiva y aparente del motor anillo: .....                       | 83         |
| 4.7.6   | Factor de potencia: .....  | 85         |
| 4.7.7   | Parada de un motor anillo .....  | 86         |
| 4.7.8   | Consumo de energía de los tres motores anillo.....                                 | 87         |
| 4.7.8.1   | Molino Sag.....  | 87         |
| 4.7.8.2   | Molino de Bolas 1 .....  | 89         |
| 4.7.9   | Molino de Bolas 2 .....  | 90         |
| 4.8   | El motor síncrono de polos salientes en régimen transitorio .....                  | 92         |
| 4.8.1   | Representación esquemática de un motor síncrono de doble devanado estatórico.....  | 92         |
| 4.8.2   | Diagrama del circuito equivalente típico de un motor de anillo. ....               | 94         |
| 4.9   | Trabajos de mantenimiento .....  | 95         |
| 4.9.1   | Reglas de tolerancia cero .....  | 95         |
| 4.9.2   | Requisitos mínimos de equipos de protección personal para trabajos eléctricos..... | 97         |
| 4.9.3   | Recomendaciones de seguridad para el personal de mantenimiento .....               | 98         |
| 4.9.3.1   | Fuentes de energía eléctrica y mecánica. ....                                      | 98         |
| 4.9.3.2   | Enfriamiento de la máquina .....   | 98         |
| 4.9.3.3   | Limpieza con aire comprimido .....   | 98         |
| 4.9.4   | Intervalos de mantenimiento .....  | 98         |
| 4.9.5   | Distribución en media tensión.....   | 99         |
| 4.9.6   | Distribución en baja tensión.....  | 100        |
| 4.9.7   | Fuente de alimentación de emergencia .....   | 100        |
| 4.9.8   | Sistema de accionamiento .....   | 101        |
| 4.9.9   | Sistema de automatización y control (Lazo de control cerrado).....                 | 104        |
| <b>Capítulo V. Convertidores de potencia.....</b> |  | <b>105</b> |
| 5.1   | Introducción .....   | 106        |
| 5.2   | Convertidores de potencia.....   | 106        |
| 5.2.1   | El tiristor. ....  | 106        |
| 5.3   | Cicloconvertidores .....   | 107        |
| 5.3.1   | El cicloconvertidor monofásico .....   | 107        |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 5.3.2   | Cicloconvertidor trifasico $3\phi - 1\phi$ .....                                    | 108        |
| 5.3.3   | Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 1\phi$ .....                                    | 109        |
| 5.3.4   | Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ .....                                    | 110        |
| 5.3.4.1   | Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ de tres pulsos.....                      | 110        |
| 5.3.4.2   | Cicloconvertidor trifasico $3\phi - 3\phi$ de seis pulsos.....                      | 111        |
| 5.3.4.3   | Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$ de 12 pulsos.....                                  | 112        |
| 5.4   | Cicloconvertidor Sinamics SL150.....  | 113        |
| 5.4.1   | Cicloconvertidores para aplicaciones gearless.....                                  | 113        |
| 5.4.2   | Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ de 2x6 pulsos.....                       | 113        |
| 5.4.3   | Configuración de un ciclo convertidor trifásico de 12 pulsos.....                   | 115        |
| 5.5   | Características del cicloconvertidor.....   | 116        |
| 5.5.1   | Armónicos de corriente.....   | 116        |
| 5.5.2   | Medición de armónicas de corriente.....   | 117        |
| 5.6   | Compensación del cicloconvertidor.....  | 120        |
| 5.7   | Esquema de protección del cicloconvertidor.....                                     | 121        |
| 5.8   | Control vectorial.....  | 122        |
| 5.8.1   | Transformación de coordenadas.....  | 123        |
| 5.8.1.1   | Transformación de Clarke.....   | 123        |
| 5.8.1.2   | Transformación de Park.....   | 126        |
| 5.9   | Control vectorial de un motor síncrono.....   | 130        |
| 5.9.1   | Configuración del sistema para la aplicación de molinos gearless en Antapaccay..... | 132        |
| 5.10  | Estructura del sistema de control Sinamics SL150.....                               | 132        |
| <b>Capitulo VI. SIMATIC WinCC flexible.....</b> |   | <b>134</b> |
| 6.1   | Introducción.....   | 135        |
| 6.2   | Vista general del del molino.....   | 136        |
| 6.3   | Tendencias del molino Sag en mantenimiento.....                                     | 137        |
| 6.4   | Sistema de enfriamiento del motor síncrono.....                                     | 139        |
| 6.5   | Temperatura de los trunnion del molino.....   | 140        |
| 6.6   | Medición del entrehierro de la maquina síncrona.....                                | 141        |
| 6.7   | Sistema de lubricación del molino Sag.....  | 145        |
| 6.8   | Sistema de enfriamiento del cicloconvertidor del motor síncrono.....                | 146        |

|      |   |            |
|------|---|------------|
| 6.9  | Temperatura de los arrollamientos del motor síncrono. ....                | 147        |
| 6.10 | Sistema de freno del molino.....  | 148        |
| 6.11 | Sistema de los enfriadores del motor/molino.....                          | 149        |
| 6.12 | E-house molino Sag. ....  | 150        |
| 6.13 | Leyenda WinCC.....  | 152        |
| 6.14 | Tendencias de las variables más importantes del sistema motor/molino..... | 153        |
|      | <b>Conclusiones</b> .....   | <b>154</b> |
|      | <b>Bibliografía</b> .....   | <b>157</b> |
|      | <b>ANEXOS</b> .....   | <b>160</b> |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Planta concentradora moderna de Antapaccay.....                                  | 1  |
| Figura 2. Ubicación de la planta concentradora de Antapaccay. ....                         | 5  |
| Figura 3. Ubicación de la subestación eléctrica de Antapaccay en el unifilar del SEIN..... | 8  |
| Figura 4. Disposición de las salas eléctricas en los diferentes puntos del proceso.....    | 11 |
| Figura 5. Los cuatro niveles en la dirección de la Gerencia de Mantenimiento. ....         | 12 |
| Figura 6. Molinos de bolas 1 y 2 en la etapa de molienda.....                              | 15 |
| Figura 7. Faja transportadora Overland alimentando a la ruma de gruesos.....               | 17 |
| Figura 8. Molino Sag, molinos de Bolas 1 y 2.....  | 19 |
| Figura 9. Molino SAG de 40'x25' .....  | 20 |
| Figura 10. Molinos de Bolas de 26'x40.5' en funcionamiento.....                            | 21 |
| Figura 11. Producción de cobre (miles de TMF).....   | 23 |
| Figura 12. Variación del precio del cobre en un periodo de dos años. ....                  | 24 |
| Figura 13. Molino Semi-Autógeno (SAG) sin engranajes.....                                  | 25 |
| Figura 14. Componentes internos del Molino Sag.....  | 29 |
| Figura 15. Componentes externos del Molino Sag. ....                                       | 29 |
| Figura 16. Componentes internos de un molino de bolas.....                                 | 30 |
| Figura 17. Componentes externos de un Molino de Bolas. ....                                | 30 |
| Figura 18. Dos revestimientos del casco del molino SAG, esperando ser montados. ....       | 32 |
| Figura 19. Parrilla de la tapa de descarga del molino Sag esperando ser montado. ....      | 33 |
| Figura 20. Vista interior del Molino Sag .....   | 34 |
| Figura 21. Vista general del sistema de accionamiento de molinos sin engranaje. ....       | 36 |
| Figura 22. Patio de transformadores del molino Sag.....                                    | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 23. Cicloconvertidor para un devanado trifásico del molino Sag. ....  | 40 |
| Figura 24. Convertidor de excitación Simoreg DC Master. ....   | 41 |
| Figura 25. Modelo CAD 3D del motor de anillo Siemens de 42 pies. ....  | 42 |
| Figura 26. Tablero de Control Local Molino Sag. ....   | 43 |
| Figura 27. Mando de marcha muy lento del Molino Sag. ....  | 46 |
| Figura 28. Motor síncrono acoplado a la polea motriz de una faja de 7 km. ....                                     | 52 |
| Figura 29. Clasificación de la máquina eléctrica según la fuente de alimentación y el principio de operación. .... | 53 |
| Figura 30. Desplazamiento del estator de un motor síncrono de polos salientes en MW. ....                          | 55 |
| Figura 31. Devanados de armadura y campo de un motor síncrono de polos salientes. ....                             | 56 |
| Figura 32. Polos del rotor conectado en serie del motor del molino de Bolas 1. ....                                | 57 |
| Figura 33. Sistema de anillos rozantes montados sobre el rotor – molino Sag. ....                                  | 59 |
| Figura 34. Cajas de seccionadores del motor anillo – Molino Sag. ....  | 60 |
| Figura 35. Calefactor ubicado dentro del motor síncrono. ....  | 61 |
| Figura 36. Sensores de entrehierro VM 3.1 en la marca Vibrosystem. ....  | 62 |
| Figura 37. Sensores de proximidad de un motor anillo. ....   | 63 |
| Figura 38. Diagrama de equipos de monitoreo e instrumentación del motor anillo Sag. ....                           | 64 |
| Figura 39. Motor síncrono con dos polos ....   | 66 |
| Figura 40. Circuito equivalente completo de un motor síncrono trifásico. ....                                      | 68 |
| Figura 41. Diagrama fasorial de un motor síncrono de rotor cilíndrico. ....  | 68 |
| Figura 42. Velocidad de referencia de un motor síncrono de 24 MW en el arranque. ....                              | 70 |
| Figura 43. Secuencia de energización de los devanados de un motor anillo de 24 MW. ....                            | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 44. Variación de la corriente de armadura en el proceso de arranque de un motor anillo de 24 MW. ....  | 71 |
| Figura 45. Diagrama fasorial de un motor síncrono de polos salientes. ....  | 73 |
| Figura 46. Diagrama fasorial en la operación de máximo torque por amperio. ....   | 76 |
| Figura 47. Operación de máximo torque por amperio de motor síncrono de polos lisos con el devanado de campo en condiciones de tensión y corriente limitadas. .... | 77 |
| Figura 48. Curva de capacidad de una máquina síncrona de rotor liso. ....   | 78 |
| Figura 49. Corrientes de fase en el estator de un motor anillo de 24 MW. ....   | 79 |
| Figura 50. Voltajes de fase en el estator de un motor anillo de 24 MW. ....   | 80 |
| Figura 51. Voltajes y corrientes en el estator de un motor de anillo de 24 MW. ....   | 81 |
| Figura 52. Voltajes y corrientes en el estator y rotor de un motor anillo de 24 MW. ....  | 82 |
| Figura 53. Potencias de un motor síncrono de 24 MW. ....  | 83 |
| Figura 54. Consumo de potencias de un motor síncrono de 24 MW. ....   | 84 |
| Figura 55. Potencias y factor de potencia de un motor anillo de 24 MW. ....   | 85 |
| Figura 56. Parada normal del molino Sag. ....   | 86 |
| Figura 57. Energía consumida por el motor síncrono de 24 MW del Sag en agosto 2020. ....  | 88 |
| Figura 58. Energía consumida por el motor síncrono de 24 MW del Sag en horas punta y fuera de ella, agosto 2020. ....   | 88 |
| Figura 59. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 1 en agosto 2020. ....  | 89 |
| Figura 60. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 1 en horas punta y fuera de ella, agosto 2020. ....                                       | 90 |
| Figura 61. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 2 en agosto 2020. ....  | 91 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 62. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 2 en horas punta y fuera de ella, agosto 2020. .... | 91  |
| Figura 63. Cicloconvertidor Sinamics SL 150 para motores síncronos de baja velocidad.....                                   | 105 |
| Figura 64. El tiristor SCR. ....  | 107 |
| Figura 65. Esquema de conexión de un cicloconvertidor monofásico. ....  | 108 |
| Figura 66. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico $3\phi-1\phi$ de 3 pulsos. ....                             | 108 |
| Figura 67. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico $3\phi-1\phi$ de 6 pulsos. ....                             | 109 |
| Figura 68. Representación simbólica de un cicloconvertidor trifásico de $3\phi-1\phi$ de 6 pulsos. ...                      | 109 |
| Figura 69. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico $3\phi-3\phi$ de 3 pulsos. ....                             | 110 |
| Figura 70. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico $3\phi-3\phi$ de 6 pulsos. ....                             | 111 |
| Figura 71. Esquemas de conexión de un cicloconvertidor trifásico de 12 pulsos. ....   | 112 |
| Figura 72. Esquema de conexión de un cicloconvertidor de $2*6$ pulsos, con dos tiristores en serie por rama. ....           | 114 |
| Figura 73. Esquema de conexión de un cicloconvertidor de 12 pulsos. ....  | 115 |
| Figura 74. Espectro de armónicos de corriente en el alimentador del Molino Sag. ....  | 118 |
| Figura 75. Espectro de armónicos de corriente en el alimentador del Molino de Bolas 1. ....                                 | 118 |
| Figura 76. Espectro de armónicos en el alimentador del Molino de Bolas 2. ....  | 119 |
| Figura 77. Parte del banco de filtros conectado a la barra de 33 kV de la subestación 931. ....                             | 120 |
| Figura 78. Diagrama de bloque del esquema de protección y control típico.....   | 121 |
| Figura 79. Transformación de Clarke. ....   | 124 |
| Figura 80. Transformación de ejes fijo a ejes giratorios.....   | 127 |
| Figura 81. Control vectorial típico de un motor de anillo.....  | 131 |
| Figura 82. Configuración del proyecto Molino Sag. ....  | 132 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 83. Topología de control del Sinamics SL150 .....   | 133 |
| Figura 84. Interfaz hombre-máquina de un proceso industrial.....   | 134 |
| Figura 85. Vista general del molino SAG.....   | 136 |
| Figura 86. Modos de mantenimiento del Molino.....  | 137 |
| Figura 87. Cambio de sentido de giro del molino.....   | 138 |
| Figura 88. Sistema de enfriamiento del motor de anillo – Molino Sag. ....                                | 139 |
| Figura 89. Temperatura de los descansos del molino Sag.....  | 140 |
| Figura 90. Valores del entrehierro del motor síncrono del molino Sag.....                                | 142 |
| Figura 91. Comportamiento de los valores del entrehierro en la parada del molino.....                    | 143 |
| Figura 92. Comportamiento de los valores del entrehierro en giros y cambios de velocidad. ...            | 144 |
| Figura 93. Sistema de lubricación del molino Sag. ....   | 145 |
| Figura 94. Sistema de enfriamiento del cicloconvertidor del motor síncrono – Molino Sag. ....            | 146 |
| Figura 95. Valores de temperatura de los dos devanados de armadura del motor de anillo – Molino Sag..... | 147 |
| Figura 96. Componentes del sistema de freno del molino Sag.....  | 148 |
| Figura 97. Conjunto de enfriadores usados para el molino Sag y sus auxiliares.....                       | 149 |
| Figura 98. Equipos dentro del e-house del molino Sag. ....   | 150 |
| Figura 99. Información del estado actual de las islas del molino Sag. ....                               | 151 |
| Figura 100. Símbolos usados para indicar estado o condición de un componente del sistema..               | 152 |
| Figura 101. Tendencias de velocidad, torque, potencias, peso y corriente del molino Sag. ....            | 153 |
| Figura 102. Consumo de los tres motores de anillo.....   | 155 |

**Lista de tablas**

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1 Consumo promedio en todo Antapaccay, agosto del 2020.....                        | 9   |
| Tabla 2 Principales datos técnicos del molino Sag. ....                                  | 27  |
| Tabla 3 Datos técnicos de los molinos de bolas .....                                     | 28  |
| Tabla 4 Datos del banco de transformadores correspondientes a cada molino. ....          | 38  |
| Tabla 5 Grupo de funciones técnicas .....  | 51  |
| Tabla 6 Datos del motor de anillo del molino Sag.....                                    | 58  |
| Tabla 7 Datos técnicos del motor de anillo de los molinos de Bolas .....                 | 58  |
| Tabla 8 Datos de placa de los ventiladores del motor de anillo de los tres molinos. .... | 65  |
| Tabla 9 Consumo de energía del molino Sag. ....  | 87  |
| Tabla 10 Consumo de energía Molino de Bolas.....   | 89  |
| Tabla 11 Consumo de energía y máxima demanda. ....                                       | 90  |
| Tabla 12 Armónicos de corriente en los alimentadores de los tres molinos.....            | 117 |
| Tabla 13 Resumen de valores de entrehierro de operación, alarma y disparo.....           | 141 |

## Glosario de abreviaturas

GMD: Gearless Mill Drive

SAG : Semi- Autógeno

TMF : Toneladas Métricas Finas.

EAHP: Energía Activa en Hora Punta.

EAHFP: Energía Activa Fuera de Hora Punta.

ER: Energía Reactiva.

MD: Máxima Demanda.

PBI: Producto Bruto Interno.

MINEM: Ministerio de Energía y de Minas.

SEIN : Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

OxI: Obras por Impuestos.

GIS : Gas Insulated substation.

E-HOUSE: Electrical House.

COES : Comité de Operación Económica del Sistema.

PLC: Programmable Logic Controller.

CU: Control Unit

ET200: Sistema de entradas y salidas descentralizado.

S.E. : Subestación Eléctrica.

THD: Total Harmonic Distortion.

WinnCC: Windows Control Center.

CSt: Centistoke

MLCP: Mill Local Control Panel.

DCS: Distributed Control System.

RTDs: Resistance Temperature Detectors.

ESR: Empresa Socialmente Responsable.

COVID-19: Enfermedad respiratoria muy contagiosa.

SRC: Silicon Controlled Rectifier.

RTC: Reglas de Tolerancia Cero.



# *Capítulo I. Aspectos generales*



Figura 1. Planta concentradora moderna de Antapaccay.

Fuente: [1]

## 1.1 Introducción

El Perú posee un alto potencial geológico que le permite sobresalir en el ranking mundial de producción y reservas mineras, así como en la gestión de nuevos proyectos de exploración y construcción de minas, las cuales se traducen en ingreso de divisas a través de las exportaciones e inversiones mineras. De este modo, la minería es uno de los principales pilares de la estabilidad macroeconómica peruana, prueba de ello es su contribución de 8.8% del Producto Bruto Interno (PBI), 12.7% de la inversión privada total y representando el 61.9% de las exportaciones nacionales en el año 2020, según [2].

Estos son razones suficientes para el desarrollo del presente informe técnico que se enmarca dentro de las funciones asignadas como responsable encargado del área de Electricidad Gearless, desde el año 2017 al 2022, dentro de la superintendencia de Electricidad y Gerencia de Mantenimiento Planta de la Compañía Minera Antapaccay S.A.

Específicamente el informe técnico da a conocer la aplicación del motor síncrono como elemento accionador de un molino tubular sin engranajes, dentro del proceso de molienda, en la Compañía Minera Antapaccay S.A.

El informe está dividido en 6 capítulos, donde en cada uno se detalla los aspectos más relevantes, aquellos que apuntan con los objetivos del presente informe.

En el primero se describe a la Compañía minera Antapaccay S.A., el organigrama de la organización y la ubicación dentro del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), así como el sistema eléctrico de la operación minera.

En el segundo capítulo se describe el proceso de molienda y el impacto que se tuvo en la producción de cobre a causa de la pandemia.



En el tercero, se describe a las gigantescas maquina moledoras de mineral chancado, el sistema sin engranajes y operación.

En el cuarto se detalla el accionamiento del molino que involucra describir al motor síncrono trifásico, sus partes, principio de funcionamiento y comportamiento general. También se incluye un listado de los principales trabajos de mantenimiento.

En el penúltimo capítulo se presenta al cicloconvertidor, sus características, compensación y esquema de protección. Y en el sexto capítulo se describe el interfaz hombre máquina, como medio de monitoreo y control de los tres molinos.

Se adjunta como anexos datos técnicos de los equipos, procedimientos y registros de mantenimiento usados en las actividades cotidianas.

## **1.2 Descripción de la empresa**

Antapaccay, es una operación minera de cobre perteneciente al Grupo Glencore desde 2013. Nace como operación en noviembre de 2012, luego de varios años de inversión en exploración con el propósito de extender la vida de la mina Tintaya. Esta operación permite seguir contribuyendo con el desarrollo sostenible de la provincia de Espinar, pues además de fomentar la creación de fuentes de trabajo directo e indirecto e impulsar la economía de la zona mediante compras a empresas locales, también invierte en proyectos sociales dirigidos a las comunidades de su área de influencia.

La construcción de la planta de procesos se inició en septiembre del 2010 con un presupuesto cercano a los 1500 millones de dólares e inicio sus operaciones en noviembre del 2012. Durante el periodo de construcción

En octubre se inicia con la puesta en marcha y el 18 de octubre del 2012 se prueba del circuito con material desde la pila de gruesos hasta la disposición de relaves.

El 15 de noviembre se inicia el incremento de capacidad de la puesta en marcha.

El 9 de diciembre se envía el primer camión de concentrado al puerto de Matarani. Y el 24 de diciembre se llega la capacidad de diseño del molino Sag, así llegando rápidamente al nivel de producción para la cual fue diseñada dicha planta es de esta forma que se convierte en uno de los arranques de operación minera más exitosos de los últimos 15 años en nuestro país y Sudamérica.

Actualmente a junio del 2021, Compañía Minera Antapaccay S.A. ocupa el sexto lugar con 84068 Toneladas Métricas Finas (TMF) en producción de cobre, así lo señala el Ministerio de Energía y Minas (ver anexo 2 de [2]).

Por otro lado, a fin de generar rentabilidad social en beneficio de sus áreas de influencia, la empresa minera Antapaccay actualmente cuenta con tres mecanismos de inversión, con participación activa de las autoridades y representantes de las comunidades, según [3]:

- El Convenio Marco, a través del cual ha aportado el 3% de las utilidades de la compañía en proyectos para la provincia de Espinar y sus ocho distritos. Desde su ejecución hasta la fecha, se han destinado S/ 420 millones en 1,058 proyectos.
- Convenios y acuerdos directos suscritos con las comunidades del área de influencia directa. Solo en el año 2020, la empresa logró invertir más de S/ 25 millones en proyectos con distintos fines sociales.
- Obras por Impuestos (OxI), se ha coordinado con el Gobierno nacional, regional y local para destinar S/ 32.6 millones en la ejecución de más proyectos.

Compañía Minea Antapaccay S.A. el 12 de abril del 2021, se convirtió en la primera empresa minera en recibir la certificación de “Great Place to Work®” por parte de Great Place to Work® Perú, por las experiencias positivas reconocidas por sus trabajadores, señala [4]. Los resultados provinieron de una encuesta de clima laboral, que contó con la participación del 89%

de sus trabajadores. La encuesta de clima laboral midió los siguientes aspectos: liderazgo, calidad de vida, capacitaciones, seguridad, trabajo en equipo, familiaridad, reputación, trato justo y comunicación, entre otros puntos.

### 1.2.1 Datos de la empresa

El asentamiento minero se encuentra ubicado en la provincia de Espinar, región Cusco, a 4.100 metros sobre el nivel del mar.

- Dirección legal: Campamento Minero Tintaya Nro. Sn Campamento Minero Tintaya (Km.5 Yauri Carretera Cusco - Arequipa)
- Distrito: Espinar.
- Provincia: Espinar.
- Región: Cusco.
- Teléfono: (084) 301150

En la figura siguiente se muestra la ubicación de la planta de procesamiento de mineral Antapaccay en el corredor minero.



Figura 2. Ubicación de la planta concentradora de Antapaccay.

Fuente: <https://www.convencionminera.com/perumin31/encuentros/topmining/jueves19/1630-luis-rivera.pdf>

## ***1.2.2 Valores Corporativos de la Compañía Minera Antapaccay S.A.***

### ***1.2.2.1 Seguridad***

Es el valor que representa nuestra máxima prioridad. Nos cuidamos unos a otros y si el trabajo no es seguro, se procede a detenerlo.

### ***1.2.2.2 Integridad***

Tenemos la valentía para hacer lo correcto, cumplimos nuestra palabra y nos tratamos de manera justa y respetuosa.

### ***1.2.2.3 Responsabilidad***

Asumimos la responsabilidad de nuestras acciones, hablamos y escuchamos a los demás para entender lo que esperan de nosotros.

Trabajamos para mejorar nuestro desempeño comercial, social y medioambiental.

### ***1.2.2.4 Transparencia***

Somos honestos y directos cuando nos comunicamos.

Nos esforzamos para mejorar, compartiendo información y fomentando el dialogo y la retroalimentación constructiva.

### ***1.2.2.5 Simplicidad***

Trabajamos de manera eficiente y nos enfocamos en lo más importante.

Buscamos evitar la complejidad innecesaria y buscamos soluciones sencillas y pragmáticas.

### ***1.2.2.6 Espíritu empresarial***

Fomentamos las ideas nuevas y nos adaptamos rápidamente al cambio. Siempre buscamos nuevas oportunidades para crear valor, al igual que formas para trabajar mejor y de manera más segura.

### **1.3 Sistema eléctrico en la planta concentradora Antapaccay**

Compañía Minera Antapaccay S.A. tienen como proveedor de energía a la central termoeléctrica de Kallpa Generación S.A., actualmente la termoeléctrica más grande del país, con una capacidad de 870 MW.

Las instalaciones de Antapaccay, son alimentadas por el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en doble terna 220 kV (L-2020 y L-2021) de la doble barra de la S.E. Tintaya Nueva 220 kV, la misma que es administrado por el Comité de Operación Económica del Sistema (COES).

La energía llega a la Subestación Antapaccay 220/33 kV, que es del tipo; subestación aislada de gas (GIS), de donde se alimenta a los diferentes puntos de la planta concentradora y operaciones mina. En la Figura 3 se muestra el diagrama unifilar simplificado:

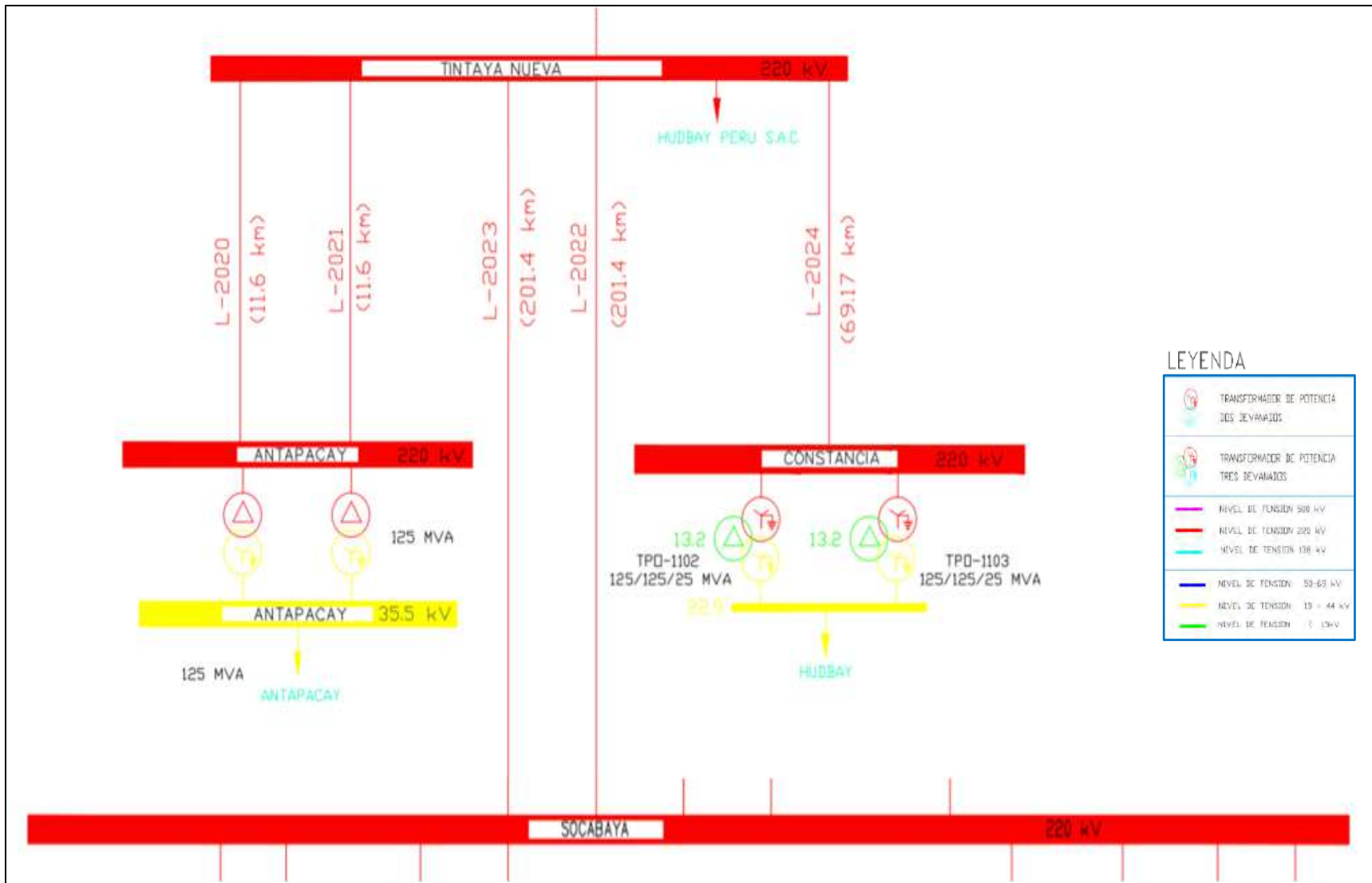


Figura 3. Ubicación de la subestación eléctrica de Antapacay en el unifilar del SEIN.

Fuente: Adaptado de [22]

En la gestión de energía, el consumo promedio en todo Antapaccay es:

Tabla 1  
*Consumo promedio en todo Antapaccay, agosto del 2020.*

| <b>Sistema</b>                    | <b>Consumo</b>  |
|-----------------------------------|-----------------|
| Molino Sag                        | 19.64 MW        |
| Molino de Bolas 1                 | 15.96 MW        |
| Molino de Bolas 2                 | 15.90 MW        |
| Chancado primario                 | 0.566 MW        |
| Trasporte de mineral              | 5.500 MW        |
| Loop de palas y perforadoras      | 3.790 MW        |
| Loop de watering                  | 5.908 MW        |
| Bombeo agua fresca planta proceso | 2.010 MW        |
| Otros circuitos                   | 24.08 MW        |
| <b>Total, Antapaccay</b>          | <b>93.36 MW</b> |

Datos obtenidos del consumo de energía.

Ahora, más el consumo promedio de todo Tintaya de 20.30 MW, se tiene un consumo total de 113.66 MW.

### **1.3.1 Ubicación de las salas eléctricas.**

Por la ubicación de los diferentes puntos del proceso, es necesario llevar la energía eléctrica por líneas de transmisión en 33kV desde la subestación de Antapaccay hacia los siguientes puntos:

- Chancador primario (Área 210)
- Loop de mina (Área 110)
- Faja transportadora (Área 220)
- Planta de filtrado (Área 420)
- Espesamiento de Relaves (Área 510)
- Loop de waternig (Área 550)

Para el resto de las áreas, la energía se transmite por medio de cables en 33 kV, por la cercanía a la subestación principal.

En cada área existe una subestación, donde se reduce el nivel de tensión de 33 kV a 4.16 kV para motores de media tensión y 0.480 kV para motores de baja tensión y cargas auxiliares como el alumbrado.

- Molienda (Área 310)
- Chancador Pebbels (Área 320)
- Flotación (Área 330)
- Planta de Cal (Área 391)
- Planta de Reactivos (Área 340)

Para el caso de los molinos, la energía proveniente de la subestación principal en 33 kV se entrega directamente a los bancos de tres transformadores de potencia de cada molino, de allí se alimentan los cicloconvertidores para finalmente llegar a los motores síncronos de los molinos.

En la figura siguiente se muestra la ubicación de las áreas mencionadas.



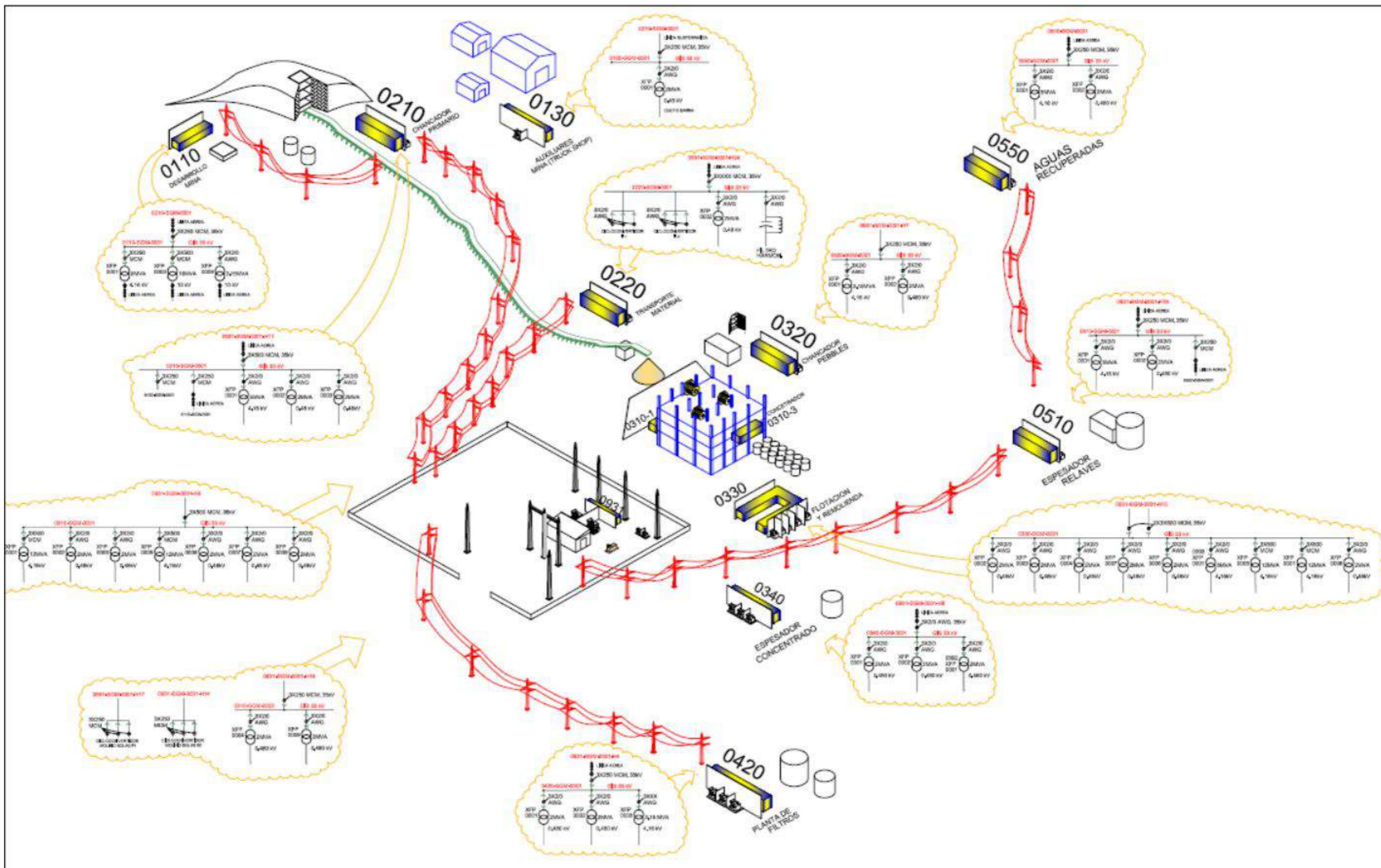


Figura 4. Disposición de las salas eléctricas en los diferentes puntos del proceso.

Fuente: [5]

## 1.4 Estructura organizacional

La estructura organizacional de Antapaccay es del tipo vertical, cuenta con gerencias de diferentes áreas estratégicas y sus respectivas superintendencias. El campo de acción a la que refiere el desarrollo del presente informe, pertenece a la Gerencia de Mantenimiento Planta, en donde la Superintendencia de Mantenimiento Eléctrico Planta, presta su atención a los equipos de la Planta de Procesos de Tintaya y Antapaccay.

### 1.4.1 *Visión de la gerencia de mantenimiento*

Proveer servicios de mantenimiento de clase mundial con resultados sostenibles y predecibles.

### 1.4.2 *Misión de la gerencia de mantenimiento*

Proveer servicios de mantenimiento, clave, para el cumplimiento de los planes de producción. Entendemos y atendemos las necesidades de nuestros clientes, administramos responsablemente nuestros recursos y desarrollamos a nuestros colaboradores.

A continuación, la estructura organizacional tipo vertical de la gerencia de mantenimiento:

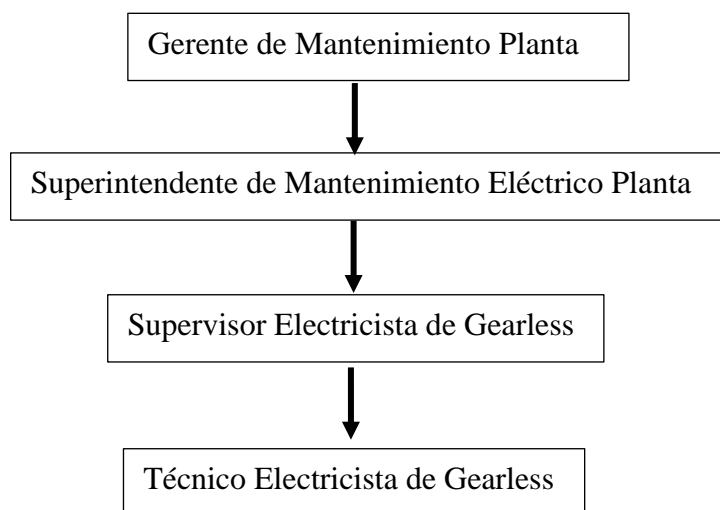


Figura 5. Los cuatro niveles en la dirección de la Gerencia de Mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia

## 1.5 Funciones del puesto de trabajo

Dentro de las funciones asignadas como mantenedor del área de Gearless son:

- Inspección, registro de parámetros y variables de operación de todos los componentes del sistema GMD.
- Análisis de tendencias de las principales variables de operación (señales analógicas y digitales) con la finalidad de cuidar su correcta y eficiente utilización.
- Estudio y/o diagnóstico de fallos del sistema, y generación de planes de acción para la corrección de los mismos.
- Coordinación con las áreas involucradas para el mantenimiento del componente afectado.
- Liderar trabajos de mantenimiento cumpliendo las normas de seguridad eléctrica.
- Búsqueda constante de oportunidades de mejora que permitan aumentar la disponibilidad del sistema o reducir los costos de mantenimiento.

## 1.6 Objetivo general

Describir la utilización de motores de anillo de 24 y 16,4 MW, accionados por convertidores Sinamics SL150, en molinos tubulares sin engranajes de 40'x25' y 26'x40.5' respectivamente en el proceso de molienda.

### 1.6.1 *Objetivos específicos*

- Conocer a Compañía Minera Antapaccay S.A.
- Describir el sistema de accionamiento sin engranajes en la etapa de molienda y su importancia en la de producción de cobre.
- Identificar las principales características de los molinos sin engranajes en Compañía Minera Antapaccay S.A.

- Analizar el comportamiento del motor síncrono en molinos tubulares sin engranajes con el apoyo del IbaAnalyzer de Siemens.
- Identificar las principales características de un convertidor Sinamics SL150.
- Analizar las tendencias proporcionadas por el SIMATIC WinCC flexible.

### **1.7 Alcances del informe**

El informe comprende la descripción de los molinos, motores anillo, los convertidores, operación y mantenimiento del sistema formado por los equipos mencionados. Así mismo contiene procedimientos, formatos y registros, propios de la operación y mantenimiento del sistema, que fueron parte de las actividades profesionales asignadas a mi cargo.

### **1.8 Limitaciones del informe**

Los siguientes puntos quedan fuera de la exposición del presente informe:

- Las variables de la operación de los molinos (carga del mineral, carga moledora, alimentación de agua, etc)
- Los cálculos y análisis de sistemas eléctricos de potencia involucrado (estudio de flujo de potencia, coordinación de protecciones, cortocircuito, estabilidad, etc)
- Detalle de los sistemas auxiliares de los molinos sin engranaje. Se mencionan únicamente por que van incluidas dentro del sistema

## *Capítulo II. El Proceso de Molienda*



Figura 6. Molinos de bolas 1 y 2 en la etapa de molienda.

Fuente: [6]

## **2.1 Introducción**

El desarrollo de la tecnología permite la tendencia hacia circuitos de gran productividad con empleo de molinos SAG (semiautógenos). La alta eficiencia y disponibilidad característica de un molino SAG, lo convierte en el elemento más importante dentro del circuito de potencia.

La principal ventaja es la disponibilidad mecánica de tratar un amplio rango de tipos de minerales concentrados, incluyendo alimentaciones arcillosas o pegajosas y los costos de operación son bajos en comparación a la mayoría de circuitos tradicionales de molienda.

## **2.2 Diagrama general del flujo de explotación y del proceso**

### **2.2.1 Explotación**

El método de explotación de mina a tajo abierto consta principalmente de las siguientes operaciones: perforación, tronadura, carguío, transporte y chancado del mineral.

En Antapaccay los trabajos de extracción comienzan a desarrollarse fragmentando el terreno con voladuras debidamente planeadas y ejecutadas por técnicos especializados quienes siguen las más estrictas medidas de seguridad. El carguío del material fragmentado con valores promedios entre 40 y 50 cm, es realizado por grandes 4 palas electro-mecánicas y el transporte de minerales y desmonte se hace con 52 camiones de alto tonelaje a la chancadora, stock y botaderos. El mineral sulfurado es transportado hasta el chancador primario, el mineral de baja ley hacia sitios de stock para ser usado en proyectos futuros y el lastre hacia los botaderos a los costados de la mina.

En la chancadora, el mineral es reducido a 7", para posteriormente ser extraído de la mina, mediante una faja transportadora tipo Overland de 6528 m de longitud, hacia la planta de procesos Antapaccay.

La figura siguiente, ilustra una faja transportadora típica.



Figura 7. Faja transportadora Overland alimentando a la ruma de gruesos.

Fuente: [5].

### ***2.2.2 Procesamiento de Sulfuros***

El mineral sulfurado proveniente de la mina, se acumula formando la ruma de gruesos, para su posterior ingreso a la planta concentradora a la sección de molienda. En la etapa de molienda conformada por un molino Sag y dos de Bolas, el mineral es reducido y clasificado en baterías de ciclones, siendo los valores promedio:

- Granulometría de ingreso: 3 pulgadas.
- Granulometría de salida: 0.3 mm

En seguida todo el material menor a 0.3 mm, pasará a la siguiente etapa del proceso, llamado flotación y mayores a este valor, serán dirigidos hacia los molinos de Bolas.

El objetivo de la etapa de flotación es clasificar pulpa de concentrado de cobre del relave. Es aquí donde el relave se dirige al área 510 para ser tratado, mientras que la pulpa de concentrado se dirige al área 420 para ser filtrado y enviado al puerto.



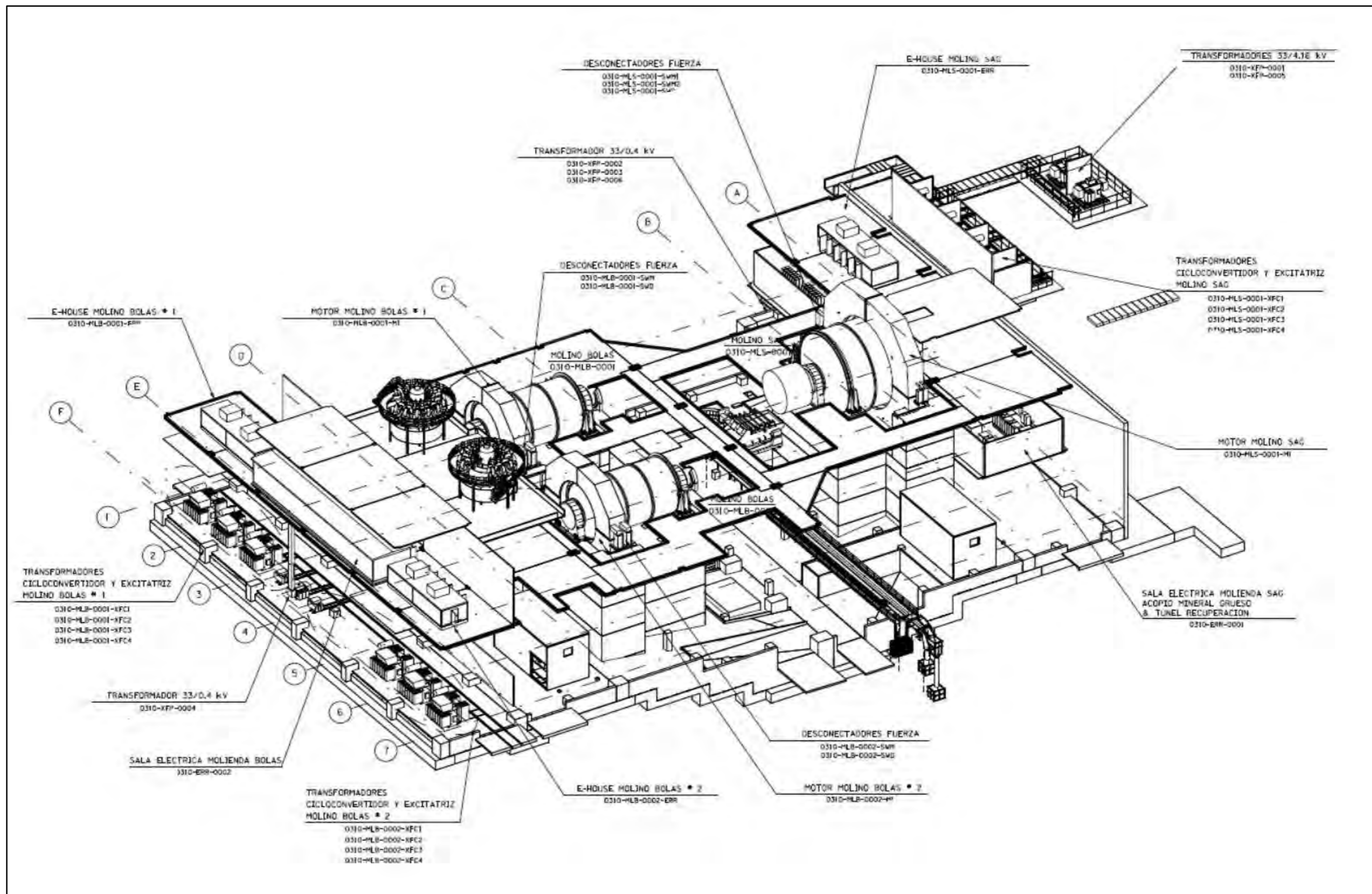


Figura 8. Molino Sag, molinos de Bolas 1 y 2.

Fuente: [5]

### 2.2.3 Molienda primaria

Conformada por el molino SAG, es donde el mineral se recibe directamente desde el chancador primario con un tamaño promedio de 3 pulgadas y se mezcla con agua y cal. Este material es reducido gracias a la acción del mismo material mineralizado presente en partículas de variados tamaños y por la acción de numerosas bolas de acero de 5 pulgadas de diámetro, que ocupan entre el 18 y 19% de su capacidad. En los molinos SAG el mineral es reducido de tamaño por impacto, fricción y cizalla.

El material permanece dentro del molino, hasta que el tamaño sea lo suficientemente pequeño para pasar a través de las parrillas del sistema de descarga. La clasificación de la descarga del molino se realiza usando un trómel y la zaranda.

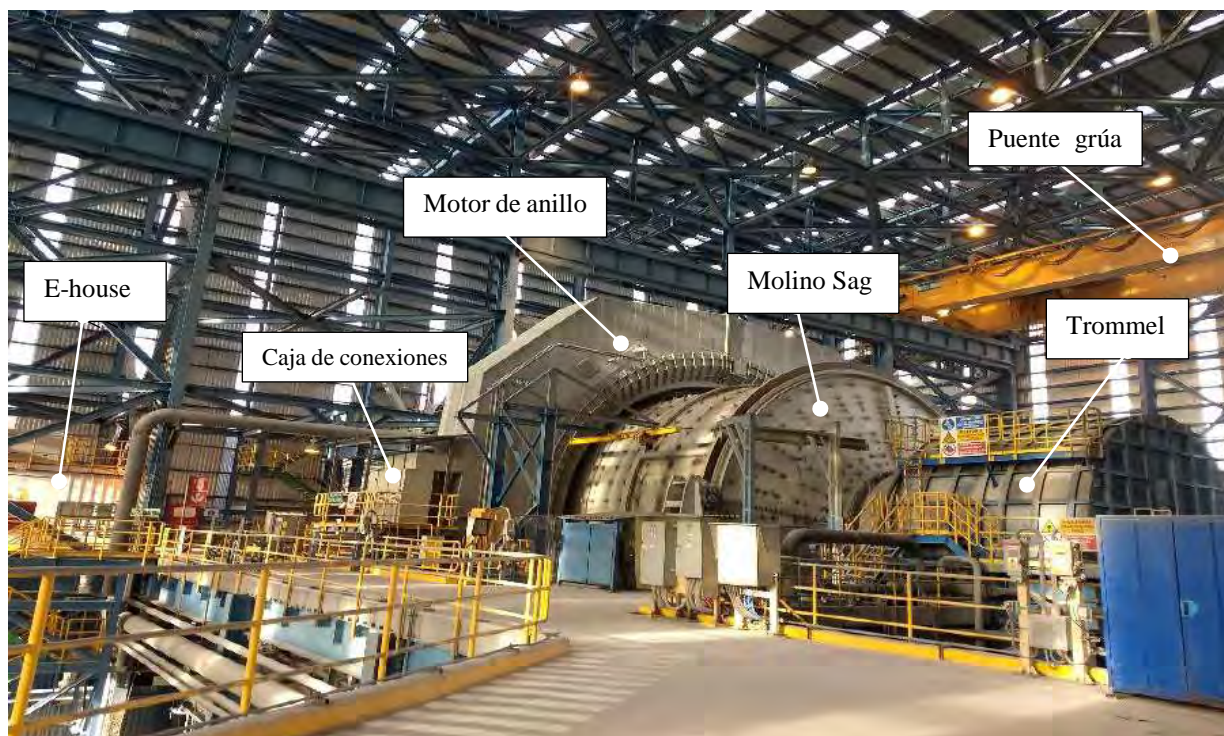


Figura 9. Molino SAG de 40'x25'

Fuente: [5]

### 2.2.4 Molienda secundaria

Conformada por los molinos de bolas, los mismos que reducen el mineral proveniente de la bandeja del underflow de la batería de ciclones, mayores a 0.3 mm.

En este tipo de molinos el mineral es reducido de tamaño por fricción y cizalla y los medios de molienda (bolas), se llenan aproximadamente entre el 30 y 35% del volumen del molino.

La carga de la pulpa (agua y mineral) aumenta el volumen hasta que esta rebosa a través del muñón de descarga, este tipo de molinos no llevan parillas como es el caso del molino SAG.

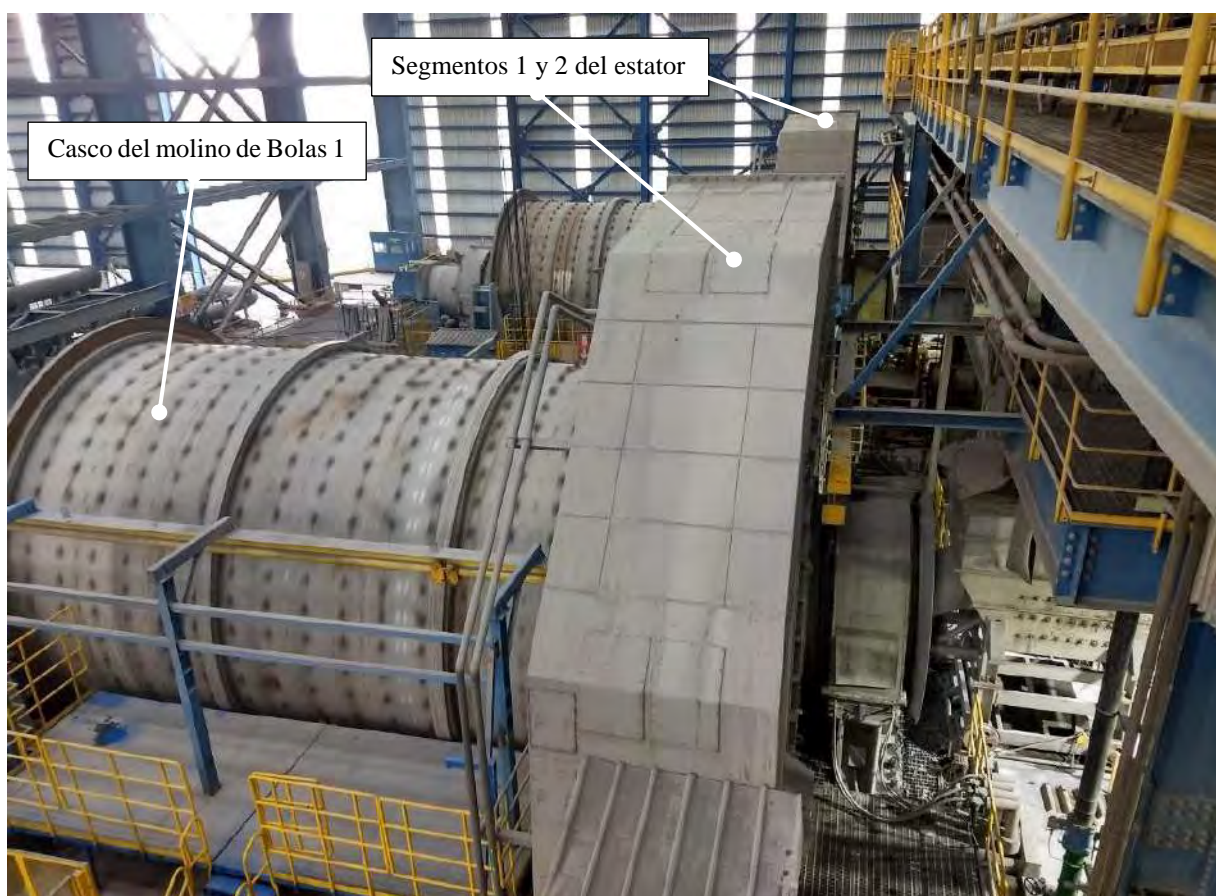


Figura 10. Molinos de Bolas de 26'x40.5' en funcionamiento.

Fuente: [5]

### **2.3 Producción minera metálica en el contexto de la pandemia**

En el Perú, se tiene tres principales productos minero-metálicos (cobre, oro y zinc), siendo el cobre el principal metal que exporta nuestro país, según el Ministerio de Energía y de Minas (MINEM).

Es de vital importancia realizar el análisis del subsector minero, en la producción de cobre en un contexto de pandemia, donde se tuvo múltiples acontecimientos originados por la crisis sanitaria mundial, en el caso particular del cobre, se tiene que:

En el año 2019, la producción de cobre subió cada trimestre, llegando al final del año, a 2.5 millones de toneladas métricas finas (TMF). Este resultado se debió a la ampliación de la unidad minera Acumulación Toquepala 1 de Southern Peru Copper Corporation, señala [2].

Para el año 2020, la producción de cobre se vio afectado por el confinamiento social y las restricciones sanitarias implementadas por gobierno central para contener la pandemia, las empresas mineras a nivel nacional solo estaban autorizadas para realizar actividades críticas con personal mínimo operativo entre los meses marzo y abril 2020, con la finalidad de evitar la propagación del virus y mantener las instalaciones preparadas para el reinicio de las actividades normales. Debido a lo anterior el segundo trimestre fue el más afectado. Sin embargo, gracias a las disposiciones de reactivación económica por fases, se tuvo un crecimiento en producción sostenida en los dos últimos semestres.

En el año 2021, la producción cuprífera sigue la senda de recuperación trimestral, si se compara con la tendencia del año 2020, todavía existe una brecha por cerrar. Precisamente la puesta en marcha de la Mina Justa, permitiría lograr este objetivo.

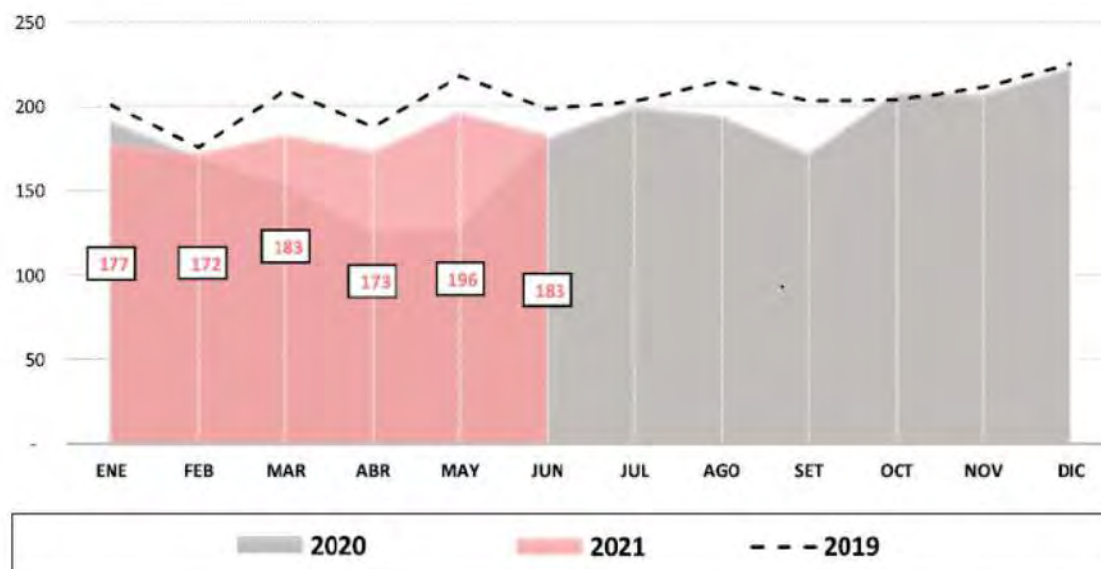


Figura 11. Producción de cobre (miles de TMF)

Fuente: [2]

## 2.4 Cotización del cobre

En la actualidad, el metal rojo es muy buscado debido a su infinidad de aplicaciones, y es de alta cotización en los mercados mundiales, por lo tanto, sus principales demandantes, son los países como China, Japón, etc.

Como en el caso de otros metales, el precio del cobre, es fijado en Inglaterra, específicamente por la Bolsa de Metales de Londres (LME), siendo la que da razón de su precio de lunes a viernes, una vez al día.

En la Figura 12. Variación del precio del cobre en un periodo de dos años. se observa que, a lo largo del año 2021, el precio del cobre fue mayor que el 2020. Por ejemplo, el 10 de mayo del 2021 alcanzo su valor pico de 10720 dólares la tonelada.

En general las variaciones interanuales en el precio del cobre continúan al alza, a medida que las economías industrializadas se vienen recuperando de los efectos del Covid-19, añade [2].



Figura 12. Variación del precio del cobre en un periodo de dos años.

Fuente: [7], Fecha de consulta: 11 de enero 2022.

## *Capítulo III. Molinos sin Engranaje*



Figura 13. Molino Semi-Autógeno (SAG) sin engranajes.

Fuente: [8]

### **3.1 Introducción**

A finales de los años sesenta surgió la idea de desarrollar un accionamiento que prescindiera de engranajes y que permita además la posibilidad de un control de velocidad variable. La aparición de los tiristores y de sofisticados sistemas de control permitieron el diseño de un accionamiento libre de engranajes (gearless mill drive) acompañado de un cicloconvertidor y de un motor síncrono.

El primer GMD en el mundo para una molienda de cobre semiautógena SAG fue instalado en la división Chuquicamata de CODELCO, Chile. Instalados en 1986 por Siemens (se instalaron 2 molinos iguales), poseen una potencia nominal de 8,210 kW cada uno y permiten la operación del molino entre 8.19 rpm y 10.92 rpm, con una capacidad de molienda que asciende a 1,157 t/h cada uno. El motor de cada uno de los molinos es síncrono con doble devanado de estator, operando con 97% de eficiencia. Este accionamiento fue además el primero en emplear un cicloconvertidor libre de fusibles y equipado con tiristores refrigerados con agua. Fue pionero también en emplear un Containerised Electric Package (E-House) en lugar de la tradicional sala eléctrica. En él se incorporó todo el equipamiento relacionado con el cicloconvertidor, el gabinete de excitación, el sistema de baterías, el sistema de control del motor, las protecciones y los PLC's.

### **3.2 Aspectos básicos de los molinos sin engranaje**

En los molinos gearless, el casco del molino es el elemento rotatorio de un gran motor sincrónico de baja velocidad. Los polos del rotor del motor se encuentran adosados en la brida del molino y finalmente el rotor es rodeado por un estator. A continuación, se detalla los componentes externos e internos de este tipo de molinos.



### 3.3 Molino Sag y Bolas en Antapaccay

El molino SAG, es el equipo de mayor dimensión de la planta concentradora con 12.19 m (40 ft)x7.62 m (25 ft), este equipo sustituye a los circuitos de chancado secundario y terciario. Mientras que los molinos de bolas son de 7.93 m (26 ft)x12.34 m (40.5 ft) y forma parte de la molienda secundaria.

#### 3.3.1 Datos técnicos del molino Sag

A continuación, se muestra los principales datos técnicos del molino SAG instalado en el concentrador de Antapaccay:

Tabla 2

*Principales datos técnicos del molino Sag.*

| <b>Identificación</b>               | <b>0310-MLS-0001</b>                               |
|-------------------------------------|--|
| Fabricante                          | FLSmith  |
| Tipo de molienda                    | Húmeda y descarga por parrilla.                    |
| Dimensiones                         | 40 pies (12.19 m) por 25 pies (7.62 m)             |
| Capacidad                           | 3404 a 4076 t/h                                    |
| Potencia del motor del anillo       | 24 MW a 9.04 rpm.                                  |
| Tipo de transmisión                 | Sin engranaje.                                     |
| Volumen de carga de bolsas          | 25 a 30% del volumen del total del molino          |
| Diámetro de bolsas                  | 5 pulgadas   |
| Velocidad.                          | Bidireccional a 9.02 rpm                           |
| Diámetro interno del muñón.         | 3.39 m   |
| Tipo de chumacera.                  | Multipad hidrostático, cuatro pads por rodamiento. |
| Diámetro interno de la chumacera    | 4.060 m  |
| Espesor de la chumacera             | 0.90 m   |
| Material de la chumacera.           | Bronce.  |
| Tipo de Lubricación del rodamiento. | Hidrostático.                                      |
| Tipo de aceite                      | ISO 220 (240 cSt a 37°C)                           |

*Nota.* Datos suministrados por el fabricante.

### 3.3.2 Datos técnicos de los molinos de Bolas

Tabla 3  
*Datos técnicos de los molinos de bolas*

| <b>Identificación</b>              | <b>0310-MLB-0001/0310-MLB-0002</b>                |
|------------------------------------|---|
| Fabricante                         | FLSmith   |
| Tipo de molienda                   | Humeda y descarga por rebose.                     |
| Dimensiones                        | 26 pies (7.93 m) por 40.5 pies (12.34 m)          |
| Potencia del motor de anillo       | 16.4 MW   |
| Tipo de transmisión                | Sin engranaje                                     |
| Volumen de carga de bolsas         | 35% del volumen del total del molino              |
| Diámetro de las bolsas             | 3 pulgadas  |
| Velocidad                          | 11.37 rpm   |
| Tipo de rodamiento                 | Multipad hidrostática, cuatro pads por rodamiento |
| Material de rodamiento             | Bronce  |
| Tipo de lubricación del rodamiento | Hidrostático                                      |

*Nota.* Datos suministrados por el fabricante.

### 3.4 Principales componentes del molino gearless

Las piezas fundamentales de un molino son: casco, chaquetas o revestimientos, parrillas o rejillas de descarga, cuerpos trituradores, dispositivos de carga y de descarga y el accionamiento o mando del molino.

En las figuras siguientes se aprecia cada componente de los dos tipos de molinos que se tiene en la operación minera.

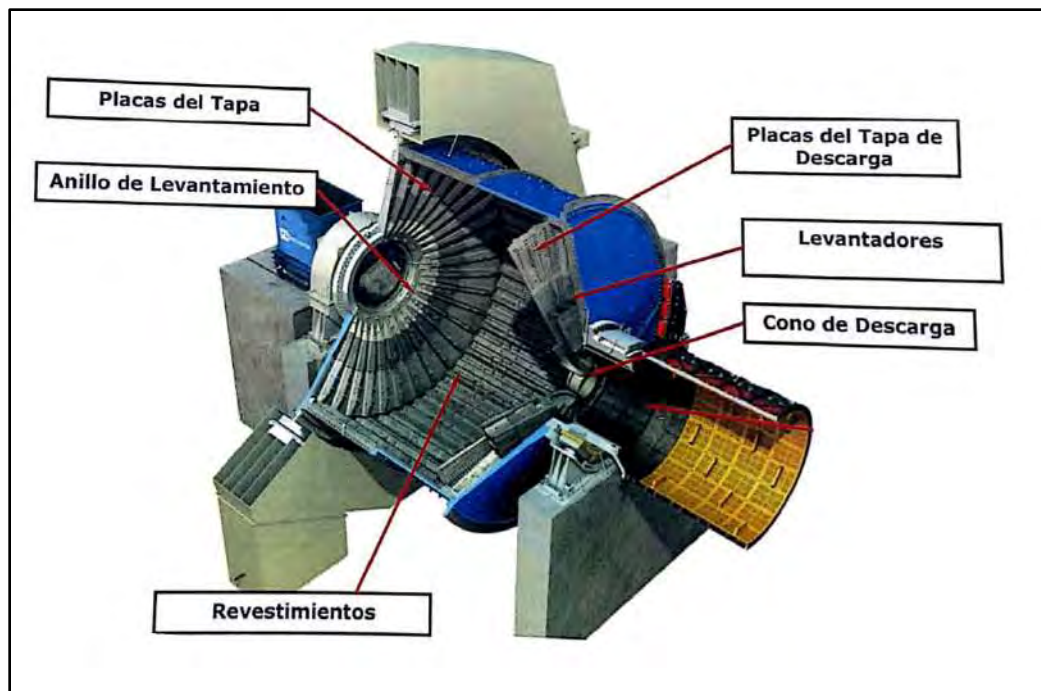


Figura 14. Componentes internos del Molino Sag.

Fuente: Manual de molinos FLSmith

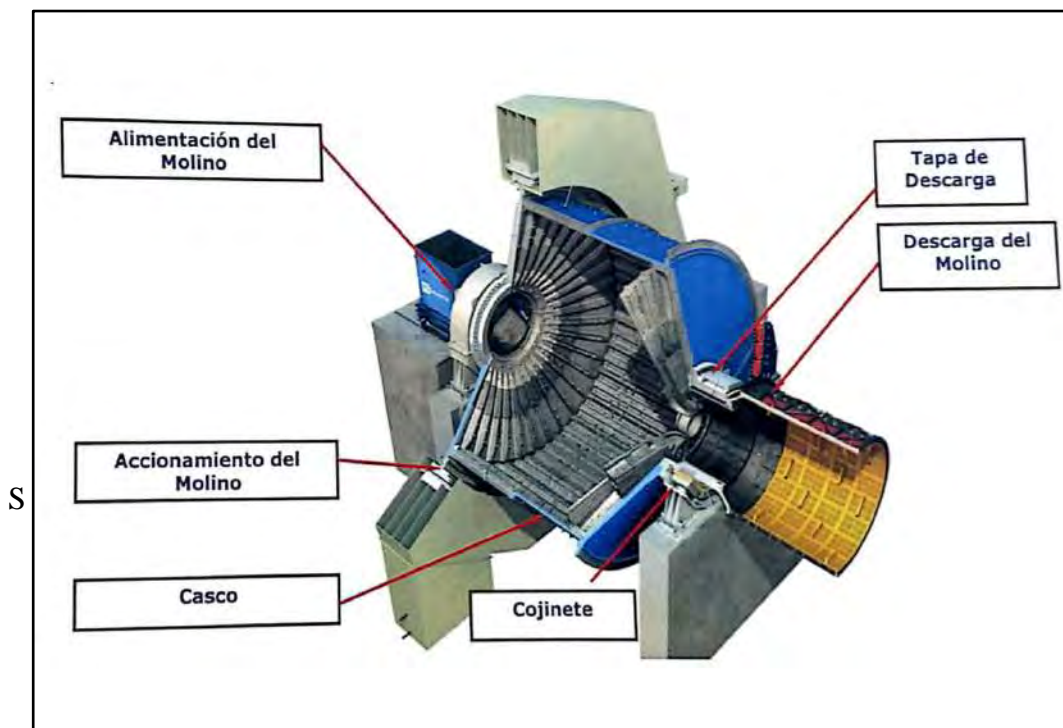


Figura 15. Componentes externos del Molino Sag.

Fuente: Manual de molinos FLSmith

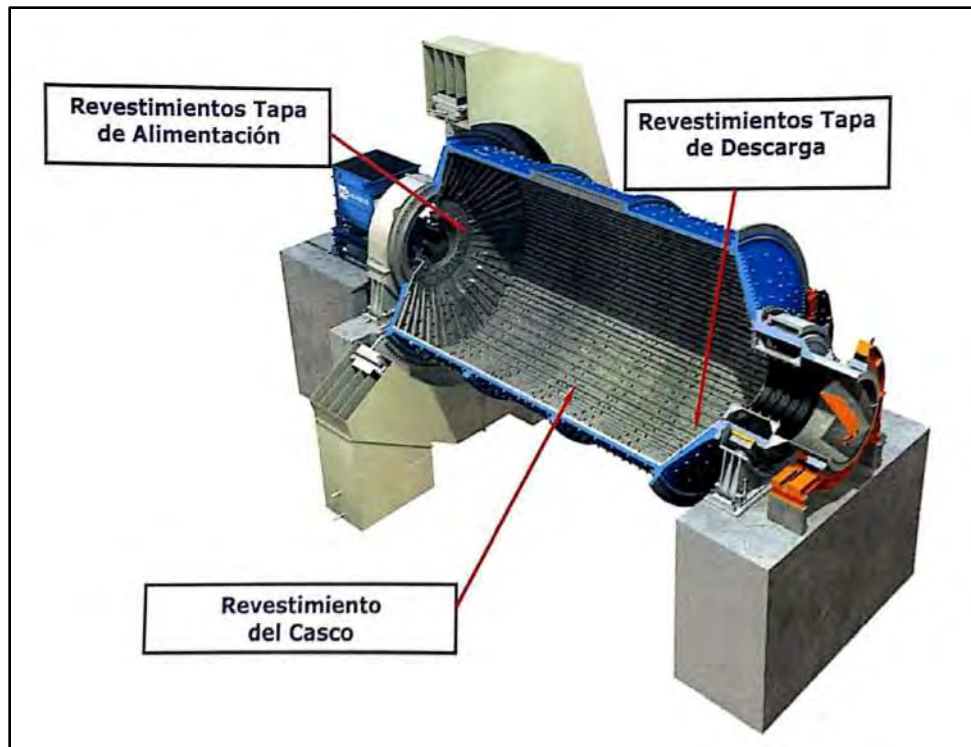


Figura 16. Componentes internos de un molino de bolas

Fuente: Manual de molinos FLSmith

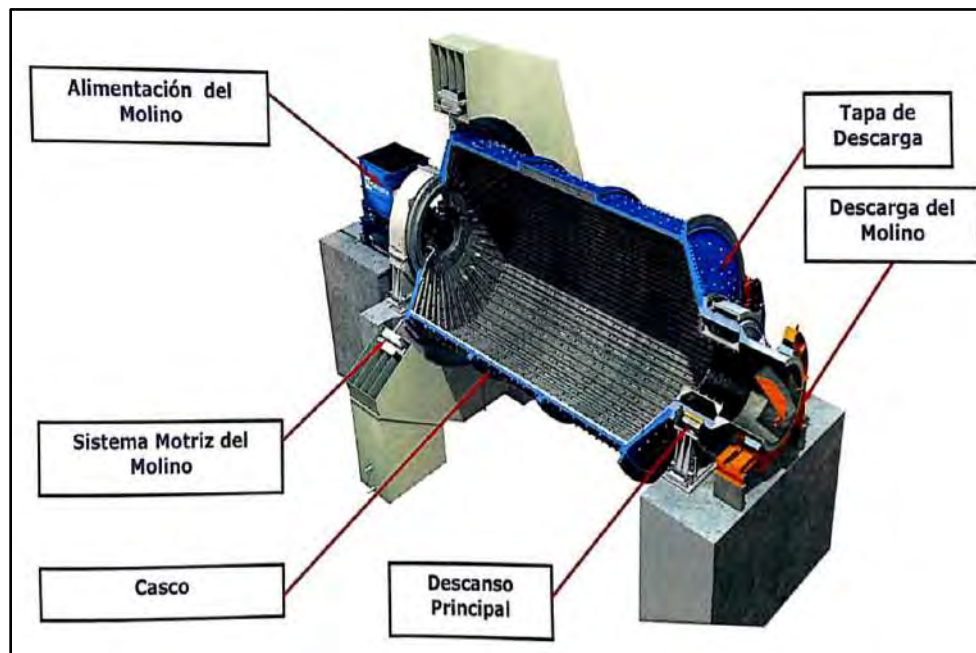


Figura 17. Componentes externos de un Molino de Bolas.

Fuente: Manual de molinos FLSmith

### **3.4.1 Casco del molino**

El casco del molino consta de varias secciones de planchas de acero soldadas y/o apernadas para la operación diseñada. El espesor depende de la carga de bolas y del mineral que se desea moler, y también del grado de debilitamiento del casco por los huecos que se perforan y que son practicados por el taladro para la fijación por medio de pernos el revestimiento. Actualmente el casco de los molinos está instalado sobre dos chumaceras o dos cojinetes macizos esféricos.

### **3.4.2 Tapas del molino**

En los extremos del casco se sueldan anillos de hierro o de acero fundido para la fijación de las tapas del cilindro del molino mediante pernos.

En el casco se abre aberturas con tapa llamadas manhole para poder realizar la carga y descarga de las bolas, inspección y reemplazo de los revestimientos.

### **3.4.3 Descansos del molino**

Es la parte que soporta el peso bruto del molino, ubicado en la parte de alimentación y descarga del molino. Aunque existen dos tipos de cojinetes, el que viene implementado en los molinos de Antapaccay son los multipad.

### **3.4.4 Rejillas o parrillas en molinos SAG**

En los molinos se instalan unas rejillas destinadas a retener los cuerpos trituradores y los trozos gruesos de mineral, durante el traslado del mineral molido a los dispositivos de descarga.

Para dejar salir el mineral molido por el muñón o trunnion de descarga está separado del espacio de trabajo por parrillas y por parrillas dispuestas radialmente con aberturas que se ensanchan hacia la salida. El mineral molido que pasa por las parrillas, es recogido por las nervaduras, también dispuestas radialmente y se vierte fuera del molino por el trunnion de descarga.

### 3.4.5 Revestimientos o liners para molinos

El uso industrial de revestimiento de caucho en los molinos se inició al principio de la década del 60 y desde entonces se ha difundido para todo el mundo.

La siguiente figura muestra revestimientos nuevos, listos para ser instalados dentro del molino Sag, ello debido a que se identificó dos liners rotos por el personal mecánico, en una inspección programada.

Esta actividad correctiva se realiza después de haber realizado el aislamiento, bloqueo y extracción de los gases tóxicos que quedaron dentro del molino.



Figura 18. Dos revestimientos del casco del molino SAG, esperando ser montados.

Fuente: [5]

Del mismo modo se identificó una parrilla dañada en el interior del molino Sag. La Figura 19 muestra el componente sobre la tolva de un camión esperando ser instalado por mecánicos encargados.



Figura 19. Parrilla de la tapa de descarga del molino Sag esperando ser montado.

Fuente: [5]

Ahora se muestra el detalle de los revestimientos y parrillas instalados en el interior del molino Sag.



Figura 20. Vista interior del Molino Sag

Fuente: [5]



### **3.5 Descripción del sistema sin engranajes**

Con la finalidad de brindar flexibilidad a la operación de la planta, los sistemas de transmisión deben permitir la variación en la velocidad y el control del par de carga de los molinos. Un GMD es ajustable en velocidad, y por lo tanto puede cumplir con los requisitos operativos con respecto a la flexibilidad y adaptabilidad del proceso. Además, no necesita de reductores ni corona dentada, eliminando el desgaste mecánico y los problemas relacionados. Es un sistema de propulsión sin engranajes donde la transmisión del par entre el motor y el molino es hecha a través del campo magnético en el espacio de aire entre el estator del motor y el rotor del motor. El concepto para impulsar el molino de esta forma es relativamente sencillo, utilizar el cuerpo del molino como rotor del motor y montando los polos allí.

El sistema de transmisión tiene diferentes componentes y subsistemas que se pueden distinguir en términos de parte de potencia, parte de control y auxiliares.

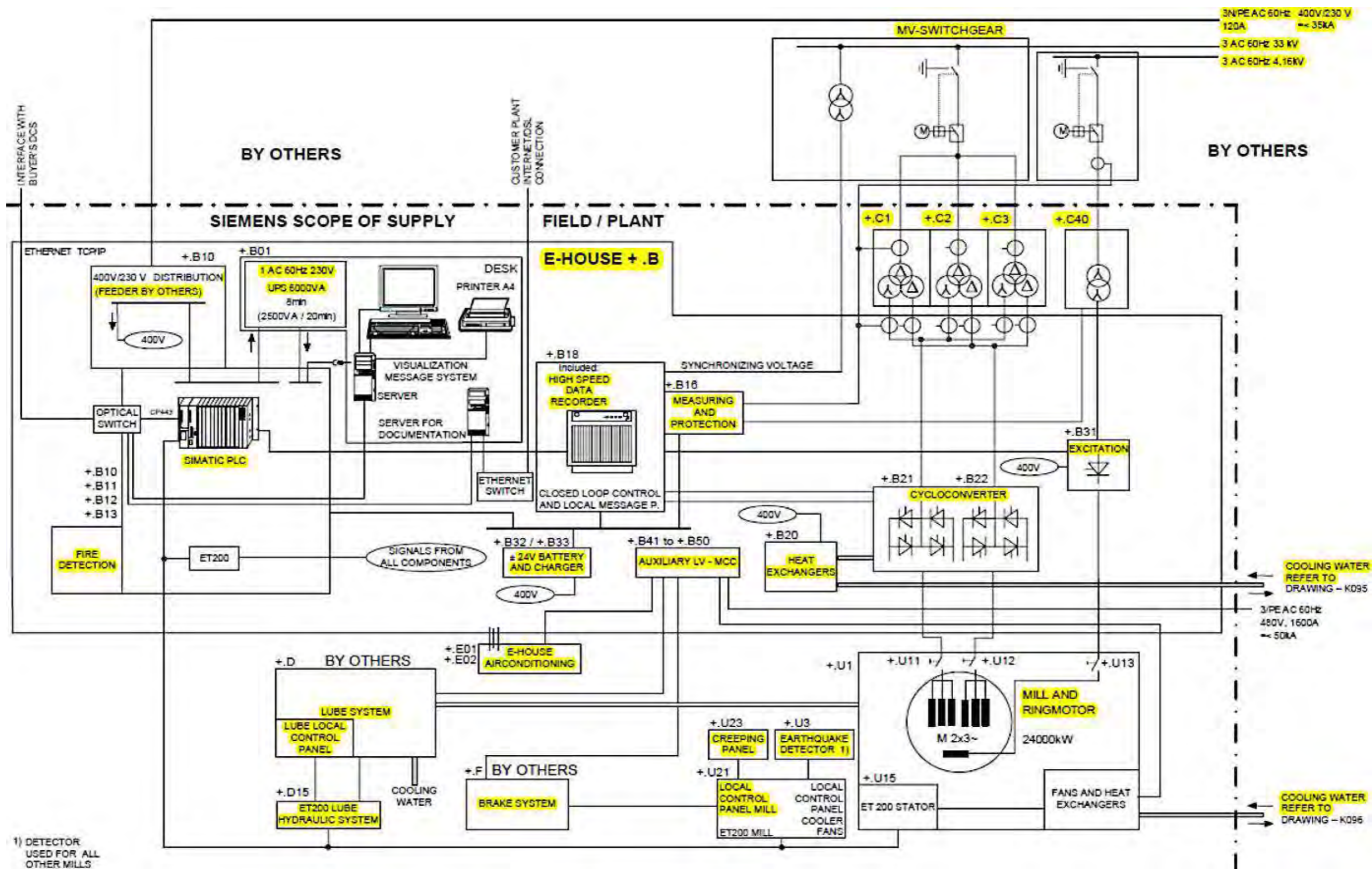


Figura 21. Vista general del sistema de accionamiento de molinos sin engranaje.

Fuente: [5]

### 3.5.1 Parte de potencia del accionamiento sin engranajes

La parte de potencia este compuesto por los siguientes principales componentes:

- Tres transformadores del convertidor de tres devanados cada uno, cuyo grupo de conexionado es Dd0y5 , con el fin de lograr una operación de 12 pulsos. Este banco de transformadores es alimentado de una barra de 33 kV por un sólo interruptor.



Figura 22. Patio de transformadores del molino Sag

Fuente: [5]

Cabe mencionar que el banco de los tres transformadores, son alimentados en simultaneo, por un interruptor desde el tablero 931-SGM-0001, ubicado en la subestación principal de Antapaccay en 33 kV, mientras que el transformador de la excitatriz, se alimenta desde la sala eléctrica 310 (ubicada en molienda) en 4.16 kV. Para la intervención de estos equipos se tendrá que realizar el bloqueo correspondiente en la sala 931 para los transformadores de convertidor y en la sala 310, para el transformador de excitación. La actividad de mantenimiento que con mayor frecuencia se realiza es la inspección y/o ajuste de barras en los terminales de la máquina.

Tabla 4

Datos del banco de transformadores correspondientes a cada molino.

| TAG               | DESCRIPCIÓN                  | GRUPO DE CONEXIÓN | POTENCIA | VOLT PRIMARIO | VOLT SEC 1 | VOLT SEC 2 | MÉTODO DE ENFRIAMIENTO | IP |
|-------------------|------------------------------|-------------------|----------|---------------|------------|------------|------------------------|----|
| 310-MLS-001-XFC 1 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 13.6 MVA | 33 kV         | 2.4 kV     | 2.4 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLS-001-XFC 2 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 13.6 MVA | 33 kV         | 2.4 kV     | 2.4 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLS-001-XFC 3 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 13.6 MVA | 33 kV         | 2.4 kV     | 2.4 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLS-001-XFC 4 | Transformador de excitación  | <b>Yyn 0</b>      | 800 kVA  | 4.16 kV       | 520 V      |            | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-001-XFC 1 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-001-XFC 2 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-001-XFC 3 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-001-XFC 4 | Transformador de excitación  | <b>Yyn0</b>       | 570 kVA  | 4.16 kV       | 370 V      |            | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-002-XFC 1 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-002-XFC 2 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-002-XFC 3 | Transformador de convertidor | <b>Dd0y5</b>      | 9.4 MVA  | 33 kV         | 1.3 kV     | 1.3 kV     | ONAN                   | 54 |
| 310-MLB-002-XFC 4 | Transformador de excitación  | <b>Yyn 0</b>      | 570 kVA  | 4.16 kV       | 370 V      |            | ONAN                   | 54 |

Nota. Datos obtenidos en campo.

El grupo de conexionado de los transformadores del cicloconvertidor es Dd0y5, lo que equivale a decir que el secundario está en fase con el primario y el terciario está desfasado en  $30^\circ$  respecto al primario. Cuyo objetivo es reducir el impacto generado por los cicloconvertidores al procesar las ondas de entrada, para generar otra nueva, de este modo se logra tener una aplicación de 12 pulsos, que producirá armónicos mucho menos dañinos que una aplicación de 6 pulsos sin desfase. En general, aplicaciones de 18 o 24 pulsos son los recomendables en beneficio de la red de alimentación.

- Dos cicloconvertidores de potencia, para un motor de doble devanado estático, sin fusibles. En la Figura 23, se muestra tres bloques de tiristores que forman una torre que será usado solo para uno de los dos devanados del motor de anillo del molino Sag.



Figura 23. Cicloconvertidor para un devanado trifásico del molino Sag.

Fuente: [5].

- Un transformador de excitación cuyo conexionado es Yyn0 para los tres molinos, sólo con diferente potencia aparente. El transformador de excitación se encuentra en campo, junto a los transformadores del cicloconvertidor.

- Un convertidor de excitación, que se ubica en el cuarto de potencia al lado del cicloconvertidor. El Simoreg DC Master se alimenta del transformador de excitación de forma directa.



Figura 24. Convertidor de excitación Simoreg DC Master.

Fuente: [5].

- El motor síncrono cuyos devanados están conectados en estrella y el rotor es de polos salientes. Siendo en el caso del motor del molino Sag 88 y 64 polos para los motores de los molinos de Bolas. En la Figura 25, se muestra las dimensiones del estator que tiene la forma de anillo, siendo iguales por el exterior para el molino Sag y Bolas, internamente las dimensiones difieren por completo.

El motor de anillo, en el estator lleva incorporado un intercambiador de calor aire-agua, dos ventiladores y un filtro de aire para refrigerar los devanados de campo y armadura.

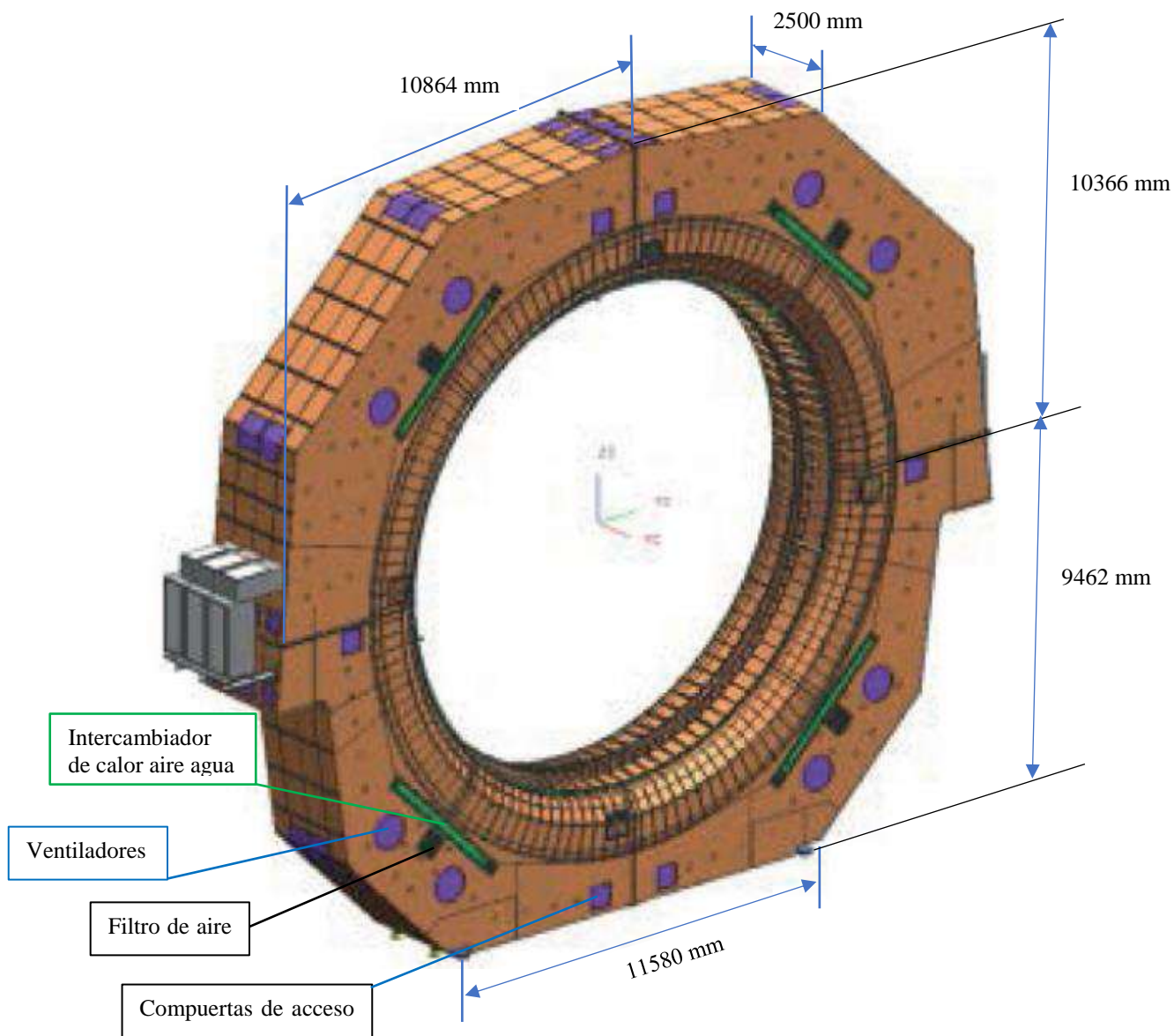


Figura 25. Modelo CAD 3D del motor de anillo Siemens de 42 pies.

Fuente: [9]



### 3.6 Modos de operación del molino

La selección de los modos de operación es posible hacerlo desde el MLCP (Panel de Control Local del Molino). Este tablero es manipulado únicamente cuando entra en mantenimiento, mientras que en operación solo es usado como un indicador de alarmas, mediante las lámparas de señalización.

En la figura siguiente se muestra el panel de control local del molino SAG.



Figura 26. Tablero de Control Local Molino Sag.

Fuente: [5]

El molino tiene cuatro modos de operación:

### **3.6.1 Operación remoto normal**

Operación a través del panel de control de molienda, rango de velocidad entre 3 rpm y velocidad máxima para el molino, ajustable desde el panel de control.

### **3.6.2 Operación local normal**

Operación desde el MLCP. El rango de Velocidad varía entre 3 rpm y la velocidad máxima para el molino, ajustable con botones pulsadores “Reducción / aumento de velocidad” en el MLCP en Intervalos de +/- 0.5 rpm.

### **3.6.3 Modo paso a paso**

Operación desde el MLCP.

En este modo la velocidad es constante de 2 rpm y el ángulo de avance por Impulsos es seleccionable con el interruptor rotativo de 2 dígitos en el MLCP, donde 1 dígito es igual a un perno que equivale a 6 grados.

El modo de Avance por Impulsos y la dirección de rotación son seleccionadas por el operador en el MLCP. Un interruptor rotativo se utiliza entonces para seleccionar el “Ángulo Solicitado” de rotación.

La unidad de medición para el ángulo de rotación es el número de pernos alrededor de la circunferencia de molino.

La lámpara de indicación “**molino listo para operar**” proporciona al operador la retroalimentación de que todo está listo para oprimir el botón pulsador de **arranque** en el MLCP.

La transmisión acelera lentamente y gira el molino, cuando la carga cae en cascada por primera vez, esto se denomina “Ángulo en Cascada” que es medido y memorizado por el sistema.

El accionamiento del molino gira al “Ángulo Solicitado” predeterminado en el MLCP y da la vuelta al “Angulo Solicitado” por el “Ángulo en Cascada”. Al llegar al valor sumario calculado del ángulo solicitado más el ángulo en cascada, el accionamiento del molino detiene y gira el molino de regreso al ‘Ángulo Solicitado’, deteniendo el molino con una carga balanceada. Después el motor del molino se apagará eléctricamente.

Este procedimiento automático evita cualquier oscilación en el molino después del avance por impulsos y reduce considerablemente el tiempo de interrupción del servicio, debido a que la operación puede iniciarse más rápido con las tareas de mantenimiento o iniciar sin demora otros arranques.

#### **3.6.4 Modo lento**

La operación del molino seda con el mando de marcha muy lenta, que se guarda en una caja cerca del tablero local. La velocidad en este modo es de 0.3 rpm, y girara mientras el botón pulsador MARCHA esté oprimido. El arranque y la operación del molino se activan, cuando la luz blanca se enciende.

El mando de marcha muy lenta está equipado con:

- Una luz indicadora de LISTO.
- Un botón pulsador de MARCHA.
- Un botón pulsador de PARO DE EMERGENCIA.

El operador debe acceder a este modo cambiando el selector del MLCP al modo lento (también llamado modo de mantenimiento).

Se tiene que oprimir MARCHA en el mando para que el molino arranque y gire lentamente a 0.3 rpm en la dirección seleccionada en el MLCP. Esta velocidad es suficientemente lenta para permitir una inspección detallada de los revestimientos.

Este modo de operación, permite que el operador mueva la carga del molino hasta el “Ángulo en Cascada”. Conforme la carga cae en cascada, los revestimientos del molino quedan expuestos para su inspección o cambio.

El operador puede detener el molino liberando el botón pulsador de MARCHA. El operador puede continuar girando el molino incluso fuera de la posición desbalanceada oprimiendo de nuevo el botón pulsador MARCHA. En la posición desbalanceada también se puede cambiar la dirección de rotación.

Hacer funcionar y detener el molino de este modo significa que el operador tiene la posibilidad de colocar exactamente el forro solicitado en un determinado lugar.



Figura 27. Mando de marcha muy lento del Molino Sag.

Fuente: [5]

### 3.6.5 *Modo balanceo*

Como en el modo de avance por paso a paso, el molino puede girarse en marcha atrás a una posición balanceada

El personal de mantenimiento puede seleccionar este modo de operación en el MLCP girando el interruptor selector a la posición de “**balanceo**”. El cicloconvertidor abre el freno y gira, controlado por torque, el molino de regreso a la posición balanceada, sin oscilaciones. El procedimiento de arranque es el mismo que para el arranque normal del molino, el enclavamiento del proceso exterior se desactiva, el operador necesita la confirmación de **molino listo para operar** para poder iniciar el balanceo con el botón pulsador **partir sistema motriz del molino**.

### **3.7 Procedimiento de arranque del molino**

Las siguientes directrices están diseñadas para ser una ayuda general para el personal de operaciones y mantenimiento que participan en una parada de mantenimiento y se necesite volver a arrancar del equipo. Se supone que todos los sistemas auxiliares incluyendo el sistema de lubricación del cojinete con soporte cilíndrico ha sido interrumpido por motivos de mantenimiento.

#### **3.7.1 Arranque de los elementos auxiliares del molino**

Se tienen los siguientes sistemas que necesitan estar operando, antes del arranque del molino:

- Enfriamiento del Cicloconvertidor SIMANIC S SL 150: Se encienden las bombas de recirculación.
- Enfriamiento el convertidor SIMOREG DC MASTER: Se enciende el ventilador.
- Enfriamiento del motor/ molino: Se encienden los enfriadores y la bomba de impulsión.
- Enfriamiento del motor: Se encienden los 8 ventiladores del motor anillo.
- Estos auxiliares pueden ser un grupo que se pone en marcha desde el panel de control en **modo remoto** o a través del botón pulsador **arranque de auxiliares** en el MLCP en el **modo local**, si los sistemas auxiliares están listos para arrancar, de otro modo no se aceptará una orden de arranque.

Una condición previa adicional para el **arranque de grupo** satisfactorio es que todos los interruptores selectores del abanico de enfriamiento del motor en el tablero de la trituradora +. U21 estén en posición **remota**. El valor de configuración de la posición local para estos interruptores selectores se utiliza sólo para las aplicaciones de mantenimiento que permiten las pruebas en encendido / apagado.

Después de activar un arranque de grupo, la alarma de advertencia sonará durante 20 segundos.

### ***3.7.2 Arranque del sistema de lubricación del molino***

El sistema de lubricación de baja y alta presión para los cojinetes con soporte cilíndrico del molino debe volverse a arrancar primero cuando se prepara un retorno a la operación. Normalmente tiene sentido volver a arrancar el sistema de lubricación lo más pronto posible (es decir, después de la terminación de cualquier actividad de mantenimiento en las unidades lubricadoras) para evitar enfriamiento innecesario de las tuberías y los cojinetes. Deben evitarse las paralizaciones innecesarias de las bombas de alta y baja presión.

Primero se debe pasar al molino a la operación **local**; en seguida haciendo uso del pulsador de **partir** arrancar el sistema de lubricación de **baja presión**, esta acción debe estar confirmada por el encendido de una lámpara de indicación de color **verde**.

Concluido el paso anterior, sigue arrancar el sistema de **alta presión**, conformada por dos bombas, esperar hasta que se tenga la confirmación.

### ***3.7.3 Cierre de interruptores***

El siguiente paso es solicitar el cierre del interruptor automático principal en 33 kV y 4160 Vac.

Antes de esto, se recomienda cerrar los seccionadores de línea del motor. Estos seccionadores del motor aíslan al motor de anillo del cicloconvertidor (convertidor de potencia).

Estos seccionadores deben abrirse, conectarse a tierra antes de que cualquier Personal de Mantenimiento u operaciones entre al cuerpo del molino.

Después de que todos los interruptores apropiados han sido cerrados, la disponibilidad de la energía principal será indicada en el MLCP y en el DCS.

#### **3.7.4 Arranque del Molino**

En esta etapa, la lámpara de **falla sistema motriz** en el MLCP debe estar apagada. Posiblemente sea necesario **reconocer** los controles para resetear cualquier fallo guardado en el sistema. Si persiste todavía el problema, el personal de mantenimiento eléctrico debe verificar las causas.

Considerar los siguientes casos, cuando no se tenga encendido la lámpara indicadora de **Molino listo para operar**.

- El tiempo de demora de 3 minutos iniciado después de apertura de los frenos todavía no termina. Este tiempo de demora es para garantizar que la transmisión de la Trituradora se balancea antes de que se aplique un re arranque.
- La señal de **enclavamiento de proceso externo**, no ha sido atendida satisfactoriamente como lo indica el estado apagado de la lámpara de control en el MLCP. Esta señal cableada hacia el PLC de Siemens, representa el funcionamiento previo al arranque del molino (otros molinos, zaranda, faja 11, bombas Warman, etc.) y se activa tanto en el modo remoto como en el local de la operación. Esta señal no tiene significado durante la operación de **paso a paso y lento** que se pueden llevar a cabo sólo en modo local.

- Ninguna dirección de rotación se seleccionó. El sistema de control guarda la dirección de rotación activa real. Bajo circunstancias normales, no se requiere volver a seleccionar la dirección rotacional a menos que los operadores lo deseen explícitamente.

Cuando se ha logrado la condición de **Molino listo para operar**, el equipo puede ser iniciado desde el DCS si está en **modo remoto** o con un comando de botón pulsador desde el MLCP cuando opera en **modo local**.

### 3.8 Procedimiento de paro del molino.

Un solo comando del operador detiene el Molino, y existen dos modos de parada; **parada normal**, lleva al Molino a detenerse en 40 segundos y la **parada rápida** llevara al molino a detenerse en 20 segundos.

Para evitar oscilaciones no deseadas y para balancear la carga, el control de torque implementado gira automáticamente al molino de regreso y la detiene con carga balanceada.

Esto tiene el beneficio de que no existe mayor tiempo de esperar hasta que el molino queda balanceado, el operador puede reiniciar inmediatamente el arranque del molino.

Bajo situaciones de paro de emergencia forzadas por fallos, no es posible una parada controlada del molino.

### 3.9 Grupos de funciones técnicas

El Hardware y el Software utilizados para los accionamientos de Siemens (Gearless Drives) se subdividen en grupos especiales para las diferentes funciones técnicas del molino:



Resumen de grupos:

Tabla 5

*Grupo de funciones técnicas*

| <b>Grupo</b> | <b>Identificación</b> | <b>Nombre de la isla</b>                   |
|--------------|-----------------------|--|
| Grupo        | A                     | Interfaz con otros                         |
| Grupo        | B                     | Distribución de voltaje                    |
| Grupo        | C                     | Transformador del convertidor              |
| Grupo        | F                     | Filtro Armónico (Opcional)                 |
| Grupo        | G                     | Cicloconvertidor (la parte de fuerza)      |
| Grupo        | H                     | Enfriamiento del cicloconvertidor          |
| Grupo        | J                     | Excitación                                 |
| Grupo        | K                     | Fuerza del motor y seccionadores           |
| Grupo        | L                     | Enfriamiento del motor                     |
| Grupo        | M                     | Calefacción del motor                      |
| Grupo        | N                     | Monitoreo en general                       |
| Grupo        | P                     | Panel de control local de molino           |
| Grupo        | R                     | Sistema de freno                           |
| Grupo        | S                     | Sistema de lubricación                     |
| Grupo        | T                     | Sistema de enfriamiento de molinos         |
| Grupo        | U                     | Cicloconvertidor (la parte de control)     |
| Grupo        | X                     | Aire acondicionado de las salas eléctricas |

Nota. Tabla recopilada del manual SIEMENS.

La codificación señalada nos da la facilidad con la lectura de planos, al momento de ubicar un componente en el sistema.

# *Capitulo IV. El Motor Síncrono*



Figura 28. Motor síncrono acoplado a la polea motriz de una faja de 7 km.

Fuente: [5]

## 4.1 Introducción

Las máquinas eléctricas son convertidores electromecánicos, capaces de transformar energía desde sistema eléctrico a un sistema mecánico y viceversa, basando su funcionamiento en la inducción electromagnética, según [10].

En general el desarrollo de las maquinas eléctricas a lo largo de los años, han hecho que tengan diversas formas de acuerdo a las necesidades de la aplicación. Sin embargo, si se clasifica según la fuente de alimentación y el principio de operación, sería como lo sigue en la siguiente figura.

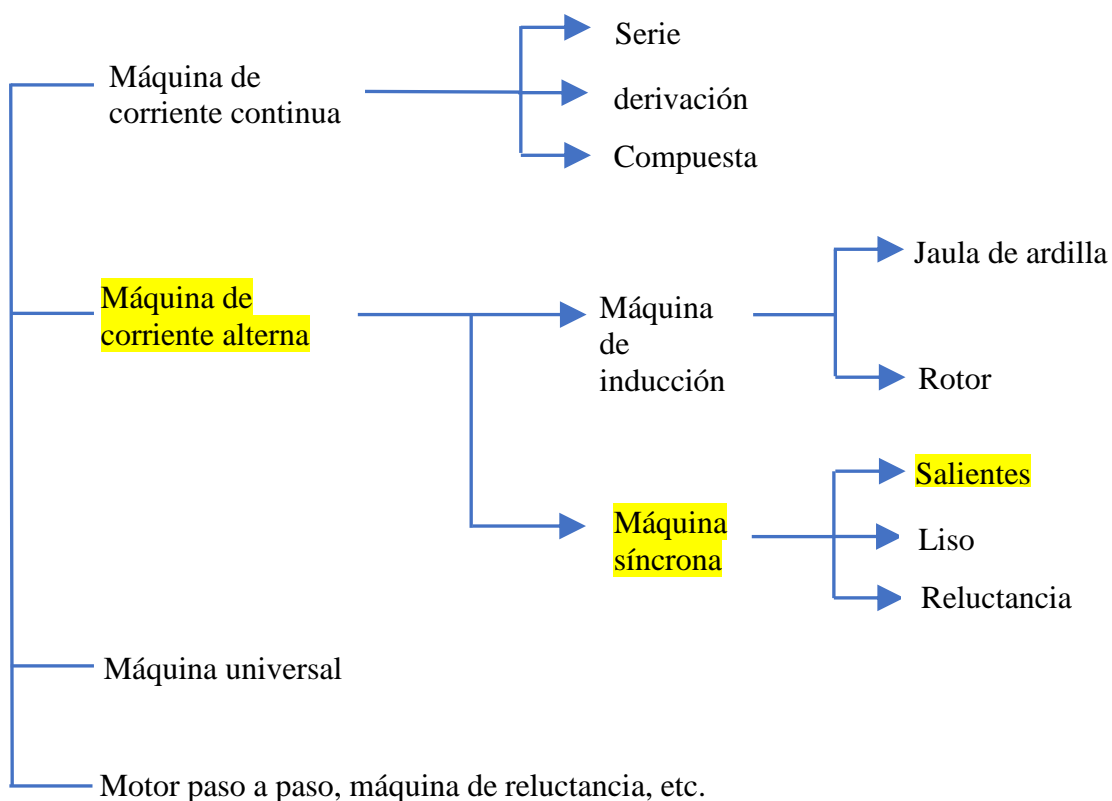


Figura 29. Clasificación de la máquina eléctrica según la fuente de alimentación y el principio de operación.

Fuente: Adaptado de [11].

## 4.2 Motor síncrono

Básicamente, los motores síncronos son máquinas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica. Es una máquina doblemente excitada, ya que el devanado de armadura se conecta a una fuente de alimentación de c.a. y el devanado de campo se conecta a una fuente de c.d. El devanado de armadura es similar al devanado del estator de un motor de inducción trifásico, en donde se tienen tres devanados colocados a  $120^\circ$  uno del otro, la diferencia con esta máquina está con el rotor.

La principal ventaja de las máquinas síncronas respecto de los de más tipos de máquina, es que pueden operar con un factor de potencia unitario, factor de potencia en adelanto o un factor de potencia en retraso, únicamente manipulando la corriente del devanado de campo.

Este tipo de motores son empleados en aplicaciones industriales donde se requieren grandes potencias a bajas velocidades.

### 4.2.1 Estructura del motor de síncrono aplicado en molinos sin engranaje

Un motor síncrono, como cualquier máquina eléctrica rotatoria tiene una estructura básica formada por dos componentes principales.

**4.2.1. Estator.** Representa la parte de la máquina que no se mueve y forma parte un devanado (conocido como devanado de armadura) muy similar al devanado de una máquina de inducción y se conecta a una fuente trifásica. También se le conoce con el nombre de motor de anillo porque está instalado alrededor del rotor.

La velocidad del campo magnético de la armadura  $n_{sin} (r.p.m)$  está vinculada rígidamente con la frecuencia  $f$  (Hz) de la red de corriente alterna con la cual trabaja, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$n_{sin} = \frac{120f}{p} \quad (4.1)$$

donde  $p$  es el número de polos del motor.

**4.2.2. Rotor.** Es la parte de la máquina que está libre para el movimiento y lleva un devanado (conocido como devanado de campo) alimentado por una fuente de c.d. para crear un electroimán controlando la magnitud del campo por dicha fuente. El tipo de rotor es de polos salientes; es decir sus polos están montados directamente en la brida del molino, que viene a ser la unión entre la coraza o casco y la tapa de alimentación del molino, lo que significa que el mismo molino se convierte en el rotor.

Sobre cada polo de la rueda polar está puesta una bobina (bobina de excitación), que constituye una parte del devanado de campo o excitación. Las bobinas de polos están unidas entre sí de tal modo que a la circular corriente continua a través del devanado las polaridades de los polos del rotor se turnan.



Figura 30. Desplazamiento del estator de un motor síncrono de polos salientes en MW.

Fuente: Siemens

Estos dos devanados independientes, se alimentan de la siguiente forma:

El devanado de armadura, que está distribuido en forma de un arrollamiento trifásico y dividido en 4 segmentos, es alimentado por corriente alterna. Este devanado es alimentado por un cicloconvertidor trifásico  $3\phi - 3\phi$  de  $2 \times 6$  pulsos o de 12 pulsos, que a su vez se conecta a una red de media tensión a través de tres transformadores trifásicos de potencia especiales. En la Figura 30 se muestra el estator del motor síncrono en proceso de montaje.

El devanado inductor o de campo, constituido en forma de arrollamiento concentrado es alimentado por corriente continua, que da lugar los segmentos polares de la máquina. Este devanado es alimentado por un rectificador a través de los anillos deslizantes de la máquina. En la Figura 32 se muestra el devanado de campo.

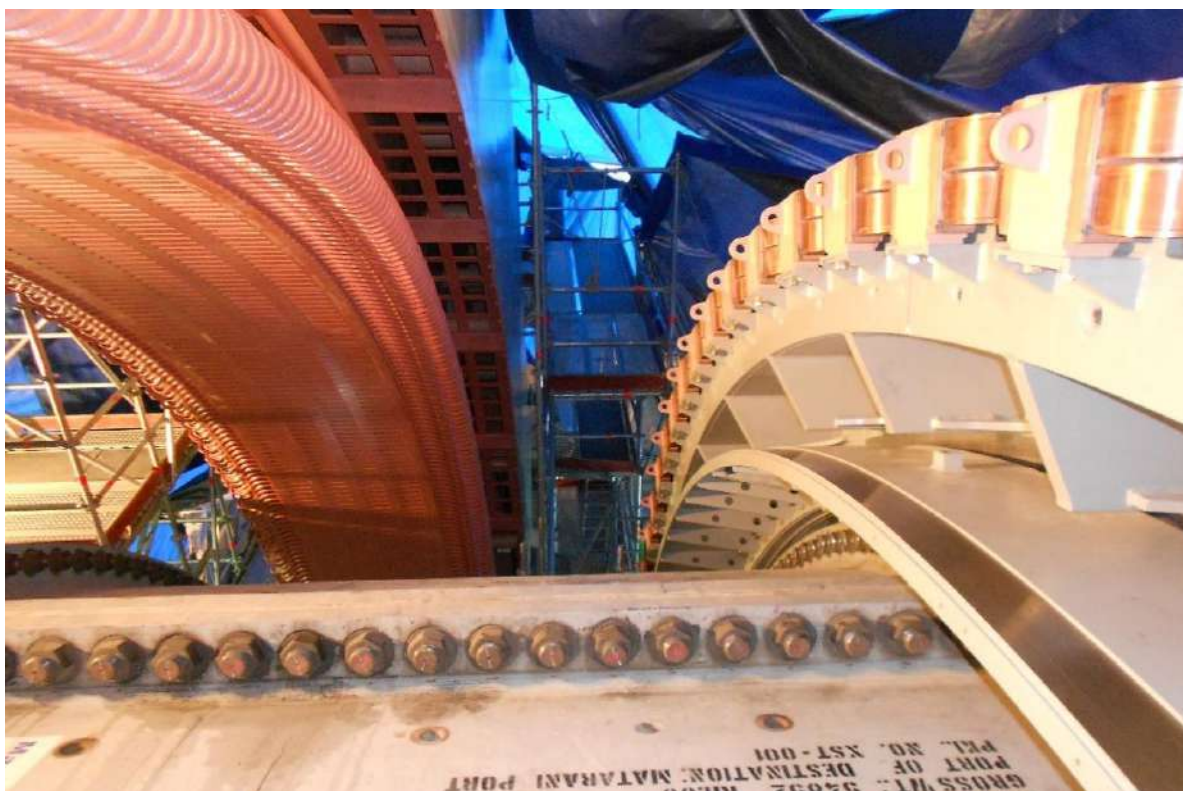


Figura 31. Devanados de armadura y campo de un motor síncrono de polos salientes.

Fuente: [5]

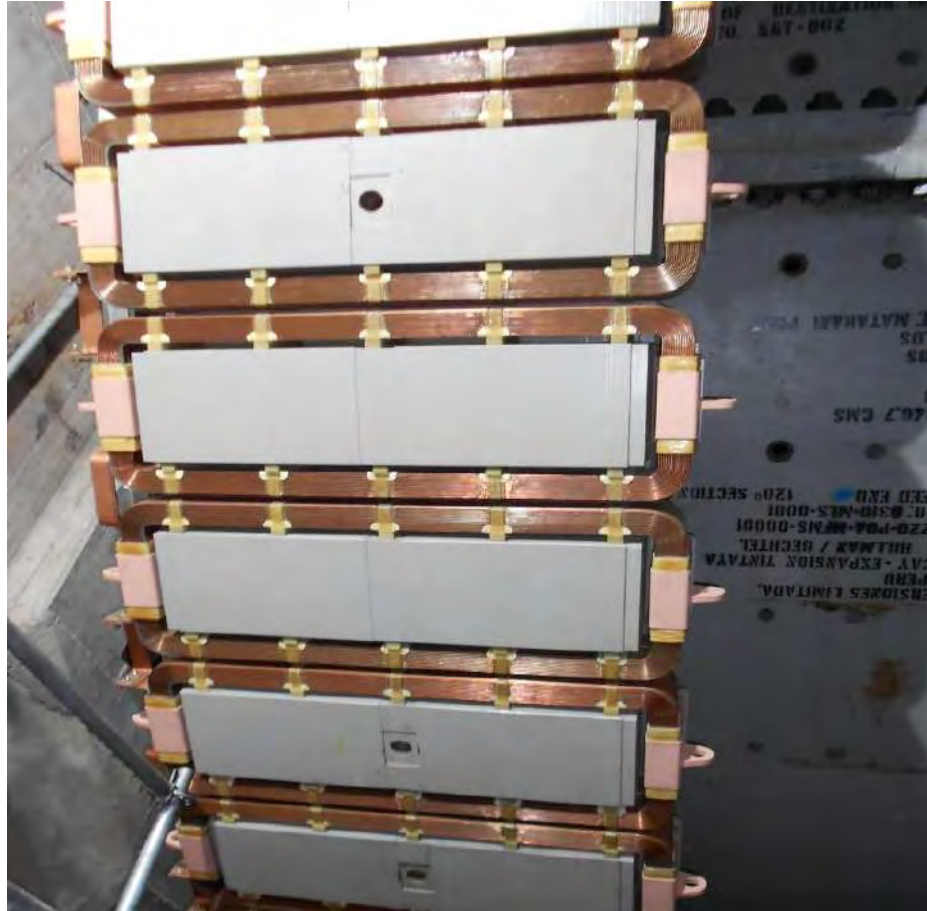


Figura 32. Polos del rotor conectado en serie del motor del molino de Bolas 1.

Fuente: [5]

Según se aprecia la Figura 31, la carcasa o culata del motor tiene la forma de un anillo, en cumplimiento a las exigencias dadas por el sistema de refrigeración y protección contra objetos sólidos, polvo y agua.

A continuación, se presentan los datos técnicos del motor de anillo del molino Sag y Bolas:

Tabla 6  
*Datos del motor de anillo del molino Sag*

| <b>Descripción</b>                        | <b>Valores</b> |
|---|----------------|
| Potencia nominal del motor                | 24000 kW       |
| Voltaje nominal del motor                 | 2x3700 V       |
| Corriente nominal del estator             | 2x1964 A       |
| Corriente y voltaje de excitación nominal | 1007 A/440 V   |
| Velocidad nominal del motor               | 9.04 rpm       |
| Velocidad máxima del motor                | 9.76 rpm       |
| Velocidad en modo lento                   | 0.3 rpm        |
| Velocidad en modo paso a paso             | 2.0 rpm        |
| Frecuencia nominal del estator            | 6.629 Hz       |
| Torque a velocidad nominal                | 25352 kNm      |
| Torque a velocidad máxima                 | 23476 kNm      |
| Número de anillos rozantes                | 3              |
| Número de carbones                        | 34             |
| Número de polos                           | 88             |
| Método de enfriamiento                    | IC75W          |

Nota. Los datos fueron recopilados del manual del equipo.

Datos técnicos del motor de anillo del molino de Bolas

Tabla 7  
*Datos técnicos del motor de anillo de los molinos de Bolas*

| <b>Descripción</b>                        | <b>Valores</b> |
|---|----------------|
| Potencia nominal del motor                | 16400 kW       |
| Voltaje nominal del motor                 | 3900 V         |
| Corriente nominal del estator             | 2593 A         |
| Corriente y voltaje de excitación nominal | 754 A/287 V    |
| Velocidad nominal del motor               | 11.37 rpm      |
| Velocidad máxima del motor                | 12.28 rpm      |
| Velocidad en modo lento                   | 0.30 rpm       |
| Velocidad en modo paso a paso             | 2 rpm          |
| Frecuencia nominal del estator            | 6.064 Hz       |
| Torque a velocidad nominal                | 13774 kNm      |
| Torque a velocidad máxima                 | 12754 kNm      |
| Número de anillos rozantes                | 3              |
| Número de carbones                        | 30             |
| Número de polos                           | 64             |
| Método de enfriamiento                    | IC75W          |

Nota. Los datos fueron recopilados del manual del equipo.



#### 4.2.1.1 *Colector de anillos del motor*

Los terminales del devanado de campo se conectan con dos anillos colectores, los que giran junto con el rotor y son eléctricamente aislados tanto del árbol como entre sí. A través de las escobillas de grafito inmóviles que rozan contra los anillos colectores, la corriente directa se suministra al devanado de excitación. Para evitar falsos contactos, existe un muelle que presiona ligeramente la escobilla a la superficie cilíndrica del anillo.

Se tiene un tercer anillo rozante de tierra, cuya función es aterrizar el rotor/cuerpo del molino.



Figura 33. Sistema de anillos rozantes montados sobre el rotor – molino Sag.

Fuente: [5]

#### **4.2.2 Caja de conexiones de fuerza del motor**

La conexión de potencia se realiza mediante armarios eléctricos y dependiendo de la potencia del motor, se tendrán de hasta dos devanados estatóricos; por tanto, para cada circuito de potencia, tendrá un armario, en cuyo interior encontraremos un seccionador de línea y otro de tierra. Es en estos seccionadores donde se realiza el aislamiento, bloqueo y reposición para ingresar al motor síncrono.



Figura 34. Cajas de seccionadores del motor anillo – Molino Sag.

Fuente: [5]

#### **4.2.3 Conexión de los circuitos auxiliares**

##### **4.2.3.1 Conexión de los calefactores**

En esta máquina eléctrica está provisto de 04 calefactores ubicadas en la parte inferior del estator; diseñado para garantizar que los elementos activos siempre estén más calientes que su entorno y evitar así condensaciones.

Para proteger los bobinados del estator y rotor, debe evitarse la condensación de la máquina, es decir, la humedad relativa debe mantenerse por debajo del 50 % de humedad relativa.

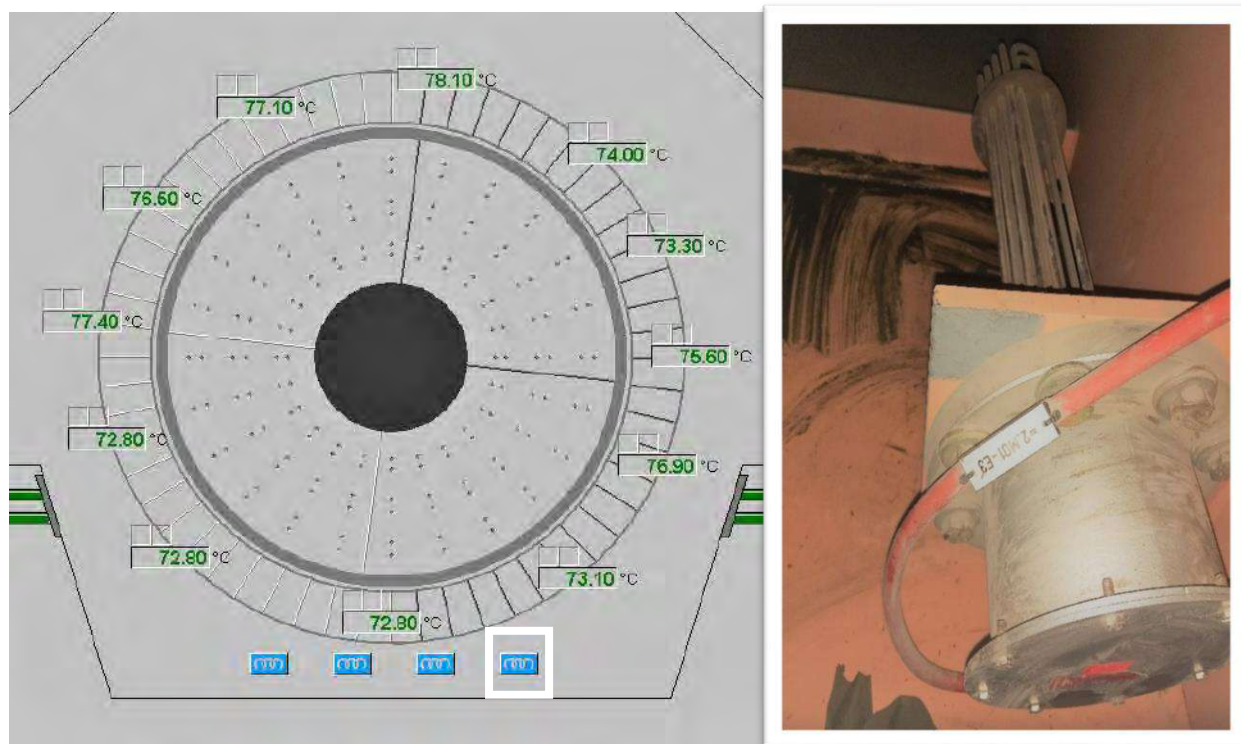


Figura 35. Calefactor ubicado dentro del motor síncrono.

Fuente: [5]

#### 4.2.3.2 Conexión de las sondas de temperatura

El devanado del estator lleva integrados termómetros de resistencia para poder vigilar la temperatura del bobinado y protegerlo contra sobrecargas térmicas. Son en total 12 RTD's distribuidos en todo el devanado estatórico.

#### 4.2.4 Sistema de refrigeración

Este sistema se ha diseñado como un circuito de refrigeración interno cerrado. El refrigerador incorporado es un intercambiador de calor aire – agua con tuberías. Las pérdidas térmicas del agua se disipan a través de la superficie de los tubos de refrigeración al agua de

refrigeración que circula por los tubos. Los ventiladores externos hacen circular el aire de refrigeración.

Este sistema está provisto de los siguientes dispositivos de supervisión:

- RTD's para la entrada de aire frio: 04 u
- RTD's para la salida de aire caliente: 04 u
- Monitores de flujo de la entrada de aire frio: 08 u
- RTD's para la entrada de agua de enfriamiento: 04 u
- RTD's para la salida de agua de enfriamiento: 04 u
- Monitores de flujo de salida de agua de enfriamiento: 04 u

#### ***4.2.5 Supervisión del entrehierro de la máquina***

El motor síncrono tiene implementado dos tipos de dispositivos de supervisión del entrehierro; 08 de tipo capacitivos y 08 inductivos.



Figura 36. Sensores de entrehierro VM 3.1 en la marca Vibrosystem

Fuente: [5]

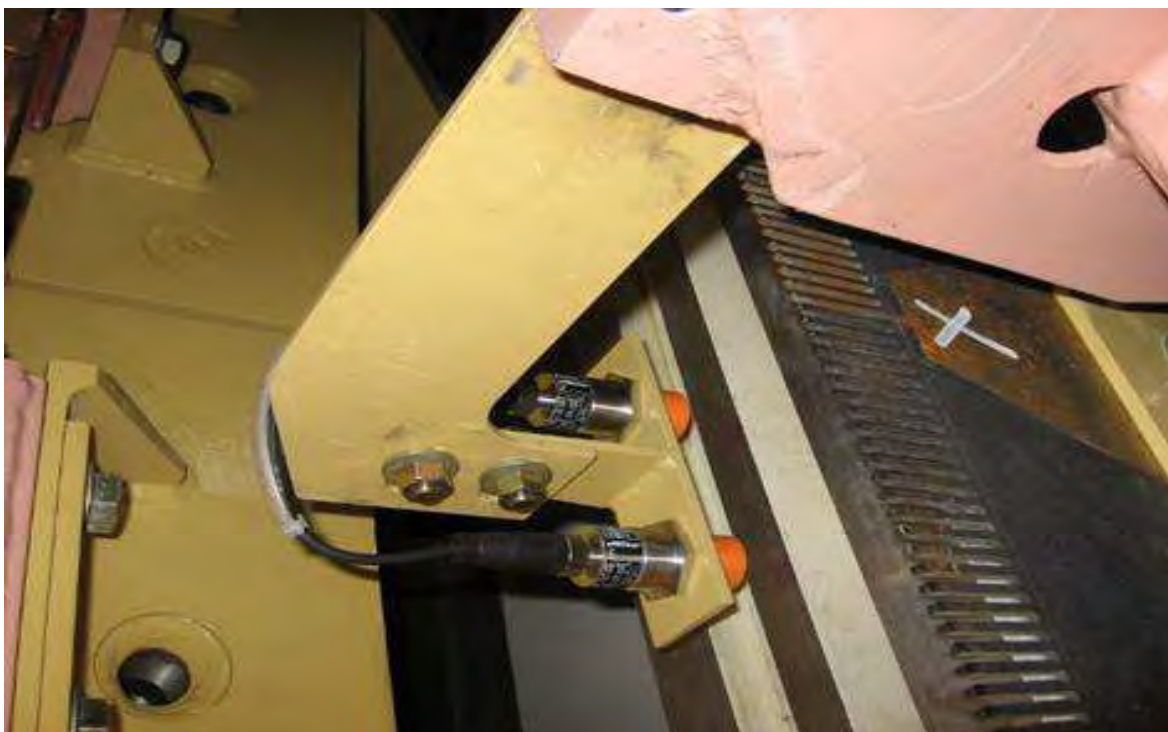


Figura 37. Sensores de proximidad de un motor anillo.

Fuente: [5]

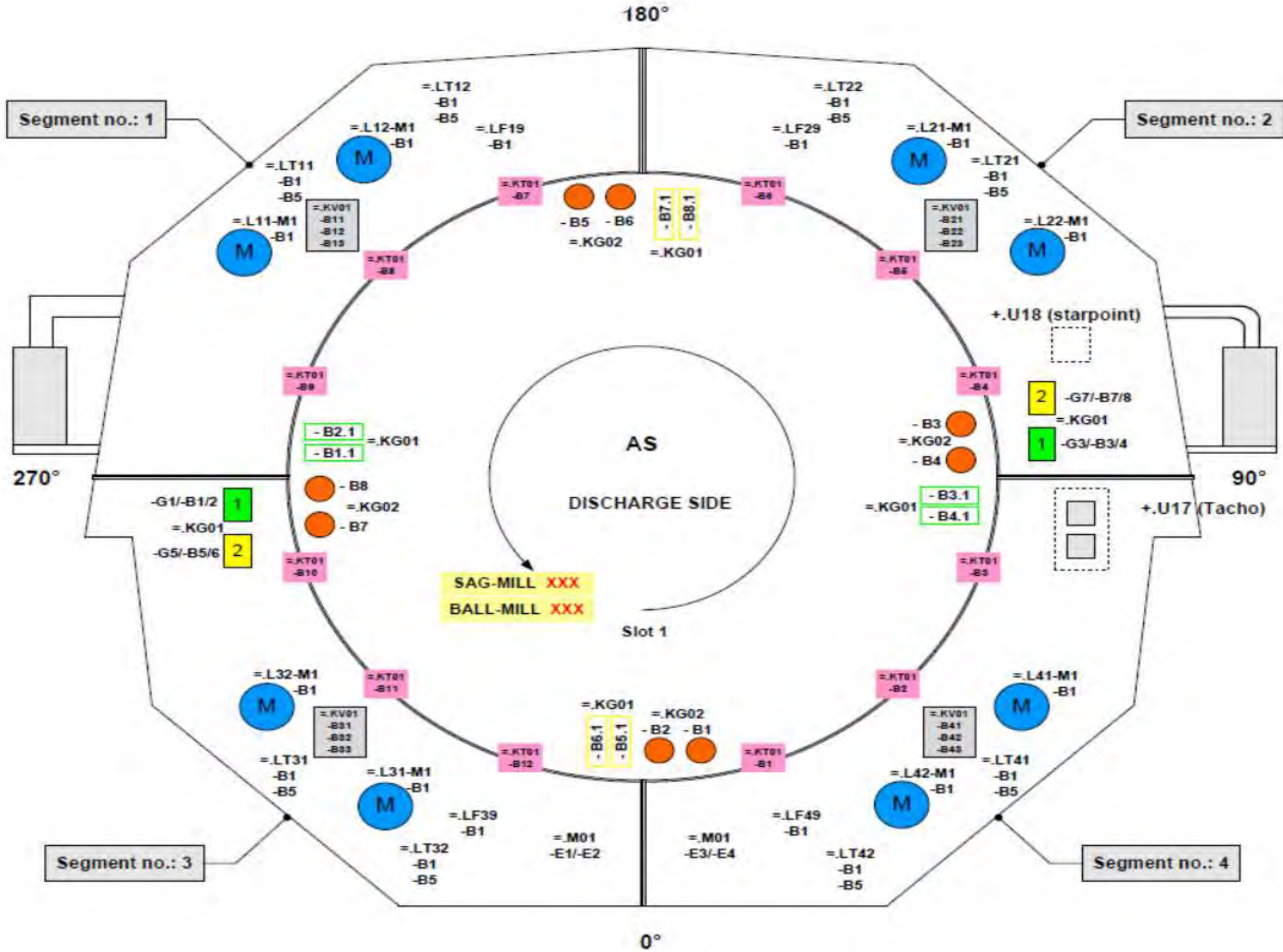


Figura 38. Diagrama de equipos de monitoreo e instrumentación del motor anillo Sag.

Fuente: [5]

Tabla 8

Datos de placa de los ventiladores del motor de anillo de los tres molinos.

|   | TAG              | DESCRIPCIÓN                | MARCA   | FRAME       | POTENCIA  | TENSIÓN | CORRIENTE | RPM   | COSPHI | EFICIENCIA | IP     | CLASE | ROD. ACOPLE | ROD. LIBRE |           |
|---|------------------|----------------------------|---------|-------------|-----------|---------|-----------|-------|--------|------------|--------|-------|-------------|------------|-----------|
| VENTILADORES DEL MOTOR DE ANILLO SAG        | 0310-FAA-0021-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 11 | = 1.L11 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0022-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 12 | = 1.L12 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0023-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 21 | = 1.L21 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0024-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 22 | = 1.L22 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0025-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 31 | = 1.L31 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0026-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 32 | = 1.L32 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0027-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 41 | = 1.L41 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0028-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 42 | = 1.L42 | LEROY SOMER | SES160L-T | 21KW    | 460V      | 33.3A | 3544   | 0.89       | 91.20% | 55    | F           | 6309 ZZC3  | 6210 ZZC3 |
| VENTILADORES DEL MOTOR DE ANILLO DE BOLAS 1 | 0310-FAA-0031-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 11 | = 2.L11 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0032-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 12 | = 2.L12 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0033-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 21 | = 2.L21 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0034-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 22 | = 2.L22 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0035-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 31 | = 2.L31 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0036-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 32 | = 2.L32 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0037-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 41 | = 2.L41 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0038-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 42 | = 2.L42 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
| VENTILADORES DEL MOTOR DE ANILLO DE BOLAS 2 | 0310-FAA-0041-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 11 | = 3.L11 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0042-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 12 | = 3.L12 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0043-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 21 | = 3.L21 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0044-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 22 | = 3.L22 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0045-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 31 | = 3.L31 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0046-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 32 | = 3.L32 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0047-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 41 | = 3.L41 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |
|   | 0310-FAA-0048-M1 | VENTILADOR MOTOR ANILLO 42 | = 3.L42 | LEROY SOMER | LSES132M  | 11KW    | 460V      | 19.0  | 3550   | 0.8        | 89.60% | 55    | F           | 6308 ZZC3  | 6207 ZZC3 |

Nota. Datos obtenidos de campo.

Cada motor de anillo cuenta con cuatro segmentos y en cada uno se tienen dos ventiladores, los mismos que se encargan de enfriar el devanado de armadura. En caso falle un ventilador de un segmento por defectos de aislamiento o deterioro de rodajes, es posible dejarlo en modo prueba, mientras el otro ventilador sigue enfriando el segmento al que pertenecen, es decir que el motor de anillo puede trabajar con cuatro de ocho ventiladores, siempre y cuando, se tenga como mínimo un ventilador por segmento.

### 4.3 Principio de funcionamiento

Según [12] para entender el concepto básico de un motor síncrono véase la Figura 39, que muestra uno con dos polos. La corriente de campo  $I_F$  del motor produce un campo magnético en estado estacionario  $\vec{B}_R$ . Se aplica un conjunto de voltajes trifásicos al estator de la máquina, lo que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados de la armadura, provocando un campo magnético giratorio uniforme  $\vec{B}_S$ .

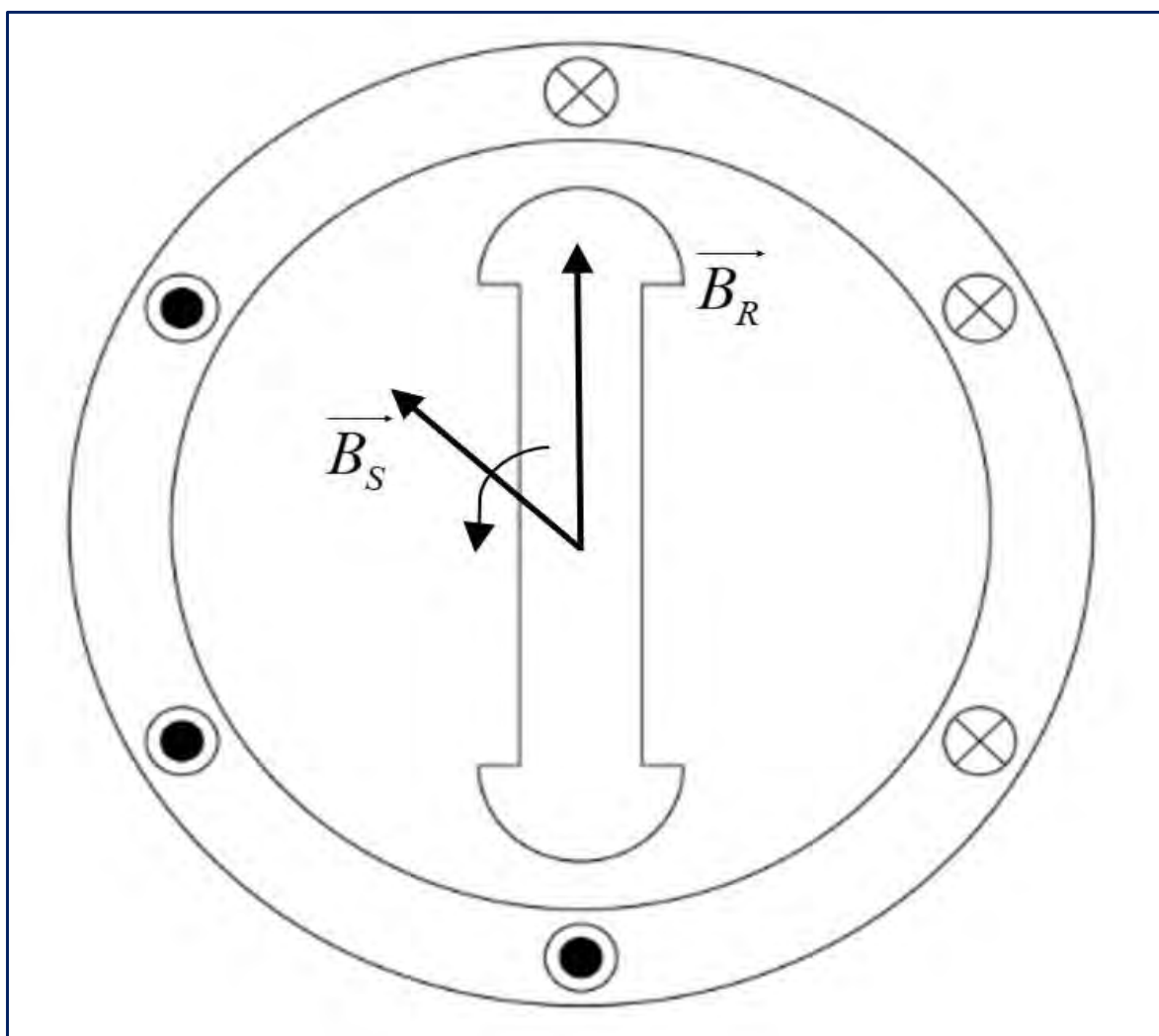


Figura 39. Motor síncrono con dos polos

Fuente: [12]



Por lo tanto, hay dos campos magnéticos presentes en la máquina y el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo de la armadura, igual que dos imanes tenderán a alinearse si se colocan uno cerca del otro. Debido a que el campo magnético del estator gira, el campo magnético del rotor (y el rotor mismo) tratará constantemente de alcanzarlo. Mientras más grande sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta un ángulo máximo), mayor será el par en el rotor de la máquina. El principio básico de la operación de los motores síncronos es que el rotor “persigue” al campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo y nunca lo alcanza.

#### 4.4 Circuito equivalente de un motor síncrono

Para obtener el modelo del circuito equivalente del motor síncrono, se considera que es de rotor de polo liso, y el voltaje  $E$ , es el voltaje que se genera y produce en una fase del motor. Sin embargo, por lo general este voltaje  $E$  no es el voltaje que se presenta en las terminales del motor  $V_\phi$ . Por otro lado, la reactancia  $X_s$  es la suma de la reactancia de magnetización  $X_m$  y la reactancia de dispersión  $X_\sigma$ .

$$X_s = X_m + X_\sigma \quad (4.2)$$

Para el análisis del circuito equivalente mostrado en la Figura 40 es suficiente un circuito monofásico, y aplicando la ley de voltaje de Kirchoff se tiene:

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_o + jX_s \vec{I}_s + R_s \vec{I}_s \quad (4.3)$$

En la práctica, se suele despreciar la resistencia  $R_s$  del circuito equivalente del motor. Es por ello que en la Figura 41, en la que se ha representado el diagrama fasorial de tensiones de la ecuación (4.3) se ha tenido en cuenta esta circunstancia. También se ha supuesto que el motor trabaja con un f.d.p. inductivo, siendo  $\phi$  el ángulo de fase entre la tensión  $\vec{V}_\phi$  y la corriente  $\vec{I}_s$ . El ángulo  $\delta$  que forman el fasor f.c.e.m.  $\vec{E}_o$  y el fasor de la tensión  $\vec{V}_\phi$  se denomina **ángulo de**

**carga o ángulo de potencia, y se observa que  $\vec{E}_o$  se retrasa respecto a  $\vec{V}_\phi$ , lo que significa que trabaja como motor señala [13].**

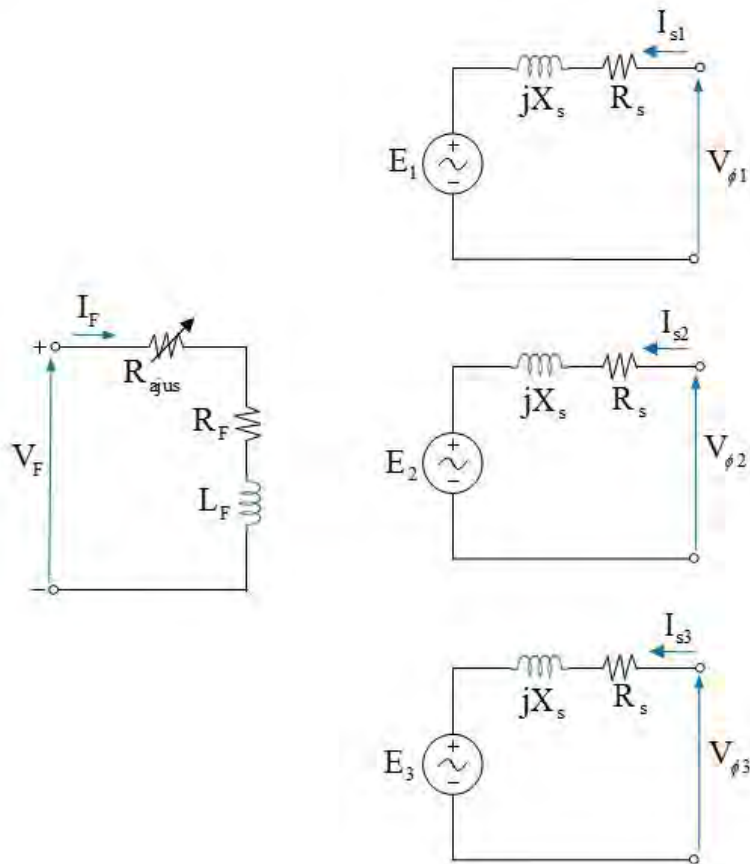


Figura 40. Circuito equivalente completo de un motor síncrono trifásico.

Fuente: Adaptado de [12].

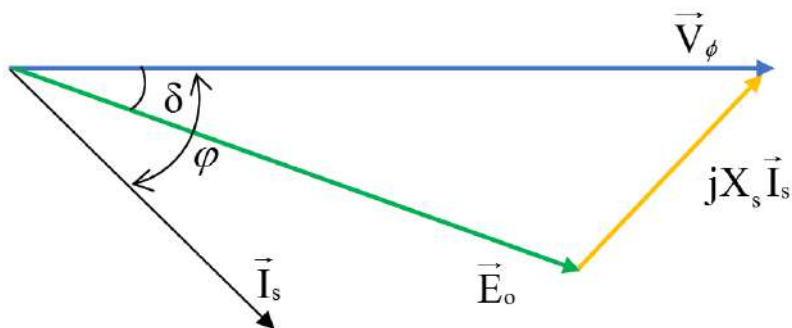


Figura 41. Diagrama fasorial de un motor síncrono de rotor cilíndrico.

Fuente: [13].

## 4.5 Arranque de motores síncronos

Según [14], existen tres métodos de arranque de motores síncronos:

**4.4.1.1. Reducción de la frecuencia:** el arranque se consigue aumentando la frecuencia de la red desde valores próximos a 0 Hz hasta los 50 Hz por medio de elementos de estado sólido como diodos, tiristores, etc. Esta reducción de la frecuencia permite que el campo magnético del estator gire lentamente y permita al campo magnético del rotor alcanzarlo y comience a girar.

**4.4.1.2. Primomotor externo:** consiste en utilizar un motor primario externo acoplado al eje del motor síncrono para acelerar el rotor hasta su velocidad de sincronismo. En este momento, se acopla el motor síncrono a la red como si se tratase de un generador, permitiendo que el campo magnético del rotor alcance al campo magnético del estator y actúe como motor. Este arranque se debe realizar sin carga para que el motor de arranque, solo tenga que arrastrar el eje de la maquina síncrona.

**4.4.1.3. Devanados amortiguadores:** Este sistema se basa en la introducción de barras cortocircuitadas entre si dentro de los polos. Estas barras son conocidas como devanados amortiguadores.

### 4.5.1 Arranque del motor de anillo

Si los campos magnéticos del estator giran a una velocidad lo suficientemente baja, no habrá ningún problema en que el rotor se acelere y se enlace con el campo magnético del estator. Entonces se puede incrementar la velocidad de los campos magnéticos aumentando gradualmente la frecuencia hasta su valor normal.

Este hecho se consigue con el uso de los controladores de estado sólido, siendo el más empleado el SINAMICS SL 150 de SIEMENS.

Según [15] los accionamientos de molinos usan motores síncronos con la técnica del control de corriente (normalmente llamado control vectorial). El control vectorial limita la corriente del estator durante el arranque del motor a un valor no superior al 150 %. El motor arranca usando el modo de control de corriente hasta que la velocidad alcanza 3 rpm y luego cambia al control de voltaje.

Debido a la restricción mecánica, el tiempo mínimo de arranque está limitado a 30 segundos con dos rampas de aceleración separadas por 10 segundos, añade [15]. Esta afirmación es verificable para el caso de un motor anillo del molino Sag de 24 MW, ver Figura 42.

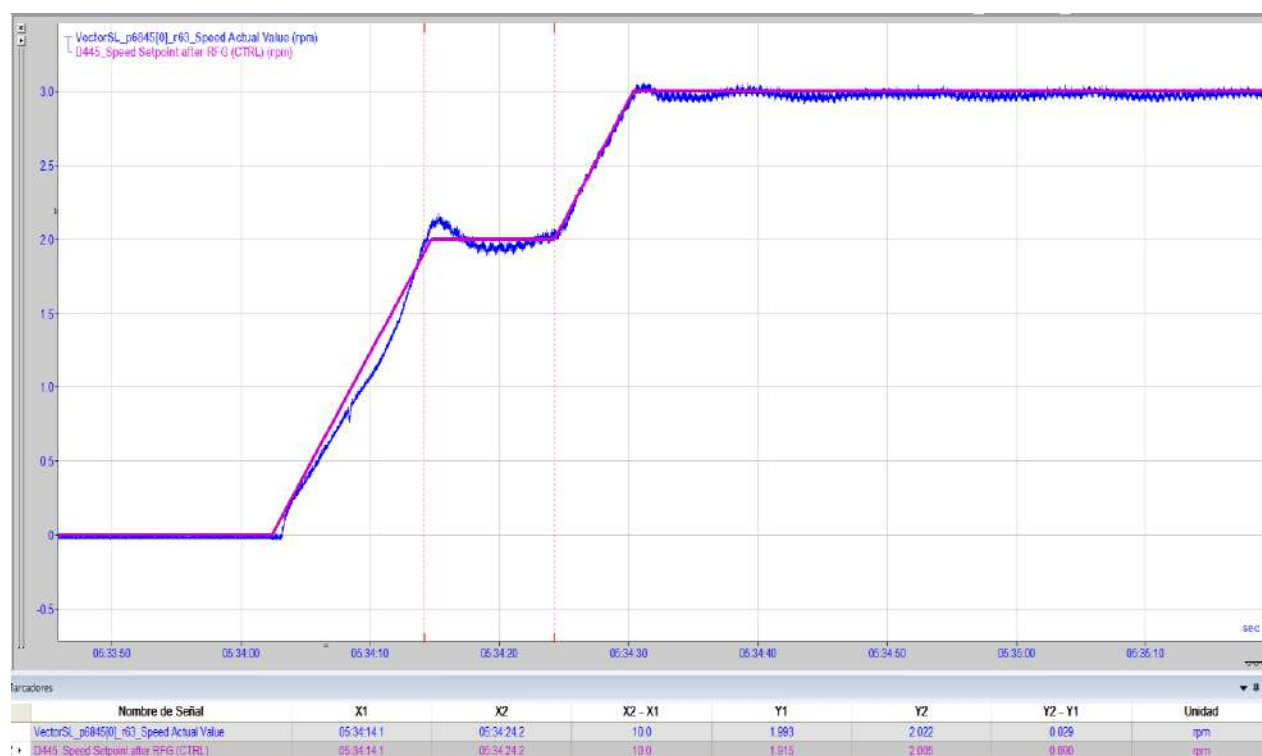


Figura 42. Velocidad de referencia de un motor síncrono de 24 MW en el arranque.

Fuente: [5]

La corriente de campo se aplica 2.2 segundos antes que la tensión del estator, con el fin de generar el campo magnético requerido por el motor síncron, ver Figura 43.

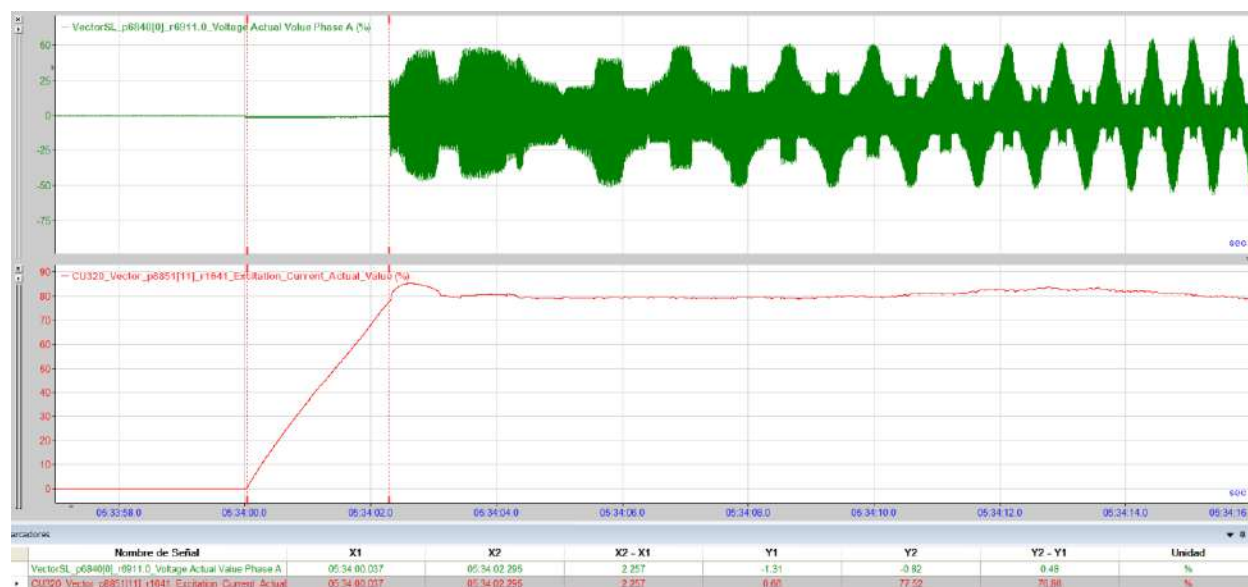


Figura 43. Secuencia de energización de los devanados de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5].

La Figura 44, muestra que aún con la referencia de velocidad baja y el control vectorial, el motor necesita intensidades mayores en la primera rampa de aceleración que en la segunda.

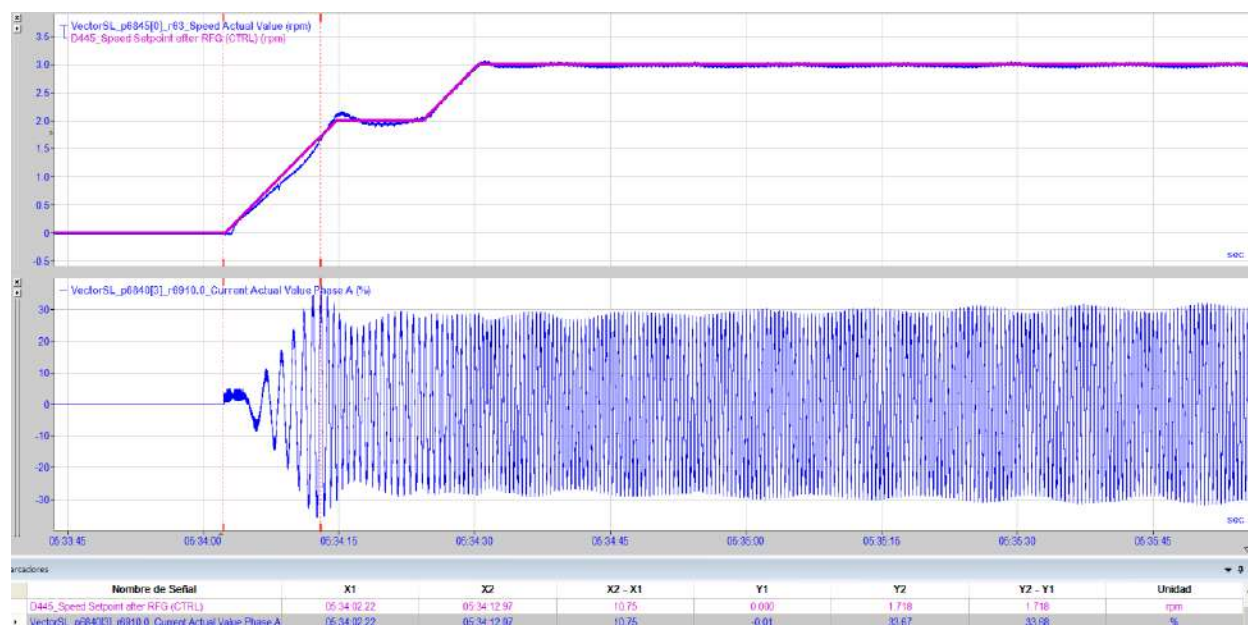


Figura 44. Variación de la corriente de armadura en el proceso de arranque de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5]

#### 4.6 El motor síncrono de polos salientes en régimen permanente

El análisis de una máquina síncrona en estado estable, significa que todas las corrientes y tensiones son sinusoidales y separados entre sí en  $120^\circ$ , y la diferencia de fase entre la tensión y corriente en cada fase es constante, y la velocidad del rotor y la fuerza magnetomotriz es constante. En el caso de que la máquina tuviera devanados amortiguadores, en estado estacionario, no fluye corriente por ellas, por ello no influyen en las características de estado estacionario de la máquina. En el análisis de estado estacionario equilibrado al igual que el análisis de un circuito trifásico equilibrado, se puede trabajar como si hubiera un sistema de una sola fase.

Debido a que el entrehierro en los motores de polos salientes es mayor en los interpolos y menor en los polos. Esta geometría hace que las reluctancias magnéticas en las zonas respectivas sean diferentes, dando lugar a la f.m.m de reacción de inducido en el eje directo y cuadratura, que, a su vez, dan lugar a las reactancias de reacción del inducido del eje directo y cuadratura. Al sumar la reactancia de dispersión del inducido a cada una de estas reactancias se obtiene:

$$X_{sd} = X_{s\sigma} + X_{md} \quad ; \quad X_{sq} = X_{s\sigma} + X_{mq} \quad (4.4)$$

Donde:

- $X_{sd}$  representa la reactancia síncrona de eje directo.
- $X_{sq}$  representa la reactancia síncrona de eje en cuadratura.
- $X_{s\sigma}$  representa la reactancia de dispersión.
- $X_{md}$  representa la reactancia de reacción del inducido.

Siempre se cumple que  $X_{sd}$  es mayor que  $X_{sq}$ . De este modo la ecuación de equilibrio de tensiones en un motor de polos salientes sería de la forma:

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_o + R_s \cdot \vec{I}_s + jX_{sd} \cdot \vec{I}_{sd} + jX_{sq} \cdot \vec{I}_{sq} \quad (4.5)$$

De la última ecuación las intensidades  $\vec{I}_{sd}$  e  $\vec{I}_{sq}$  son las componentes de la corriente del estator  $\vec{I}_s$  en los ejes directo y de cuadratura.

En la Figura 45 se muestra la composición fasorial equivalente a la ecuación (4.3), donde la componente resistiva se ha dibujado en trazo fino por ser mucho menor frente a las caídas de tensión en las reactancias síncronas y en los cálculos siguientes se despreciará.

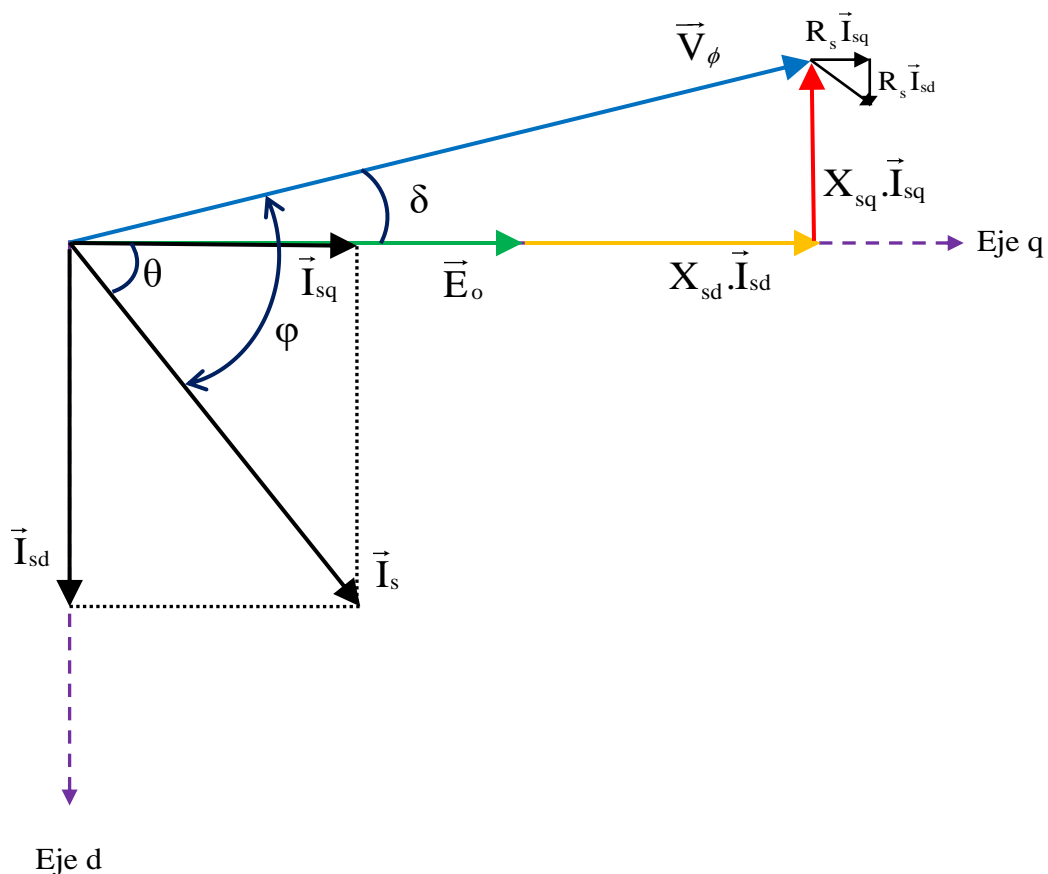


Figura 45. Diagrama fasorial de un motor síncrono de polos salientes.

Fuente: [13].

Para calcular la potencia mecánica producida por este motor, en ausencia de pérdidas, es igual a la potencia activa absorbida por el motor de la red de alimentación.

$$P_{\text{mec}} = 3V_{\phi} I_s \cos \varphi \quad (4.6)$$

Y considerando despreciable la caída de tensión en la resistencia, las proyecciones horizontal y vertical de las componentes de las tensiones son:

$$I_{\text{sd}} = \frac{V_{\phi} \cos \delta - E_o}{X_{\text{sd}}} ; \quad I_{\text{sq}} = \frac{V_{\phi} \text{sen} \delta}{X_{\text{sq}}} \quad (4.7)$$

Por otro lado, las proyecciones de las corrientes  $I_s$ ,  $I_{\text{sd}}$  e  $I_{\text{sq}}$  sobre la recta de tensión del estator  $V_{\phi}$ , se tiene:

$$I_s \cos \varphi = I_{\text{sq}} \cos \delta - I_{\text{sd}} \text{sen} \delta \quad (4.8)$$

Reemplazando la ecuación (4.5) en (4.6), se tiene:

$$I_s \cos \varphi = \frac{E_o \text{sen} \delta}{X_{\text{sd}}} + \frac{V_{\phi} (X_{\text{sd}} - X_{\text{sq}})}{2X_{\text{sd}} X_{\text{sq}}} \text{sen} \delta \quad (4.9)$$

Luego reemplazando (4.7) en (4.4), se tiene:

$$P_{\text{mec}} = 3 \frac{V_{\phi} E_o \text{sen} \delta}{X_{\text{sd}}} + 3 \frac{V_{\phi}^2 (X_{\text{sd}} - X_{\text{sq}})}{2X_{\text{sd}} X_{\text{sq}}} \text{sen} 2\delta \quad (4.10)$$

Finalmente se sabe que:



$$\begin{aligned}
 P_{\text{mec}} &= T \cdot \omega \\
 T &= \frac{P_{\text{mec}}}{\omega_s / p} \\
 T &= 3p \frac{V_\phi E_o \text{sen} \delta}{\omega_s X_{sd}} + 3p \frac{V_\phi^2 (X_{sd} - X_{sq})}{2\omega_s X_{sd} X_{sq}} \text{sen} 2\delta \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

De la última expresión se deduce que el **par electromagnético**, también llamado **par motor** o **torque**, tiene dos componentes: el primer sumando es el **par síncrono** y que es proporcional al  $\text{sen} \delta$ , al igual que en las máquinas de rotor liso; pero existe otro sumando que es proporcional a  $\text{sen} 2\delta$ , que se denomina **par de reluctancia** debido a las diferentes reactancias que tiene este tipo de motor en los ejes directo y cuadratura.

#### 4.6.1 Curva de capacidad de una máquina síncrona

A partir del circuito equivalente de un motor síncrono de la Figura 40, si las magnitudes de voltaje  $V_\phi$  y corriente  $I_s$  son limitados, la curva de capacidad de la máquina síncrona es muy similar a la de una máquina de corriente continua con excitación independiente. En la región donde la velocidad es menor que la velocidad base,  $\omega_b$ , conocida como la región de torque constante. Si  $R_s$  es mucho menor que  $\omega_e L_s$ , el diagrama fasorial de la operación de **máximo torque por amperio** de la Figura 46 puede ser dibujado para esta región de operación.

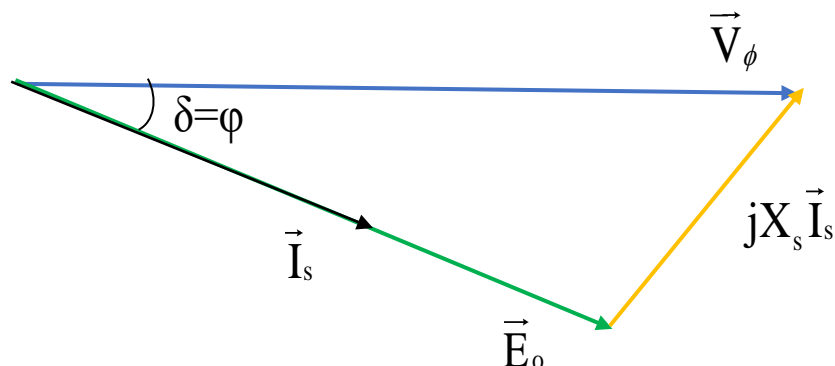


Figura 46. Diagrama fasorial en la operación de máximo torque por amperio.

Fuente: [11].

Por lo general para obtener el máximo torque por amperio, la fase de la corriente del estator  $\vec{I}_s$  debe estar en fase con la de  $\vec{E}_o$  como se muestra en la Figura 46. En este tipo de operación el factor de potencia siempre está en retraso añade [11].

Ahora por encima de la velocidad base,  $\omega_b$ , si  $I_F$  se tiene controlado a su valor nominal, entonces el voltaje en terminales de la maquina estaría por encima de la nominal, que es el valor límite de la máquina. Por lo tanto, para mantener el voltaje en terminales de la maquina igual a su valor limitado  $V_\phi = V_{lim}$ , la corriente de campo debe reducirse de acuerdo con la velocidad del motor, por encima de la velocidad base. En esta región donde la corriente de campo debe ser reducido,  $R_s$  es suficientemente pequeño comparado con  $\omega_e L_s$  y la caída de tensión provocado por  $R_s$  puede despreciarse. Además, se pueden despreciar las perdidas en el cobre, incluso las perdidas en el hierro, haciendo que la potencia de la maquina sea igual que la potencia de entrada.

Bajo estos supuestos, para obtener para obtener el torque máximo por amperio, limitando el voltaje y la corriente, el factor de potencia de la maquina debe mantenerse en uno. El diagrama fasorial para esta región de operación es la que se muestra en la Figura 47 .

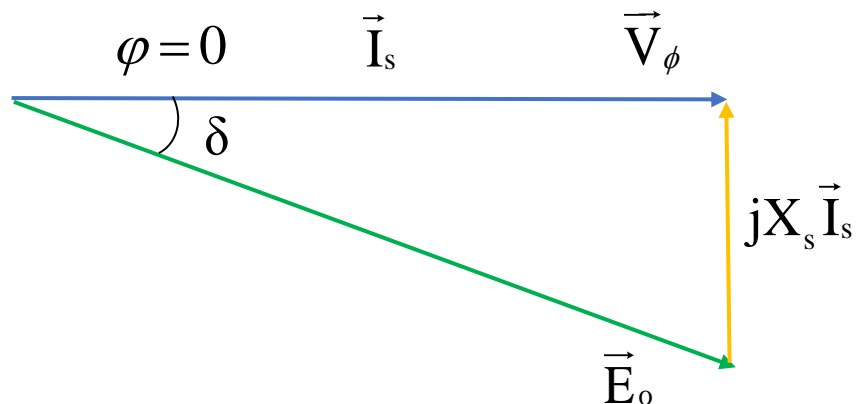


Figura 47. Operación de máximo torque por amperio de motor síncrono de polos lisos con el devanado de campo en condiciones de tensión y corriente limitadas.

Fuente: [11]

Con el aumento de  $\omega_e$ ,  $I_F$  debería reducirse para mantener la forma del diagrama fasorial de la Figura 47. En esta operación el flujo en el entrehierro de la maquina disminuye tanto como aumente la velocidad y el torque máximo disponible disminuye inversamente proporcional a la velocidad, esta región es denominado como la región de debilitamiento de campo.

Entre esta región de debilitamiento del campo y la región operativa de torque constante descrita anteriormente, hay una breve región operativa donde el ángulo del factor de potencia  $\varphi$ , decrece de  $|\delta|$  a nulo. En esta región de operación, la tensión y la corriente se encuentran en sus valores límite ( $\vec{V}_\phi = V_{lim}$  ;  $|\vec{I}_s| = I_{lim}$ ) mientras el ángulo del factor de potencia varía de acuerdo a la velocidad operativa del motor,  $\omega_e$ . El torque en esta región también decrece, pero no exactamente inversamente proporcional a la velocidad.

A diferencia de una máquina de corriente continua con excitación independiente, en la maquina síncrona no existe problemas de conmutación, lo que permite obtener el torque inversamente proporcional a la velocidad, hasta cuando ocurran problemas mecánicos debido a la fuerza centrífuga.

Después de considerar las características anteriores del control de torque constante y el control de debilitamiento de campo, se puede dibujar la curva de capacidad alrededor de una máquina síncrona con devanado de campo separado, como se muestra en la Figura 48.

Debido a que la potencia de salida mecánica es el producto del par y la velocidad, la potencia de salida es constante en la región general de debilitamiento del campo. En el caso de una máquina síncrona de polos salientes, se puede dibujar la curva de capacidad similar, pero en este caso cabe señalar que existe otro par que proviene de la diferencia de reluctancia.

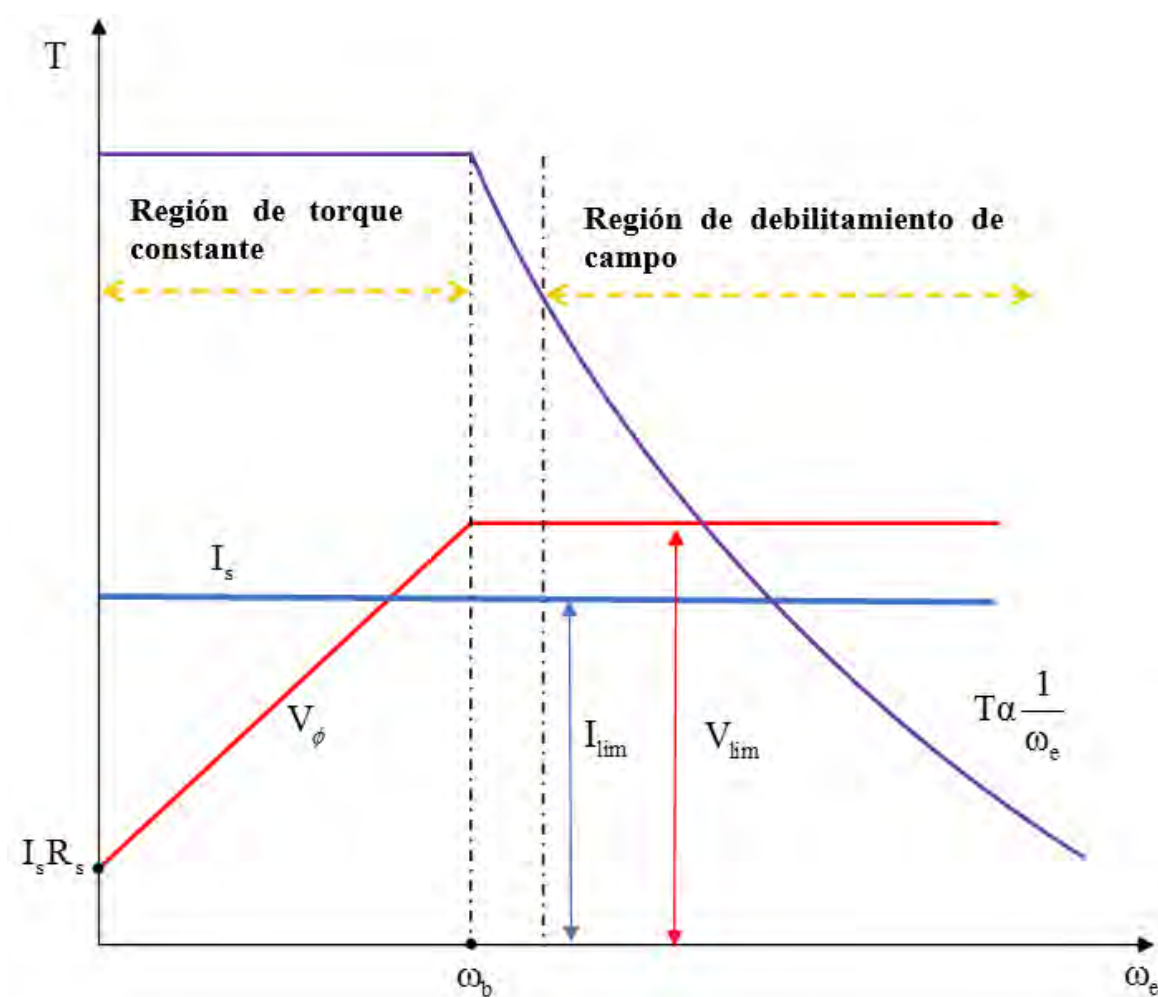


Figura 48. Curva de capacidad de una máquina síncrona de rotor liso.

Fuente: Adaptado de [11].

## 4.7 Comportamiento general del motor anillo bajo carga

En esta sección se muestra el comportamiento de un motor anillo en estado estacionario.

### 4.7.1 Corrientes de fase

El motor síncrono cuenta con dos devanados trifásicos en el estator y cada una conectado en estrella, es decir, cuenta con seis fases. Lo que da como resultado seis corrientes de fase, ver Figura 49.

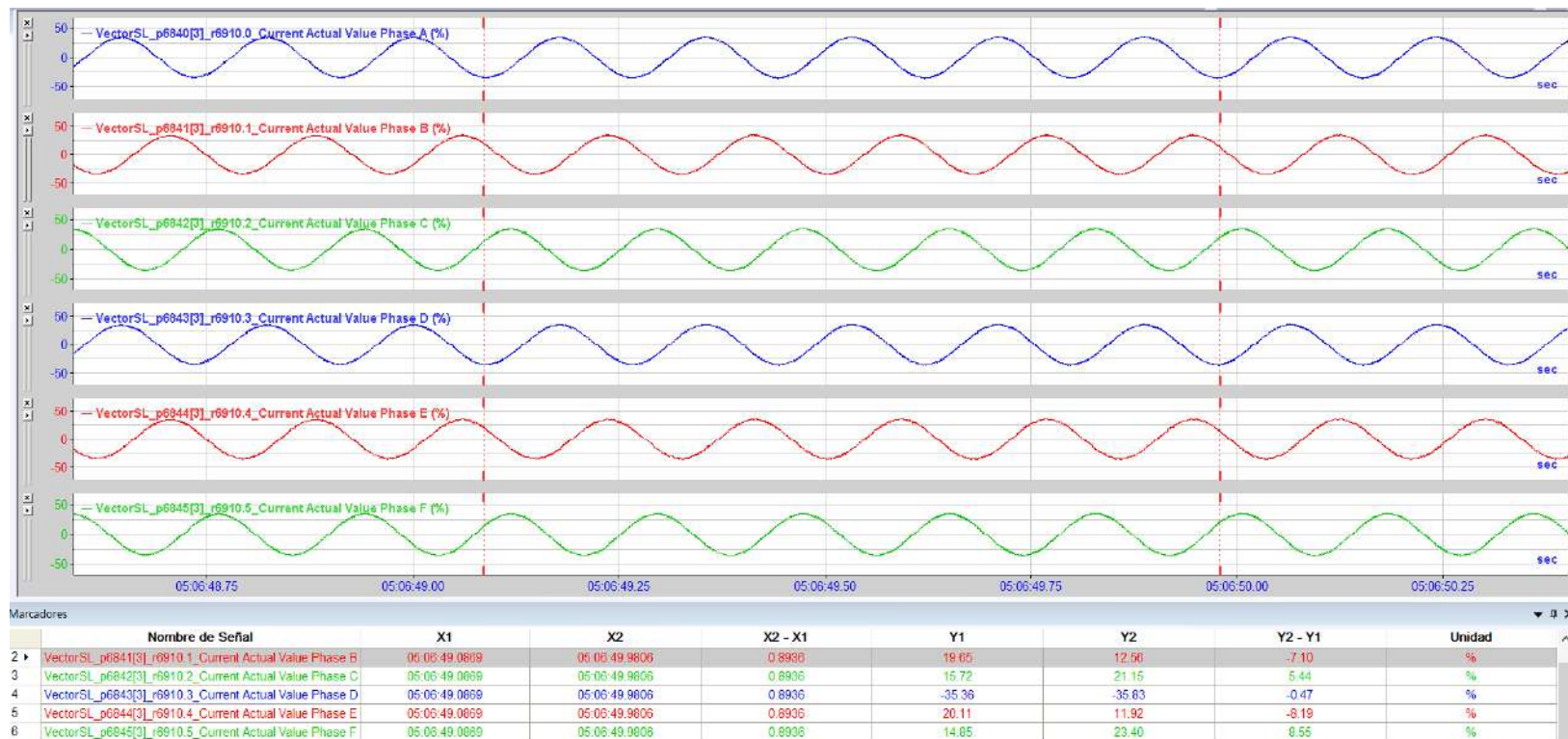


Figura 49. Corrientes de fase en el estator de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5]

#### 4.7.2 Tensiones de fase

Debido a que sólo se cuenta con tres AVT's de voltaje, es posible obtener las formas de onda de las tensiones de fase A, B y C.

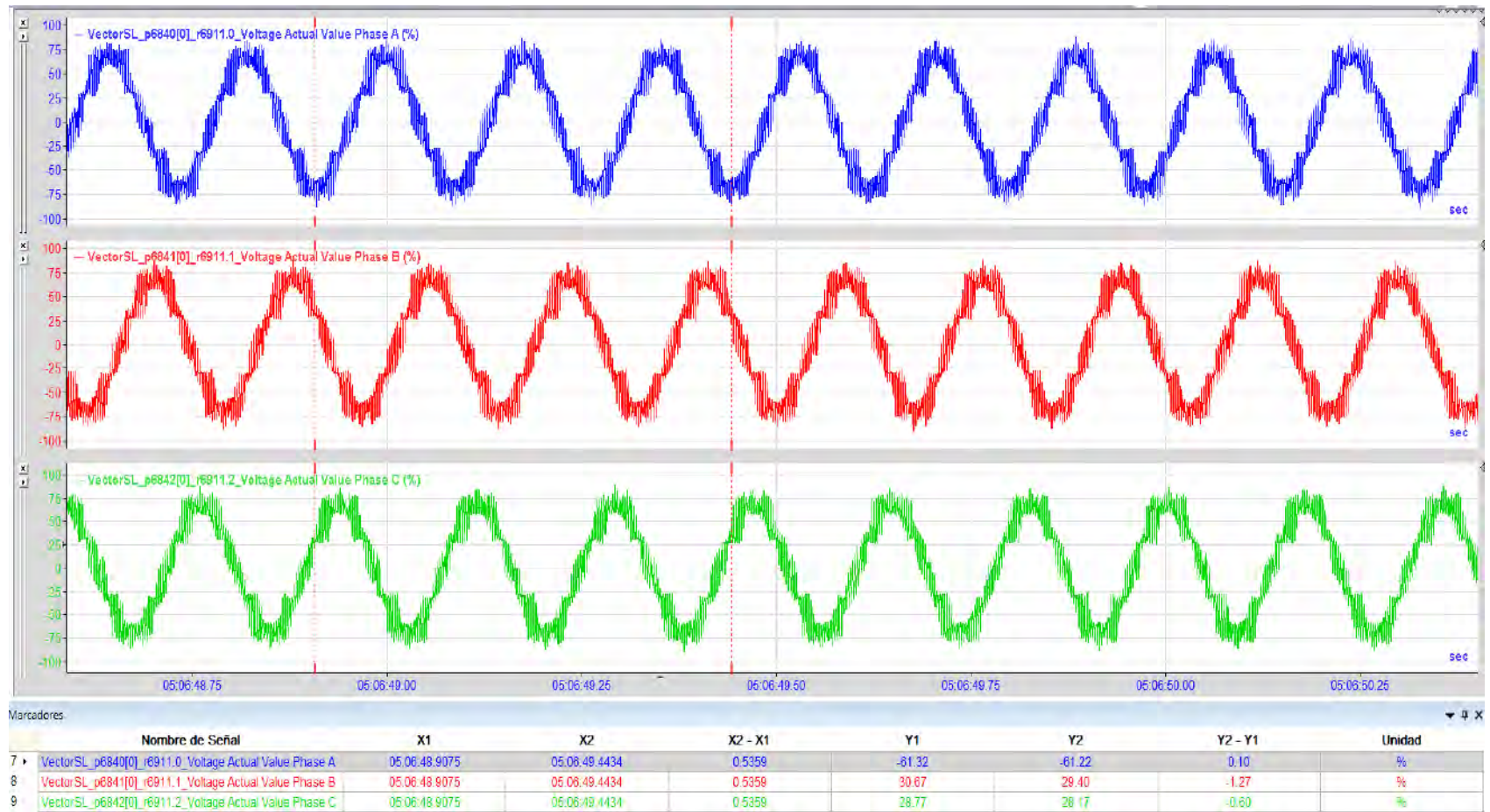


Figura 50. Voltajes de fase en el estator de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5]

### 4.7.3 Corrientes y voltajes de fase:

Implementar dos devanados trifásicos en el estator, implica construirlos con características físicas muy similares, para que se pueda dar el proceso de conversión de energía eficientemente.

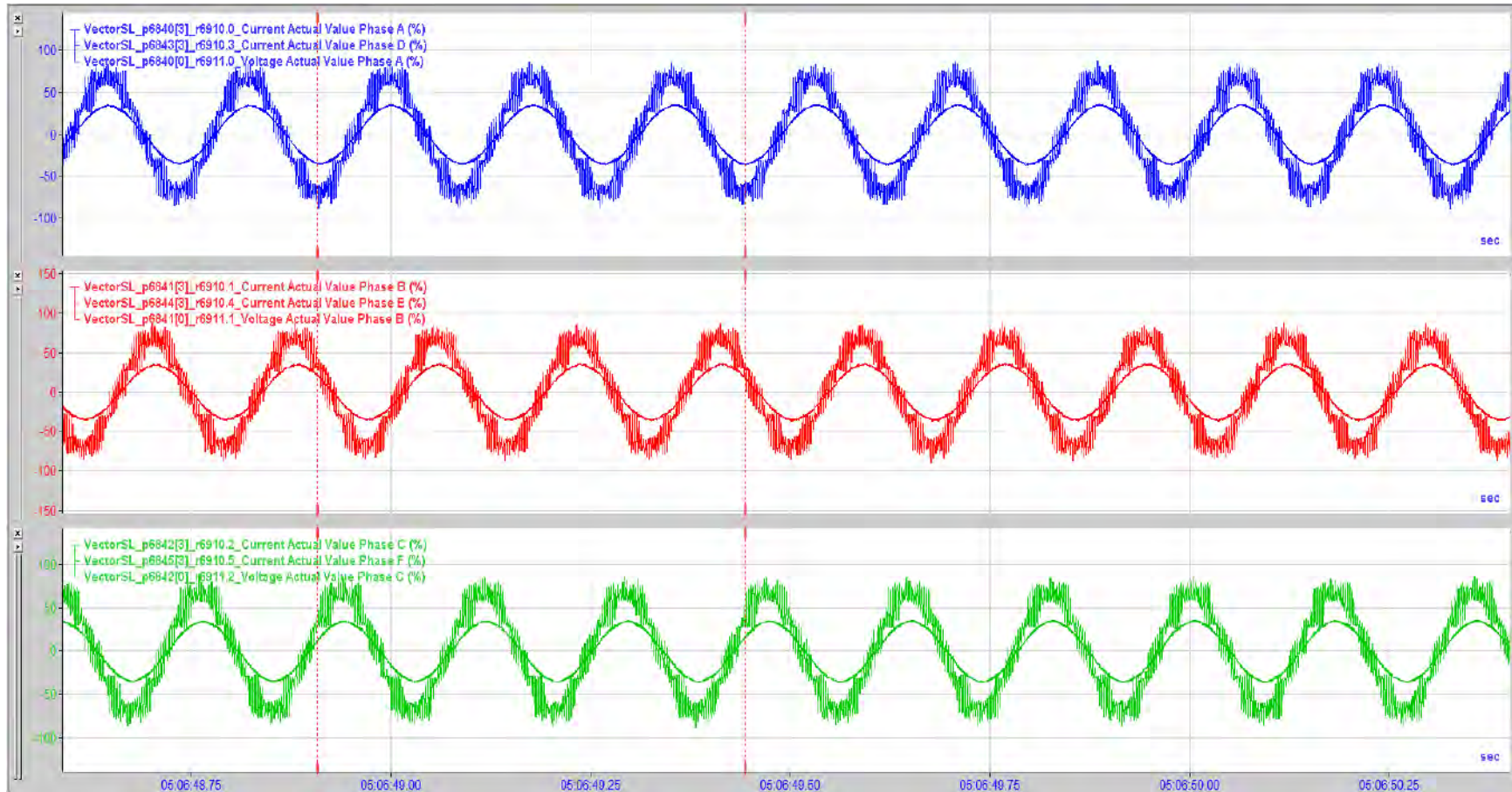


Figura 51. Voltajes y corrientes en el estator de un motor de anillo de 24 MW.

Fuente: [5]

#### 4.7.4 Voltaje y corriente de excitación:

El voltaje y la corriente de campo tienen valores que oscilan en rangos muy pequeños a diferencia de los de armadura. Es así que, para el voltaje sus valores varían entre 95.8 y 96.2 % y para la corriente entre 82.3 y 83.5%, ver Figura 52.

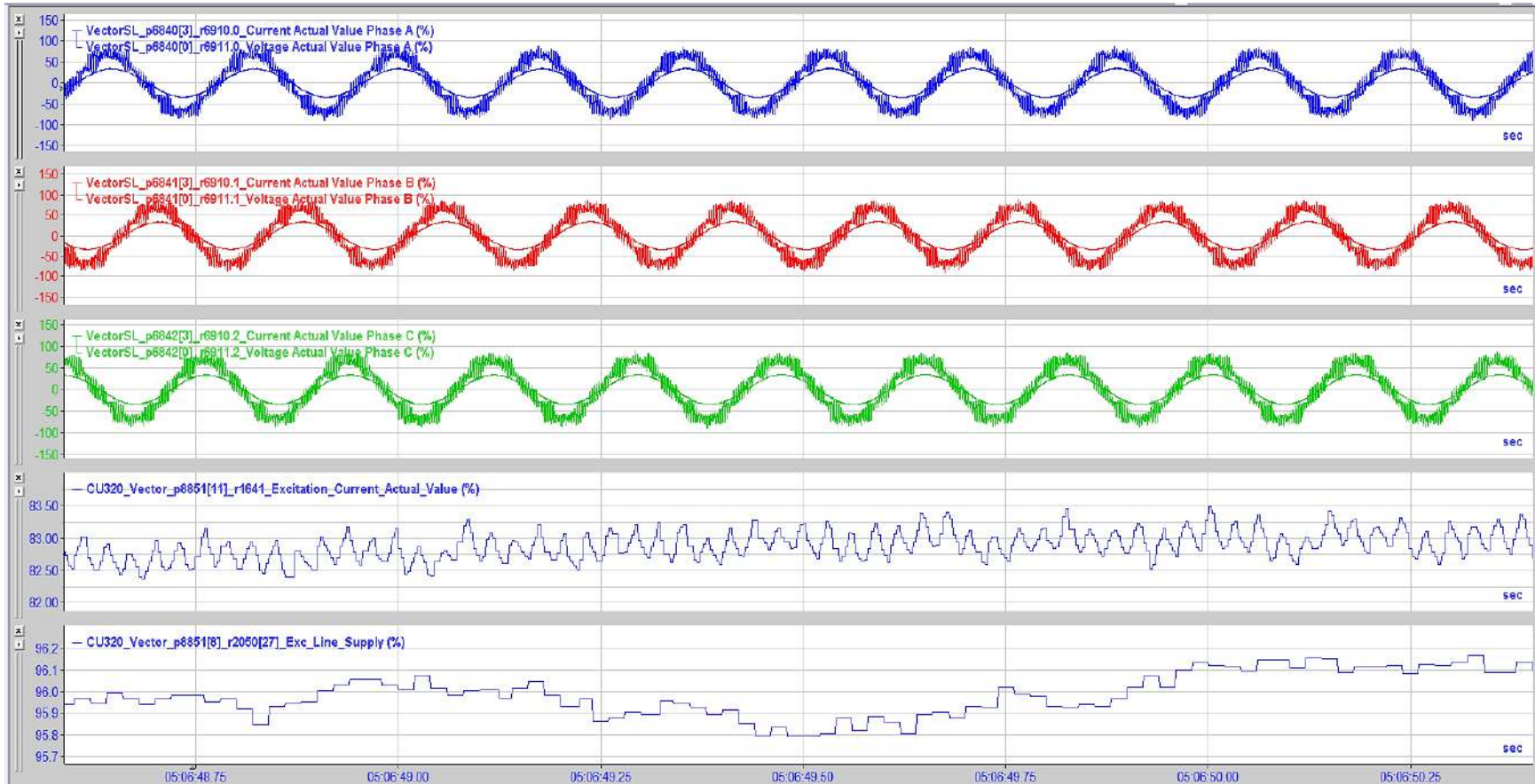


Figura 52. Voltajes y corrientes en el estator y rotor de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5]



#### 4.7.5 Potencia activa, reactiva y aparente del motor anillo:

Gracias al control vectorial que tiene implementado estas máquinas, es posible mantener al mínimo los valores de la potencia reactiva y aprovechar en lo posible toda la potencia aparente.



Figura 53. Potencias de un motor síncrono de 24 MW.

Fuente: [5]

Aplicando el factor de conversión de 401.63 a los valores de las potencias en la figura anterior, se obtienen los valores reales en kW, ver

Figura 54.

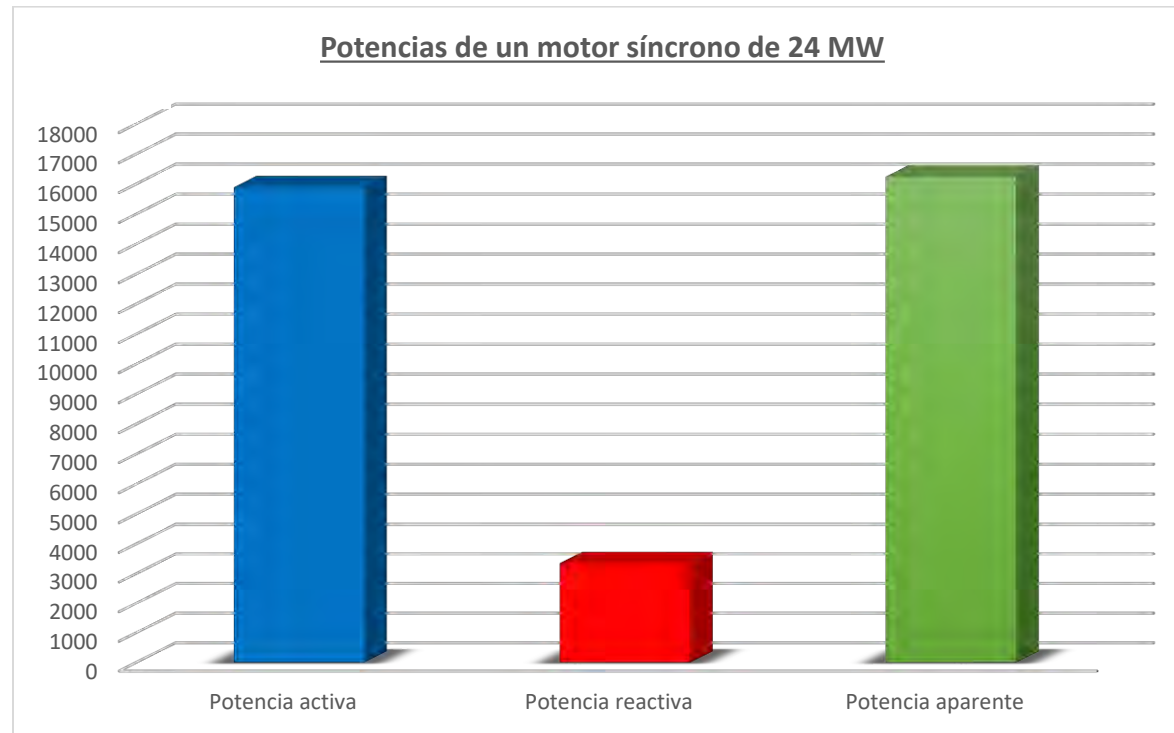


Figura 54. Consumo de potencias de un motor síncrono de 24 MW.

Fuente: elaboración propia.

#### 4.7.6 Factor de potencia:

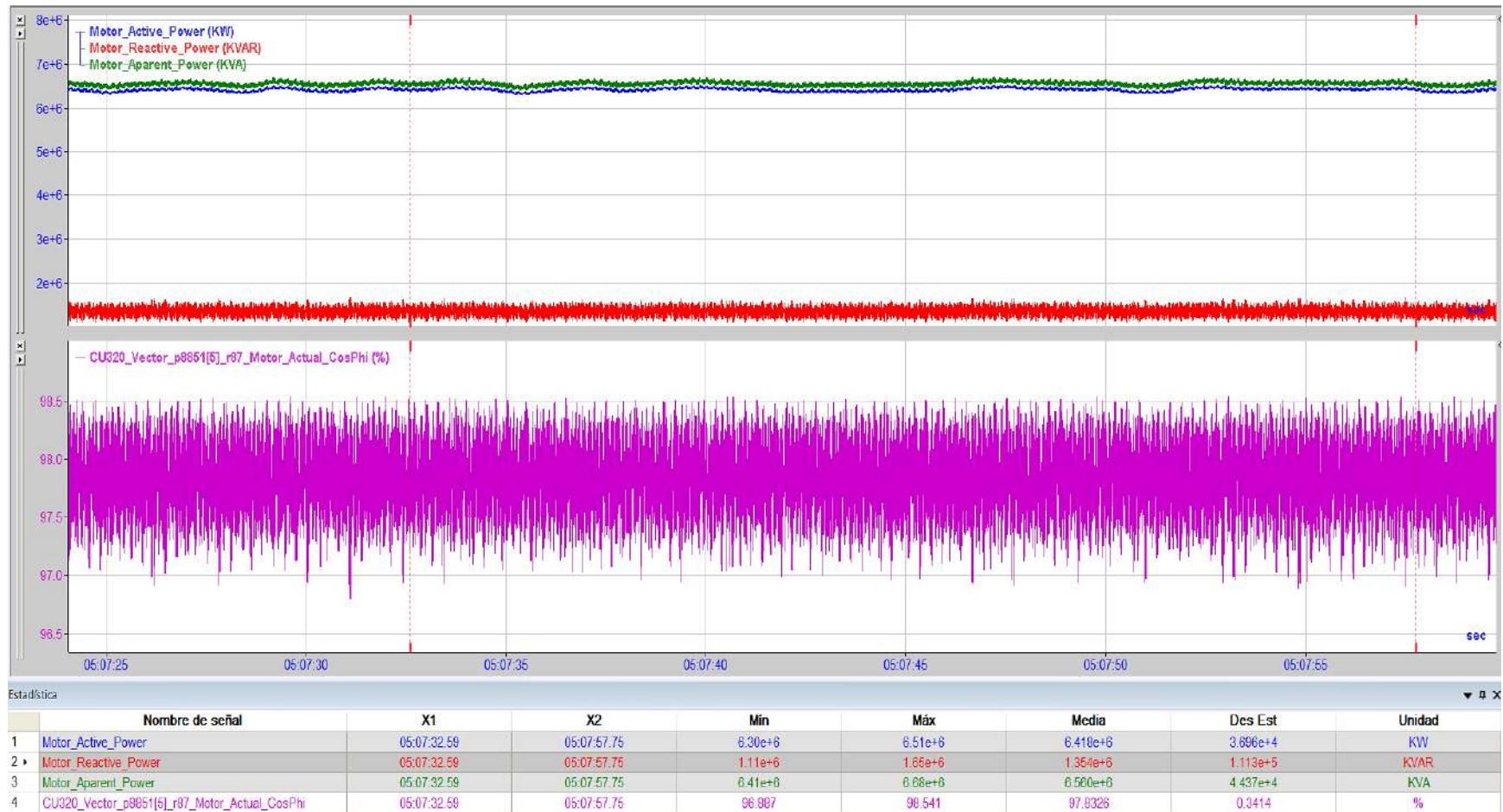


Figura 55. Potencias y factor de potencia de un motor anillo de 24 MW.

Fuente: [5]

#### 4.7.7 Parada de un motor anillo

Se tiene dos modos de parada del molino; la parada normal con una rampa de velocidad de 40 segundos y la parada rápida en 20 segundos.



Figura 56. Parada normal del molino Sag.

Fuente: [5]

#### 4.7.8 Consumo de energía de los tres motores anillo

En Antapaccay se tienen instalados medidores de energía en cada alimentador de cada motor en la barra de 33 kV, registrando el consumo de todo el circuito del estator de cada molino.

En lo que sigue, se detalla el consumo de los tres motores de anillo; en horas punta y fuera de ellas. Así mismo se muestra el porcentaje que representa en consumo comparado con el consumo del resto de la operación en Antapaccay (No se considera a Tintaya).

##### 4.7.8.1 Molino Sag

Consumo de energías y máxima demanda.

Tabla 9  
*Consumo de energía del molino Sag.*

| <b>EAHP (KWh)</b> | <b>2750867.11</b> |
|-------------------|-------------------|
| EAHFP (kwh)       | 13278264.92       |
| TOTAL (KWh)       | 16029132.03       |
| ER Inductiva      | 15025059.40       |
| ER Capacidad      | 296.24            |
| MD (KW)           | 24947.94          |

Nota. Compañía Minera Antapaccay S.A.

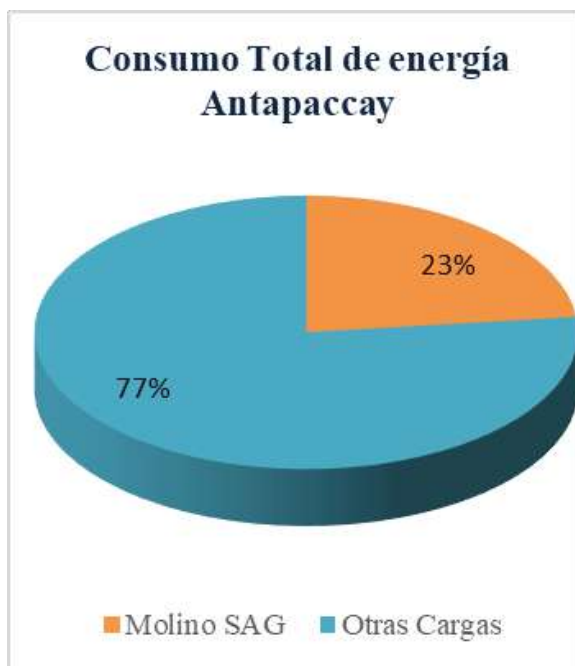


Figura 57. Energía consumida por el motor síncrono de 24 MW del Sag en agosto 2020.

Fuente: [5]



Figura 58. Energía consumida por el motor síncrono de 24 MW del Sag en horas punta y fuera de ella, agosto 2020.

Fuente: [5]

#### 4.7.8.2 Molino de Bolas 1

Consumo de energía y máxima demanda:

Tabla 10

*Consumo de energía Molino de Bolas*

| <b>EAHP (KWh)</b> | <b>2028592.04</b> |
|-------------------|-------------------|
| EAHFP (kwh)       | 9682837.16        |
| TOTAL (KWh)       | 11711429.20       |
| ER Inductiva      | 11055260.76       |
| ER Capacidad      | 0.28              |
| MD (KW)           | 16816.90          |

fuelle: Compañía Minera Antapaccay S.A.

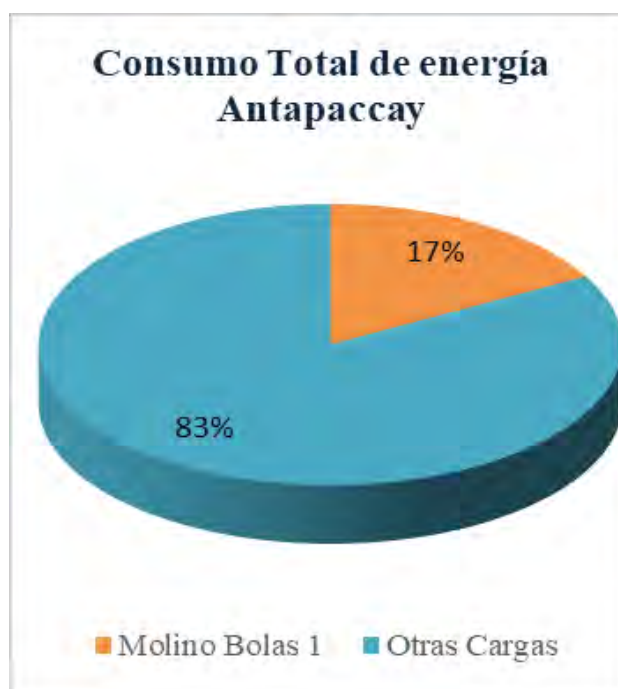


Figura 59. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 1 en agosto 2020.

Fuente: [5]



Figura 60. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 1 en horas punta y fuera de ella, agosto 2020

Fuente: [5]

#### 4.7.9 Molino de Bolas 2

Consumo de energías y máxima demanda

Tabla 11

*Consumo de energía y máxima demanda.*

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| <b>EAHP (KWh)</b> | <b>1976701.36</b> |
| EAHFP (kwh)       | 9436577.91        |
| TOTAL (KWh)       | 11413279.27       |
| ER Inductiva      | 10858628.06       |
| ER Capacidad      | 10.23             |
| MD(KW)            | 16393.78          |

Fuente: Compañía Minera Antapaccay S.A.



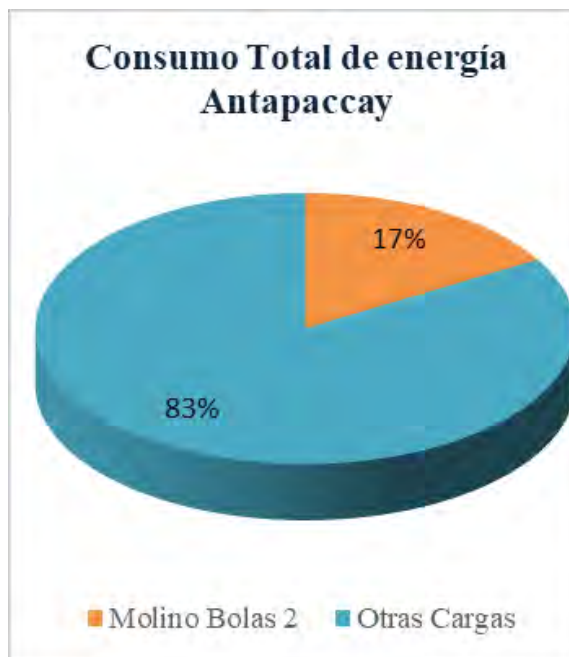


Figura 61. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 2 en agosto 2020.

Fuente: [5]



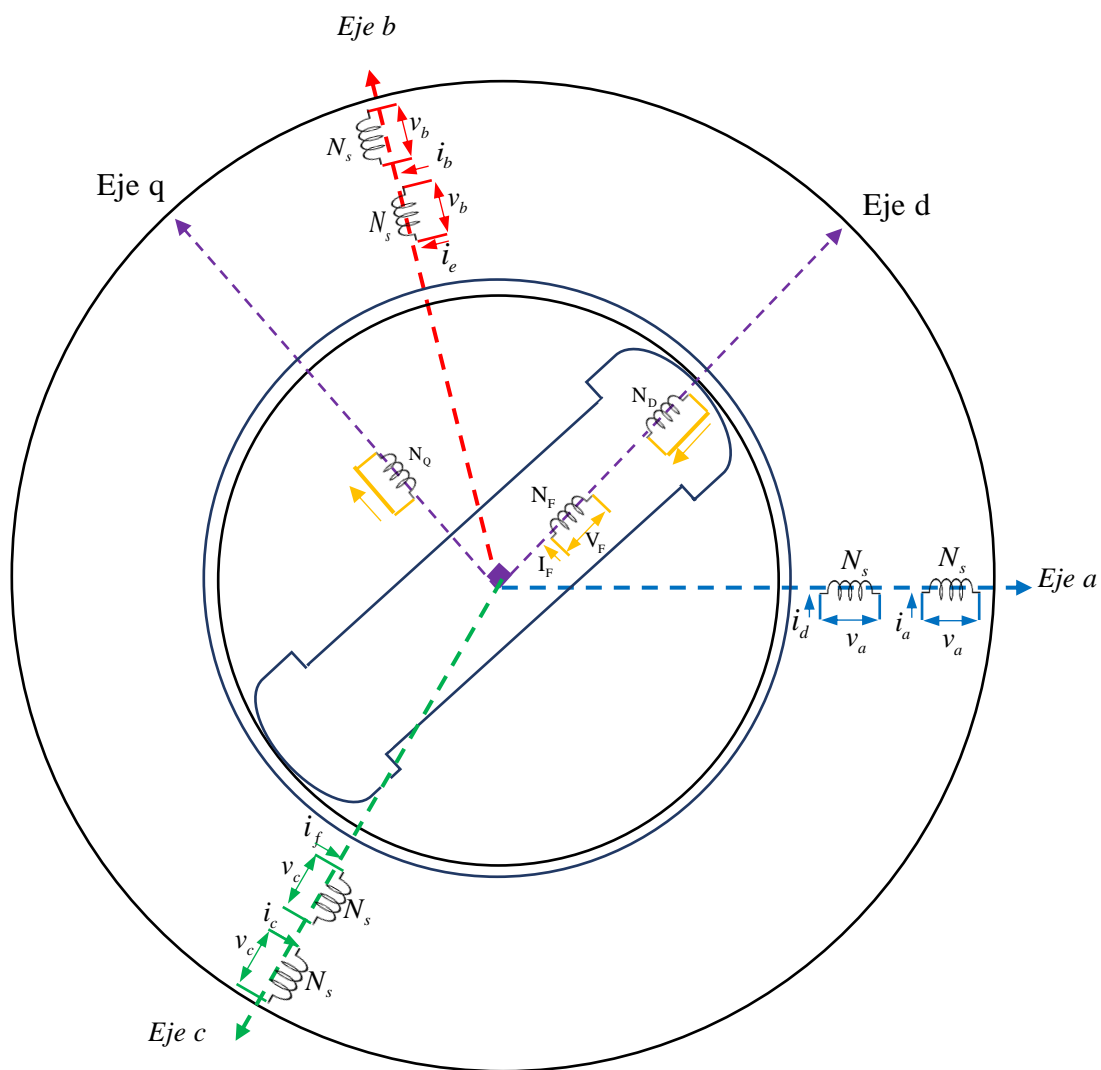
Figura 62. Energía consumida por el motor síncrono de 16.4 MW del Bolas 2 en horas punta y fuera de ella, agosto 2020.

#### 4.8 El motor síncrono de polos salientes en régimen transitorio

Una máquina síncrona trifásica se puede modelar generalmente como se muestra.

##### 4.8.1 Representación esquemática de un motor síncrono de doble devanado estatórico.

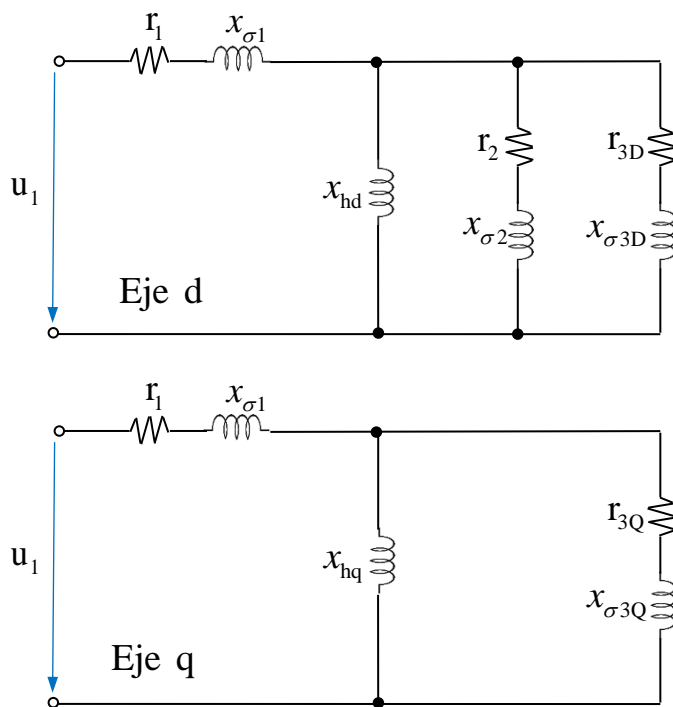
A continuación, se presenta el modelo de fases de la maquina Síncrona.



Donde:

|              |   |
|--------------|---|
| $Eje\ a$     | Eje magnético de la bobina $a$ .                    |
| $Eje\ b$     | Eje magnético de la bobina $b$ .                    |
| $Eje\ c$     | Eje magnético de la bobina $c$ .                    |
| Eje $d$      | Eje directo   |
| Eje $q$      | Eje cuadratura                                      |
| $N_S$        | Número de vueltas por fase del devanado estatórico. |
| $N_F$        | Número de vueltas de la bobina de campo.            |
| $N_D$        | Número de vueltas de la bobina D.                   |
| $N_Q$        | Número de vueltas de la bobina Q.                   |
| $v_{abc}$    | Tensiones de fase.                                  |
| $i_{abcdef}$ | Corrientes de fase.                                 |
| $V_F$        | Voltaje de campo.                                   |
| $I_F$        | Corriente de campo.                                 |

#### 4.8.2 Diagrama del circuito equivalente típico de un motor de anillo.



Donde:

$r_1$  Resistencia síncrona.

$r_2$  Resistencia síncrona.

$x_{\sigma 1}$  Reactancia de dispersión.

$x_{\sigma 2}$  Reactancia de dispersión.

$x_{hd}$  Reactancia del entrehierro en el eje d.

$x_{hq}$  Reactancia del entrehierro en el eje q.

$r_{3D}$  Resistencia síncrona.

$r_{3Q}$  Resistencia síncrona.

$x_{\sigma 3D}$  Reactancia de dispersión.

$x_{\sigma 3Q}$  Reactancia de dispersión.

## **4.9 Trabajos de mantenimiento**

Todos los trabajos de mantenimiento realizados al motor síncrono, deben cumplir las consignas de seguridad establecidos en los estándares de Antapaccay para el trabajo seguro en y con máquinas eléctricas.

Todo personal de mantenimiento, previo a realizar una actividad de mantenimiento en cuales quiera de sus vertientes, tenemos la obligación de identificar los peligros y evaluar los controles, buscando lograr cero daños en la ejecución del trabajo. Estos peligros, riesgos y sus controles tienen que ser plasmados en formatos ya establecidos por Antapaccay:

- Iperc-continuo.
- Permiso de trabajo en o cerca de partes con energía eléctrica
- Permiso de trabajo en espacios confinados.
- Permiso de trabajo en altura.
- Permiso para operaciones de izaje.

El uso de todos o dos de ellos, dependerá del tipo de mantenimiento a realizar. Cabe mencionar que el trabajo a realizarse deberá estar incluido en el programa de mantenimiento.

### **4.9.1 Reglas de tolerancia cero**

En Compañía Minera Antapaccay con la finalidad de preservar la integridad de los trabajadores se han establecido trece (13) RTC, las cuales son de cumplimiento obligatorio y su incumplimiento será considerado como una falta grave. Estas reglas son:

1. Está prohibido venir a trabajar bajo el efecto de alcohol o drogas ilícitas.
2. Es obligatorio el uso de equipo crítico de seguridad, diseñados para prevenir lesiones que amenacen la vida.

3. Es obligatorio el uso de equipo de protección contra caídas para realizar trabajos por encima de 1.8 m.
4. Está prohibido conducir vehículos si no se cuenta con la capacitación y autorización respectiva.
5. Es obligatorio cumplir con el procedimiento de aislamiento y bloqueo cuando se trabaje con fuentes de energía.
6. Es obligatorio respetar los dispositivos de protección de seguridad, estando prohibido modificarlos, retirarlos, evitarlos o anularlos.
7. Está prohibido ingresar a zonas de tránsito de equipos móviles si no se cuenta con la debida autorización.
8. Está prohibido ingresar a zonas de peligro como: áreas restringidas y espacios confinados si no se cuenta con la debida autorización, o ubicarse bajo cargas suspendidas, los equipos de levante deben ser usados dentro de sus parámetros de diseño.
9. Es obligatorio comunicar de inmediato al supervisor la ocurrencia de un incidente, y todo acto o condición que ponga en riesgo la vida de las personas.
10. Minería Subterránea: Ingresar SOLO a áreas y labores donde el terreno es estable y para las cuales este autorizado; SIEMPRE verificar: ventilación, desate de roca y sostenimiento.
11. Uso de Explosivos: Manipular explosivos solo si se está autorizado y siguiendo los procedimientos.
12. Apto para el trabajo: Realizar una tarea solo si se está médica, emocional y físicamente apto y capacitado para el trabajo.

13. Está prohibido el uso de celulares u otros dispositivos electrónicos de entretenimiento mientras se opere equipos, se conduzca vehículos o se ejecuten tareas que impliquen riesgo para la integridad de las personas.

#### **4.9.2 Requisitos mínimos de equipos de protección personal para trabajos eléctricos.**

Los equipos de protección personal requeridos para realizar trabajos eléctricos dependerán de la evaluación del riesgo y estará compuesto como mínimo por:

- Guantes de caucho Clase 0 (1000V) con protector de cuero.
- Ropa resistente al arco eléctrico NFPA 70E, será de acuerdo a la energía incidente del lugar y como mínimo deberá tener las siguientes características:
- Casaca térmica resistente al arco eléctrico, nivel de protección para riesgo categoría 4 – 40.4 cal/cm<sup>2</sup>.
- Camisa resistente al arco eléctrico, nivel de protección para riesgo categoría 2 – 11.0 cal/cm<sup>2</sup>.
- Pantalón resistente al arco eléctrico, nivel de protección para riesgo categoría 2 – 11.0 cal/cm<sup>2</sup>.
- chaleco resistente al arco, protección categoría 2 - 8.9 cal/cm<sup>2</sup>.
- Zapatos dieléctricos/aislantes.
- Lentes de seguridad. ANSI Z87.1
- Casco dieléctrico antichoque con barbiquejo. CSA Z94.1-15 TYPE 1 CLASE E.
- Careta para arco eléctrico ANSI Z87.1.
- Equipo de protección auditiva ruidos por encima de 80 Db.
- Protector Solar FPS 50+.
- Equipo de protección personal respiratoria contra el Covid 3M8801

### **4.9.3 Recomendaciones de seguridad para el personal de mantenimiento**

#### **4.9.3.1 Fuentes de energía eléctrica y mecánica.**

Antes de comenzar los trabajos de mantenimiento es imprescindible cumplir con el procedimiento de aislamiento y bloqueo del equipo ya sea en caja grupal o en la caja multibloqueo. En la identificación de las fuentes de energía a eliminar, además de los circuitos principales, prestar atención a los circuitos accesorios o auxiliares como son los frenos que aseguran que el molino no gire repentinamente.

#### **4.9.3.2 Enfriamiento de la máquina**

Tener cuidado con los elementos calientes de la máquina, se pueden sufrir quemaduras. Deje que se enfríen antes de comenzar los trabajos de mantenimiento abriendo las ventanas de ingreso al motor.

#### **4.9.3.3 Limpieza con aire comprimido**

En caso de limpiar los elementos de la máquina con aire comprimido, se precisa un sistema de extracción adecuado, así como un equipo de protección personal apropiado, como gafas, guantes o traje de protección. Es obligatorio usar respirador con filtro para partículas N95.

##### **Limpieza con sustancias químicas**

Cuando emplee detergentes químicos, respete las notas de advertencia y de empleo indicadas en la hoja de datos de seguridad correspondiente.

Asegúrese de usar guantes de nitrilo y respirador con filtro para partículas P100.

### **4.9.4 Intervalos de mantenimiento**

Revisiones cuidadosas permiten detectar y corregir a tiempo posibles anomalías antes de que puedan evolucionar y dar lugar a daños importantes. Así pues, esto contribuye a conservar el



valor de la máquina, evitar fallos de funcionamiento costosos y aumentar la fiabilidad y la disponibilidad.

Puesto que se desconoce en qué condiciones se utilizará la máquina síncrona, se recomiendan intervalos de mantenimiento conservadores con referencia a lo propuesto por el manual de mantención de SIEMENS.

Bajo este criterio, en Antapaccay se tiene establecido el siguiente programa de mantenimiento: cada 45 días una parada menor de 18 h y cada 6 meses una parada mayor de 36 horas de duración en promedio.

#### **4.9.5 Distribución en media tensión.**

Transformadores del cicloconvertidor y excitación

- Inspección visual detallada del aceite del transformador.
- Comprobar visualmente las conexiones del transformador.
- Prueba del dispositivo de alivio de presión.
- Mover el conmutador de nivel de tensión.
- Comprobar la conexión a tierra del transformador.
- Comprobar la resistencia de aislamiento del transformador.

Cicloconvertidor sin fusibles, refrigerado por agua

- Comprobación visual de los módulos de fases del cicloconvertidor.
- Verificar que las tuberías de enfriamiento no tengan fugas.
- Comprobar el ajuste de las conexiones de los módulos de fase.

Rectificador de excitación

- Comprobar si el rectificador tiene suciedad.
- Comprobar el funcionamiento del ventilador filtros de aire.

- Comprobar el ajuste de las conexiones del rectificador.

Intercambiador de calor del cicloconvertidor

- Comprobar la conmutación de las bombas de enfriamiento.
- Verificar que las tuberías de enfriamiento no tengan fugas.

#### **4.9.6 Distribución en baja tensión**

Centro de control de motores (Sivacon)

- Revisar la limpieza de los cubículos.
- Probar el accionamiento de los relés de sobrecarga.
- Revisión de las conexiones de los cubículos.
- Verificar el correcto funcionamiento de los interruptores y otros componentes.

Circuitos de protección

- Probar los relés de sobrecorriente y protección diferencial de los transformadores del cicloconvertidor.
- Probar el relé de protección de sobrecorriente del transformador de excitación.
- Probar la protección diferencial del cicloconvertidor y motor.
- Probar el relé de protección contra falla a tierra (Bender)
- Verificar la supervisión del entrehierro del motor.

#### **4.9.7 Fuente de alimentación de emergencia**

Cargador de baterías y distribución

- Comprobación visual del cubículo del cargador de baterías.
- Registro de voltaje de las celdas de la batería.
- Prueba de capacidad de las baterías.
- Revisión de conexiones del cargador y banco de baterías.

Alimentación del UPS y distribución

- Realizar la prueba de funcionamiento del UPS.

#### **4.9.8 Sistema de accionamiento**

Motor síncrono

- Realizar la medición del entrehierro de la máquina.
- Prueba de resistencia de aislamiento de los devanados del estator y rotor.
- Comprobar si hay daños mecánicos.
- Revisar la limpieza del interior del motor.
- Comprobar el ajuste de los neutros del devanado estatórico.
- Revisar el ajuste de los instrumentos en el interior del motor.

Fundación

- Comprobar visualmente la fundación.
- Revisión de los pasadores.
- Comprobación de los pernos de cimentación del estator.
- Comprobar las cuñas del estator.
- Revisar la disposición de las cuñas.

Alojamiento del estator

- Revisar las costuras de soldadura de la carcasa del estator.
- Verificar si hay vibraciones durante el funcionamiento normal.
- Comprobar que los pernos de unión de los segmentos del estator estén correctamente ajustados.
- Comprobar la soldadura en las juntas del segmento del estator.
- Comprobar la soldadura en la viga guía.

#### Bobinados del estator

- Revisión de las bobinas del estator.
- Verificación del ajuste de los cables de conexión a tres anillos rozantes..
- Comprobación de la condición de las cabezas de bobina.
- Comprobación de la condición de las cuñas.

#### Rotor

- Comprobación de las juntas de soldadura del segmento del polo.
- Comprobación de los elementos de montaje de la bobina del polo.
- Comprobación de los pernos de ajuste del segmento polar.

#### Anillo colector

- Comprobación de la superficie del anillo rozante.
- Comprobación de las juntas de transición del anillo rozante.
- Comprobación del elemento de fijación del anillo rozante.
- Comprobación de las barras de conexión y cableado del anillo rozante.

#### Portaescobillas

- Comprobar el alineamiento y fijación del portaescobillas.
- Comprobar el estado de los resortes.
- Verificar la conexión del cable.

#### Sellado del motor

- Comprobación de la fijación de la pantalla.
- Revisión de las cubiertas de los bobinados para ver si hay vibraciones.
- Inspección del anillo de estanqueidad.

- Comprobación del sello de goma.
- Inspección del sello de cepillo.
- Comprobación de las juntas.

#### Sistema de enfriamiento del motor

- Inspección del intercambiador de calor aire-agua.
- Inspección de los ventiladores de enfriamiento.
- Engrase de los rodamientos del motor del ventilador.
- Inspección de fugas en el filtro de aire.
- Pruebas de las válvulas de bloqueo.

#### Calefactores anti-condensación

- Comprobar la fijación, limpieza y funcionamiento.

#### Equipos de monitoreo del motor

- Inspección de los sensores de entrehierro.
- Inspección del disco del tacómetro.
- Comprobación de los transductores del tacómetro (módulo Sick)

#### Conexiones eléctricas del motor

- Comprobación de los cables de conexión del devanado estático.
- Comprobación de los cables de conexión del devanado de campo.

#### Inventario general del sistema Gearless

- Inventario y estado de las herramientas especiales.
- Inventario y estado de los repuestos.
- Disponibilidad de la grúa.

#### **4.9.9 Sistema de automatización y control (Lazo de control cerrado)**

##### Gabinete de control

- Inspección del gabinete.
- Comprobación de la batería del procesador del drive.

##### Software de control

- Comprobar las señales del sensor de velocidad.
- Procesar copia de seguridad del software del drive.
- Recolectar los registros del sistema IBA PDA (drive).
- Verificar los puntos de operación del motor.
- Prueba de los sistemas de supervisión del drive.

# *Capítulo V. Convertidores de potencia*



Figura 63. Cicloconvertidor Sinamics SL 150 para motores síncronos de baja velocidad.

Fuente: [16]

## 5.1 Introducción

Según sean las aplicaciones en la industria, es indispensable disponer de potencia eléctrica de frecuencia fija o variable, pero de distinta característica que la suministrada por la red. Entonces es necesario colocar un dispositivo entre la red eléctrica y la carga de forma que se transforme la energía eléctrica cambiando su frecuencia según sea necesario. La variedad en la conversión de la energía es realizada a través de los convertidores de potencia.

## 5.2 Convertidores de potencia

Un convertidor es un módulo básico del sistema de dispositivos semiconductores de potencia controlados por señales electrónicas (circuitos integrados) y quizá elementos de almacenamiento de energía, como inductores y capacitores. En base a la formada de onda (frecuencia) en ambos lados, los convertidores se clasifican en:

- Rectificadores: convierten CA 1 $\phi$  - 3 $\phi$  en CC.
- Troceador o Choopers: convierten CC a CC variable en amplitud.
- Inversores: convierten CC en CA de amplitud y frecuencia variable.
- Cicloconvertidores: convierten CA 3 $\phi$  de frecuencia fija en CA 1 $\phi$  - 3 $\phi$  de frecuencia variable.

### 5.2.1 *El tiristor.*

El tiristor es un semiconductor de potencia que se utiliza como interruptor, ya sea para conducir o interrumpir la corriente eléctrica, a este componente se le conoce como de potencia por que se utilizan para manejar grandes cantidades de corriente y voltaje, a comparación de los otros semiconductores que manejan cantidades relativamente bajas.



Cuando se habla de tiristores comúnmente se cataloga al tiristor como un SRC (silicon controlled rectifier), pero esto no es del todo correcto ya que este tipo es el más popular y conocido, pero no es el único que existe.

En la siguiente figura se puede apreciar el símbolo y estructura de un tiristor de potencia:

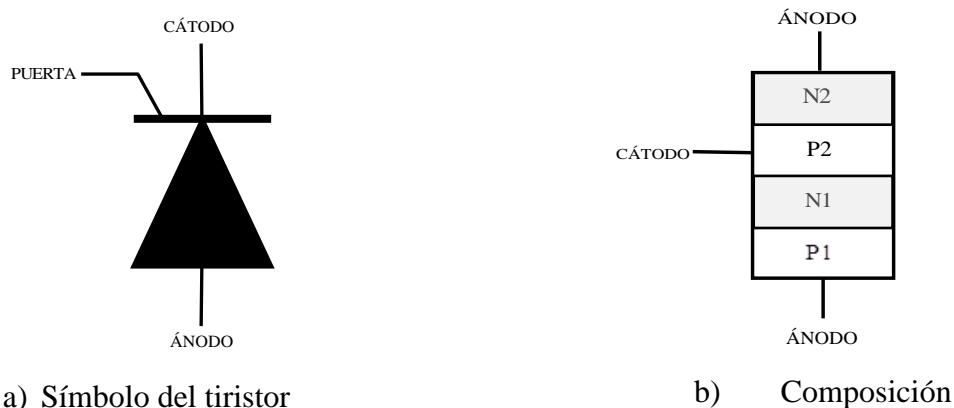


Figura 64. El tiristor SCR.

Fuente: [13]

### 5.3 Cicloconvertidores

Un cicloconvertidor es un dispositivo que convierte corriente CA de una frecuencia dada en corriente CA a distinta frecuencia, es decir, es capaz de modificar la frecuencia de la corriente CA. Los cicloconvertidores suelen aplicarse en accionamientos de motores de varios Megavatios, principalmente en molienda de minerales.

#### 5.3.1 El cicloconvertidor monofásico

Es un circuito que resulta de conectar dos rectificadores puente monofásicos de onda completa y opuestos entre sí. La siguiente figura muestra el diagrama de conexiones:

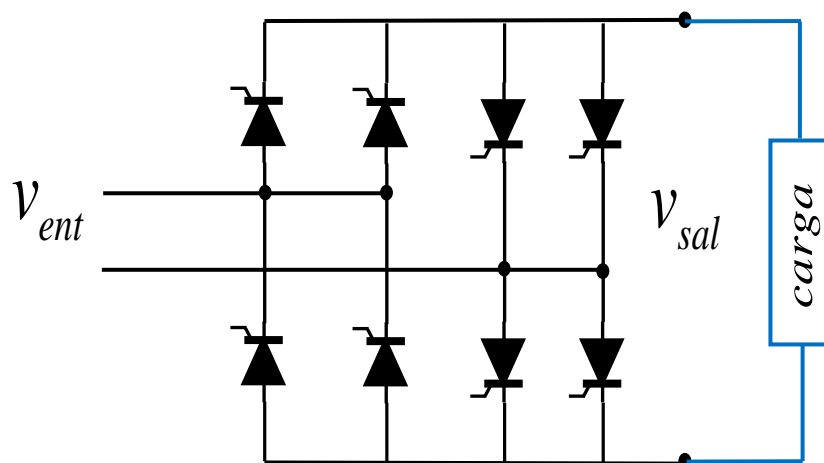


Figura 65. Esquema de conexión de un cicloconvertidor monofásico.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 1\phi$

Se le conoce también con el nombre de cicloconvertidor de media onda o de 3 pulsos. A continuación, se muestra el diagrama correspondiente.

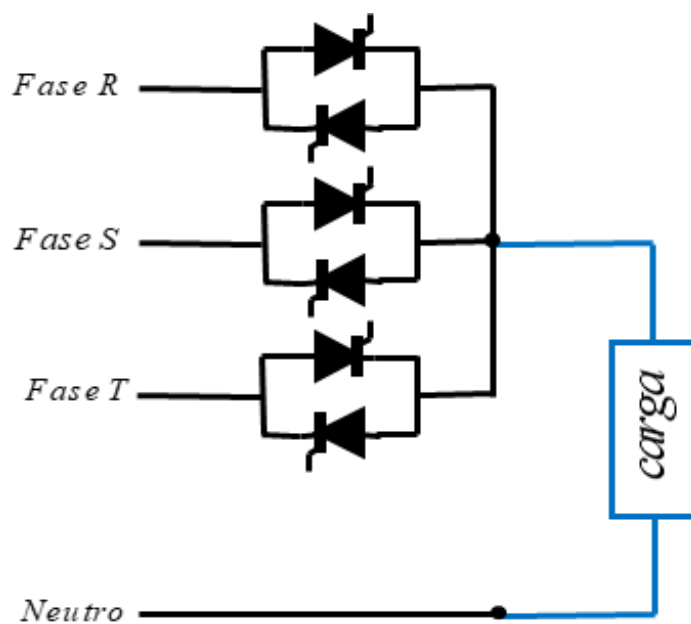


Figura 66. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico  $3\phi-1\phi$  de 3 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 1\phi$

También llamado cicloconvertidor de onda completa o de 6 pulsos y resulta de conectar tres rectificadores puente monofásicos de onda completa y opuestos entre sí. La siguiente figura muestra el diagrama de conexiones:

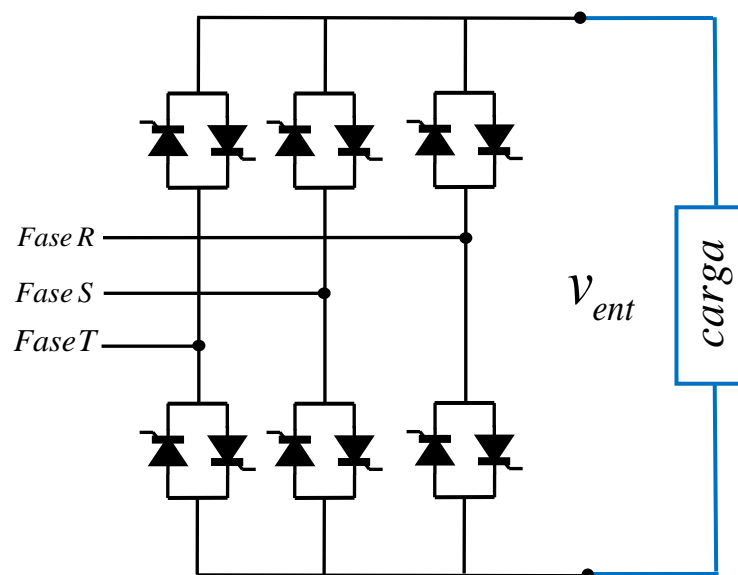


Figura 67. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico  $3\phi-1\phi$  de 6 pulsos.

Fuente: elaboración propia.

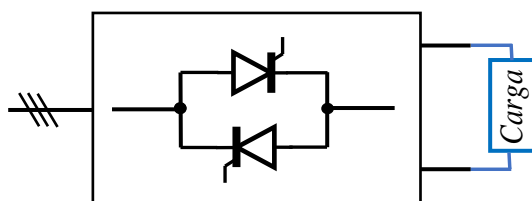


Figura 68. Representación simbólica de un cicloconvertidor trifásico de  $3\phi-1\phi$  de 6 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4 Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$

Circuito que resulta de conectar las salidas de tres cicloconvertidores  $3\phi - 1\phi$  del mismo tipo en delta o estrella, donde además las tensiones de salida están desfasadas en  $120^\circ$  entre sí. Entonces se tiene lo siguiente:

#### 5.3.4.1 Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ de tres pulsos

Cuando los tres cicloconvertidores trifásicos  $3\phi - 1\phi$  son de media onda o de tres pulsos.

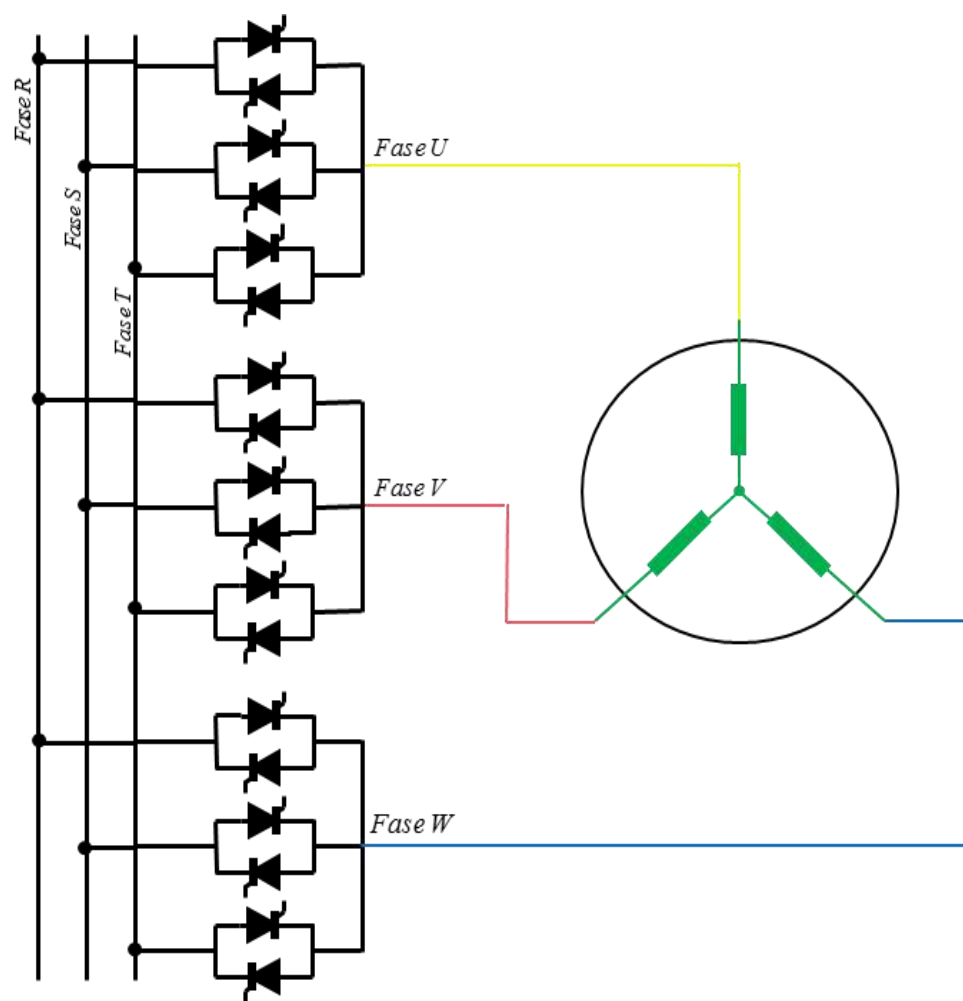


Figura 69. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico  $3\phi - 3\phi$  de 3 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4.2 Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ de seis pulsos

Cuando los tres cicloconvertidores trifásicos  $3\phi - 1\phi$  son de onda completa o de seis pulsos.

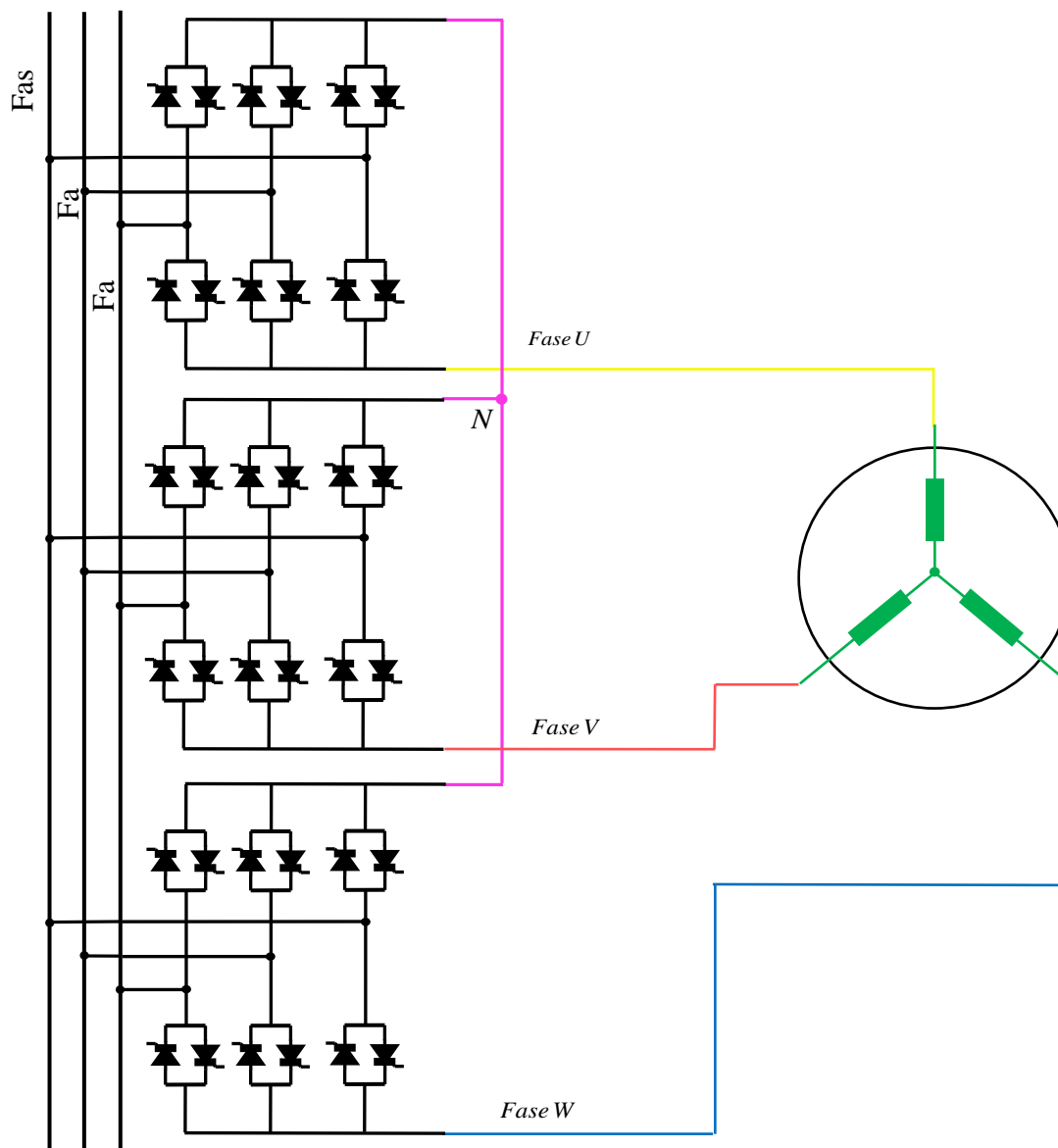


Figura 70. Esquema de conexión de un cicloconvertidor trifásico  $3\phi - 3\phi$  de 6 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4.3 Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$ de 12 pulsos

A diferencia de los cicloconvertidores trifásicos de tres y seis pulsos que reciben alimentación trifásica por igual, los de doce pulsos son alimentados por transformadores de diferente tipo de conexión, cuyos secundarios se encuentran desfasados en  $30^\circ$ . El circuito está formado por la conexión de 6 cicloconvertidores trifásicos  $3\phi - 1\phi$  de onda completa o de 6 pulsos, y cada dos cicloconvertidores trifásicos  $3\phi - 1\phi$  de onda completa o de 6 pulsos están conectados en serie.

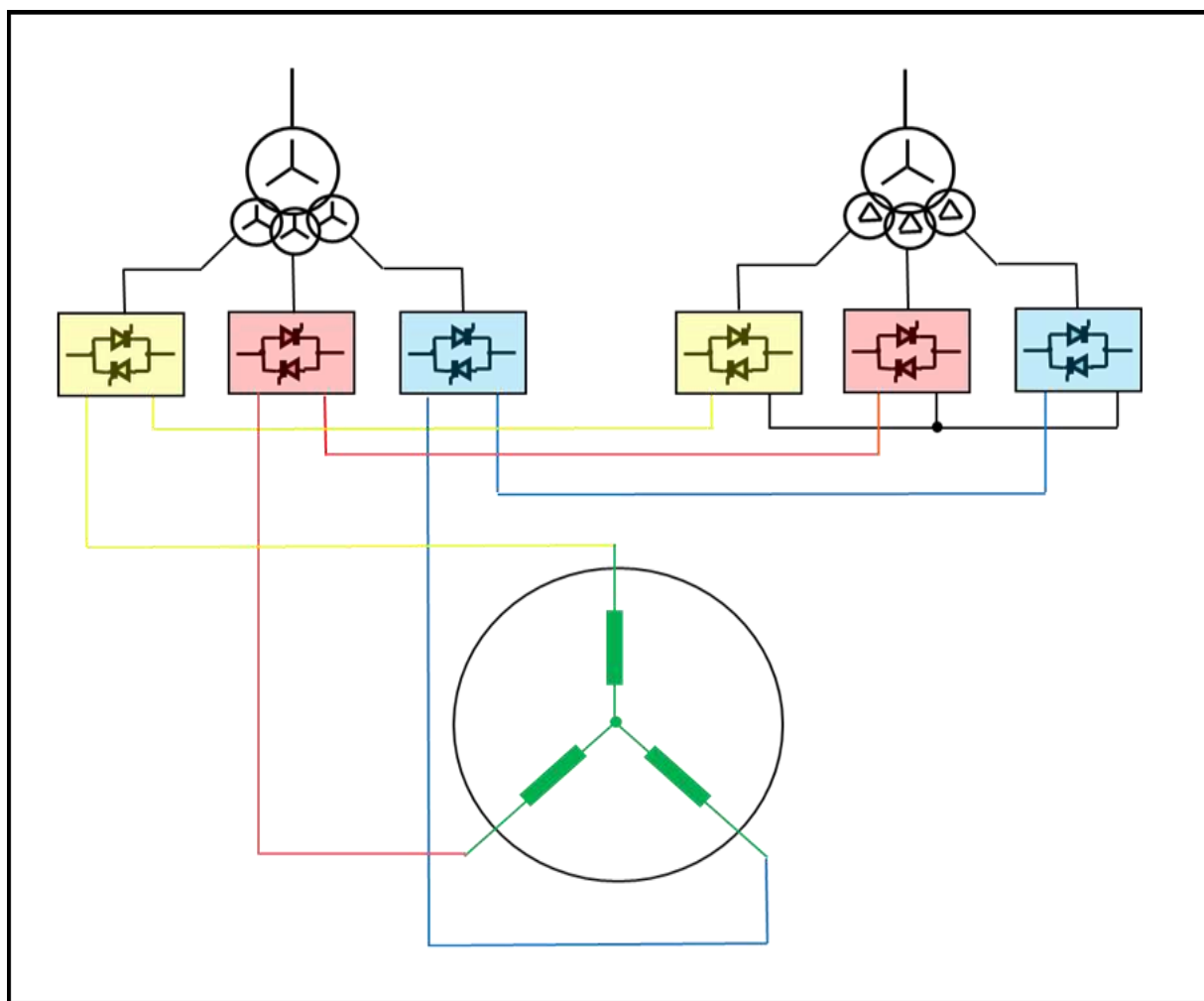


Figura 71. Esquemas de conexión de un cicloconvertidor trifásico de 12 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.4 Cicloconvertidor Sinamics SL150

Es un circuito que convierte directamente tensión AC fija en tensión variable AC, sin pasar por DC (no existen tensiones intermedias). La topología del cicloconvertidor está basada en tres puentes de Graetz en oposición para funcionar en los cuatro cuadrantes, voltaje y corriente de salida.

La configuración mínima de un cicloconvertidor trifásico  $3\phi - 3\phi$  es de 36 tiristores. Un cicloconvertidor de mayor intensidad tendrá un número de tiristores múltiplos de 36.

### 5.4.1 *Cicloconvertidores para aplicaciones gearless*

Con el objetivo de reducir los THD's generados en el proceso de transformación de los convertidores a un nivel aceptable, se emplean en gran minería, convertidores trifásicos de 12 pulsos a más:

### 5.4.2 *Cicloconvertidor trifásico $3\phi - 3\phi$ de $2 \times 6$ pulsos*

Comúnmente usado en motores que accionan molinos SAG de gran tonelaje, en la figura siguiente se muestra el diagrama de conexiones para un motor síncrono de doble devanado estatístico de 24 MW. Es importante mencionar que solo para el molino Sag,

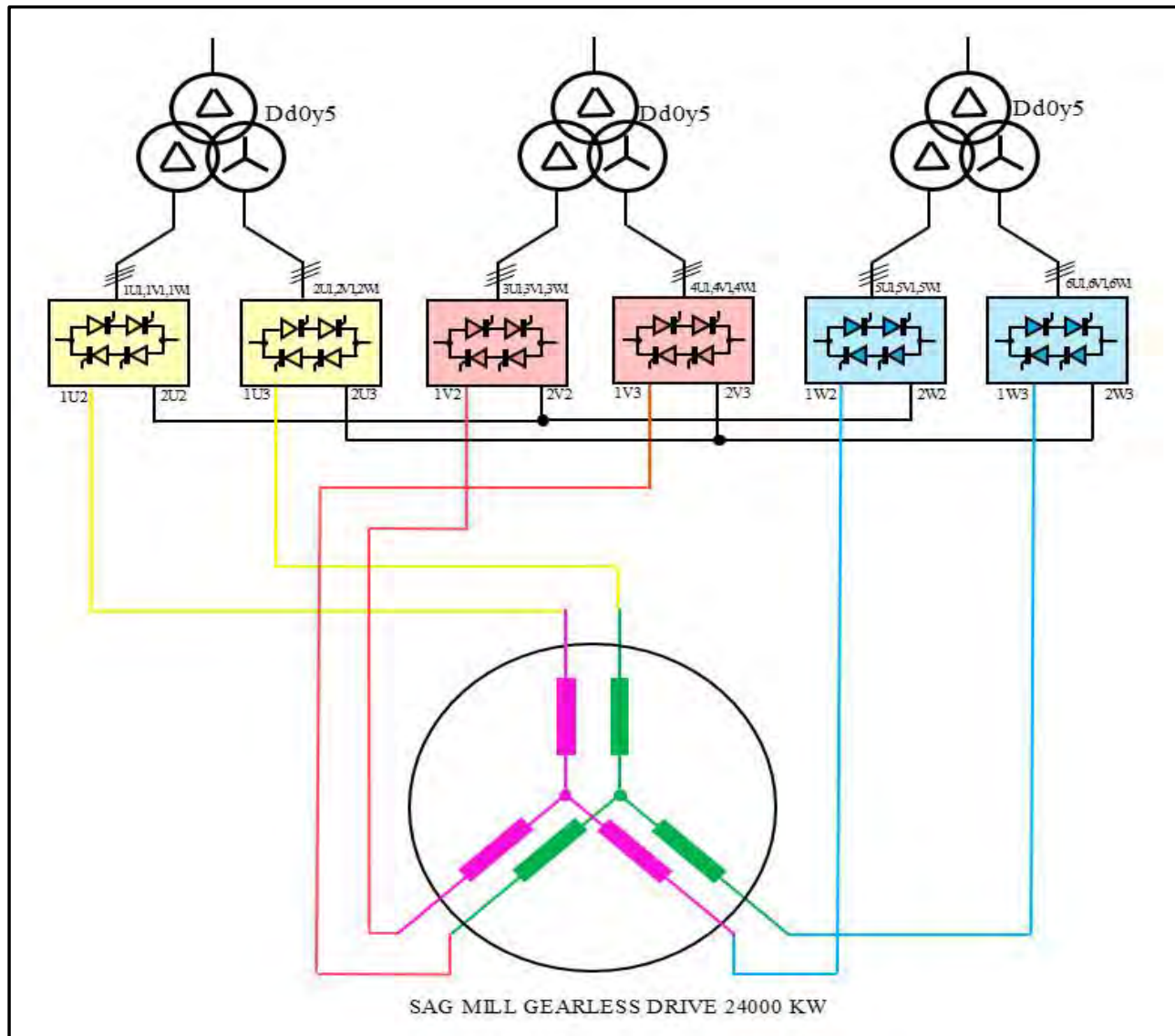


Figura 72. Esquema de conexión de un cicloconvertidor de 2\*6 pulsos, con dos tiristores en serie por rama.

Fuente: Elaboración propia.



### 5.4.3 Configuración de un ciclo convertidor trifásico de 12 pulsos

La siguiente configuración esta dado para un motor síncrono de un devanado estático, muy común en los molinos de bolas.

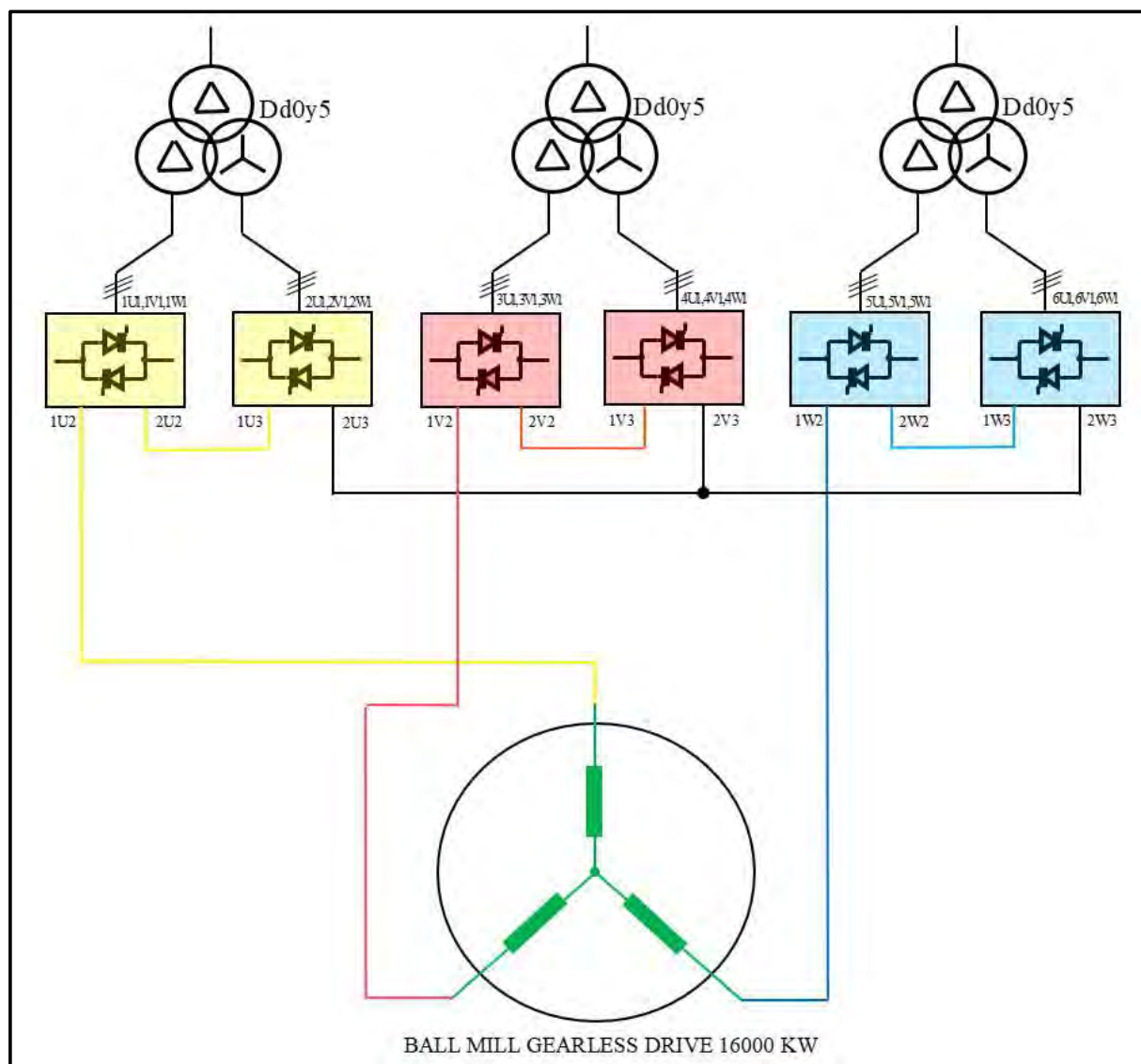


Figura 73. Esquema de conexión de un cicloconvertidor de 12 pulsos.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.5 Características del cicloconvertidor

Según [17] una característica de operación importante es que la frecuencia de salida está limitada por la distorsión de armónicas presentes en los voltajes y corrientes de salida, y que el valor máximo no puede exceder típicamente 1/3 de la frecuencia de entrada (En Perú, la frecuencia máxima de salida de un CCV es de 20 Hz). Otra característica no deseada, es que, a pesar de disponer de un factor de potencia unitario en la carga, el factor de potencia en la entrada variaría entre 0.7- 0.85 en retraso, entorno a su velocidad de operación. A pesar de todas estas limitaciones, los cicloconvertidores siguen siendo los convertidores estáticos preferidos para aplicaciones con motores síncronos de alta potencia y baja velocidad [18].

### 5.5.1 Armónicos de corriente

Los armónicos de corriente en la entrada del cicloconvertidor se pueden clasificar en característicos y no característicos. Las componentes de los armónicos característicos dependen del número de pulsos del cicloconvertidor, mientras que las componentes de los armónicos no característicos dependen de la frecuencia de salida del cicloconvertidor. Según [15], el orden de los armónicos de corriente característicos y no característicos viene definido como:

$$h = (k.p \pm 1) \quad (5.1)$$

$$h = (k.p \pm 1) \pm 6.n \cdot \frac{f_o}{f_1} \quad n \neq 0 \quad (5.2)$$

La distorsión armónica total se define para múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, sin embargo, es posible separar la THD asociada con armónicos característicos y armónicos no característicos:

$$THD_{carac.} = \frac{\sqrt{\sum_{h \text{ carac.}} I_h^2}}{I_1} \quad (5.3)$$

$$\text{THD}_{no\ carac.} = \frac{\sqrt{\sum_{h\ no\ carac.} I_h^2}}{I_1} \quad (5.4)$$

$$\text{THD}_{total.} = \sqrt{\text{THD}_{carac.}^2 + \text{THD}_{no\ carac.}^2} \quad (5.5)$$

### 5.5.2 Medición de armónicas de corriente

Luego de un monitoreo de redes en la subestación principal de Antapaccay, se obtuvo la siguiente data.

Tabla 12

*Armónicos de corriente en los alimentadores de los tres molinos.*

| Subestación | Punto eléctrico        | Tensión de operación | Orden armónico |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------------------------|----------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             |                        |                      | 3°             | 5°   | 7°   | 11°  | 13°  | 17°  | 19°  | 23°  | 25°  |
| 931         | 52-05 del 931-SGM-0001 | 33 Kv                | 1.19           | 0.69 | 0.59 | 3.65 | 2.77 | 0.37 | 0.29 | 0.78 | 0.46 |
| 931         | 52-14 del 931-SGM-0001 | 33 Kv                | 1.31           | 0.69 | 0.58 | 3.46 | 2.4  | 0.39 | 0.32 | 0.63 | 0.54 |
| 931         | 52-17 del 931-SGM-0001 | 33 Kv                | 1.29           | 0.69 | 0.56 | 3.27 | 2.26 | 0.37 | 0.31 | 0.57 | 0.52 |

Nota: Copia del estudio de calidad de energía.

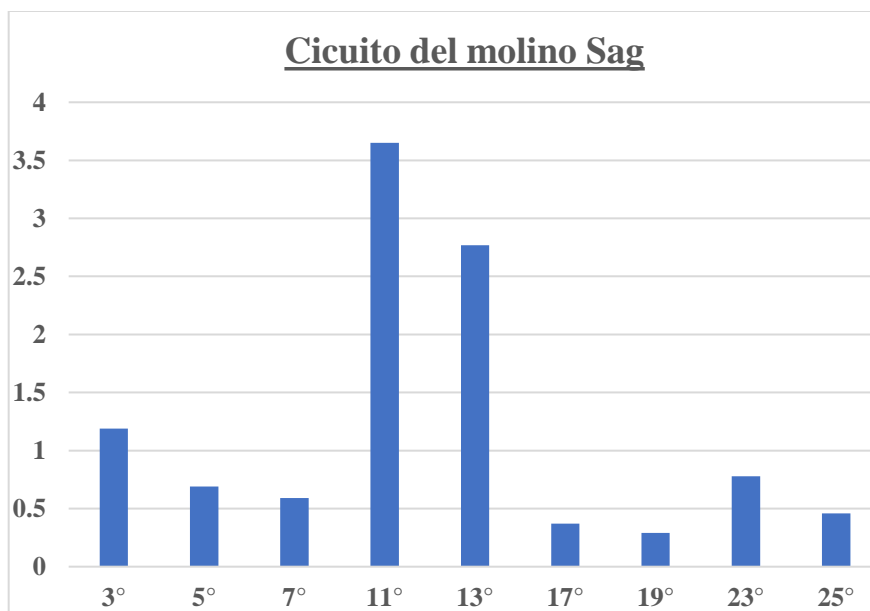


Figura 74. Espectro de armónicos de corriente en el alimentador del Molino Sag.

Fuente: Elaboración propia.

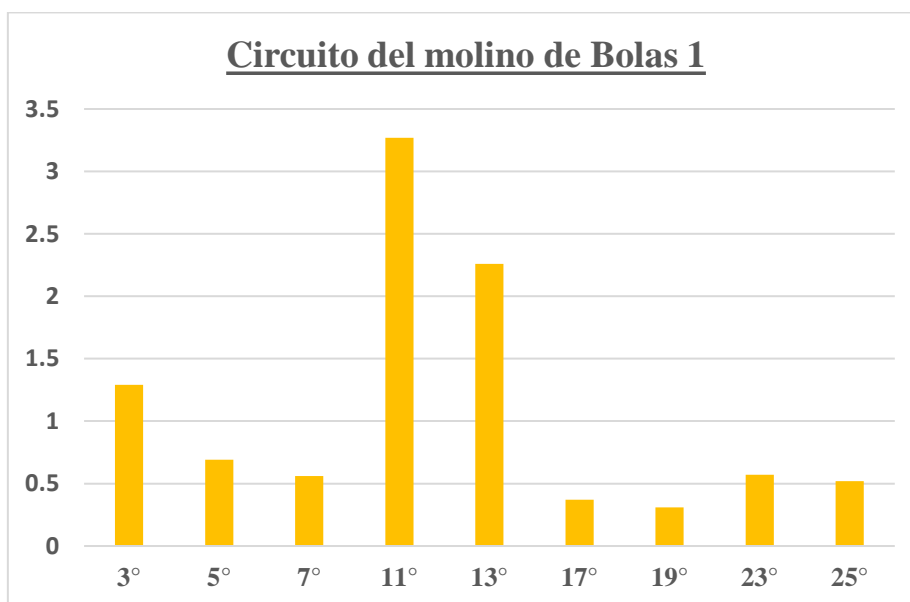


Figura 75. Espectro de armónicos de corriente en el alimentador del Molino de Bolas 1.

Fuente: Elaboración propia.

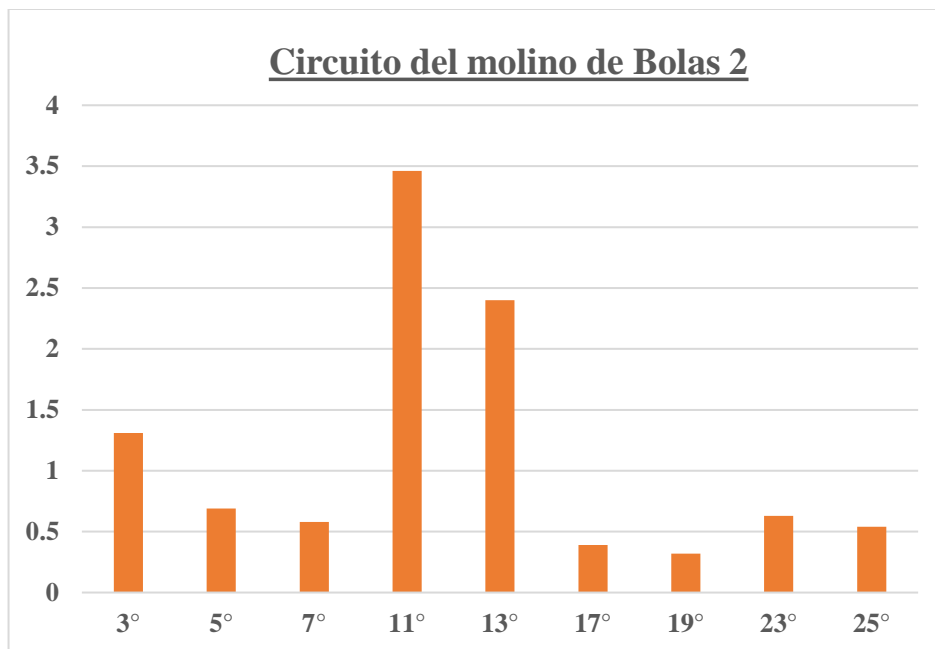


Figura 76. Espectro de armónicos en el alimentador del Molino de Bolas 2.

Elaboración: propia.

## 5.6 Compensación del cicloconvertidor

Dado que los cicloconvertidores absorben gran cantidad de potencia reactiva y generan componentes significativos de armónicos de corriente. Se tienen implementados esquemas de compensación activos y pasivos en la misma barra de distribución.

En compañía minera Antapaccay se tienen:

- Tres filtros de armónicos (931-HFM-0001, 931-HFM-0002 y 220-HFM-0001)
- Dos condensadores síncronos (931-SNC-0001 y 931-SNC-0002)

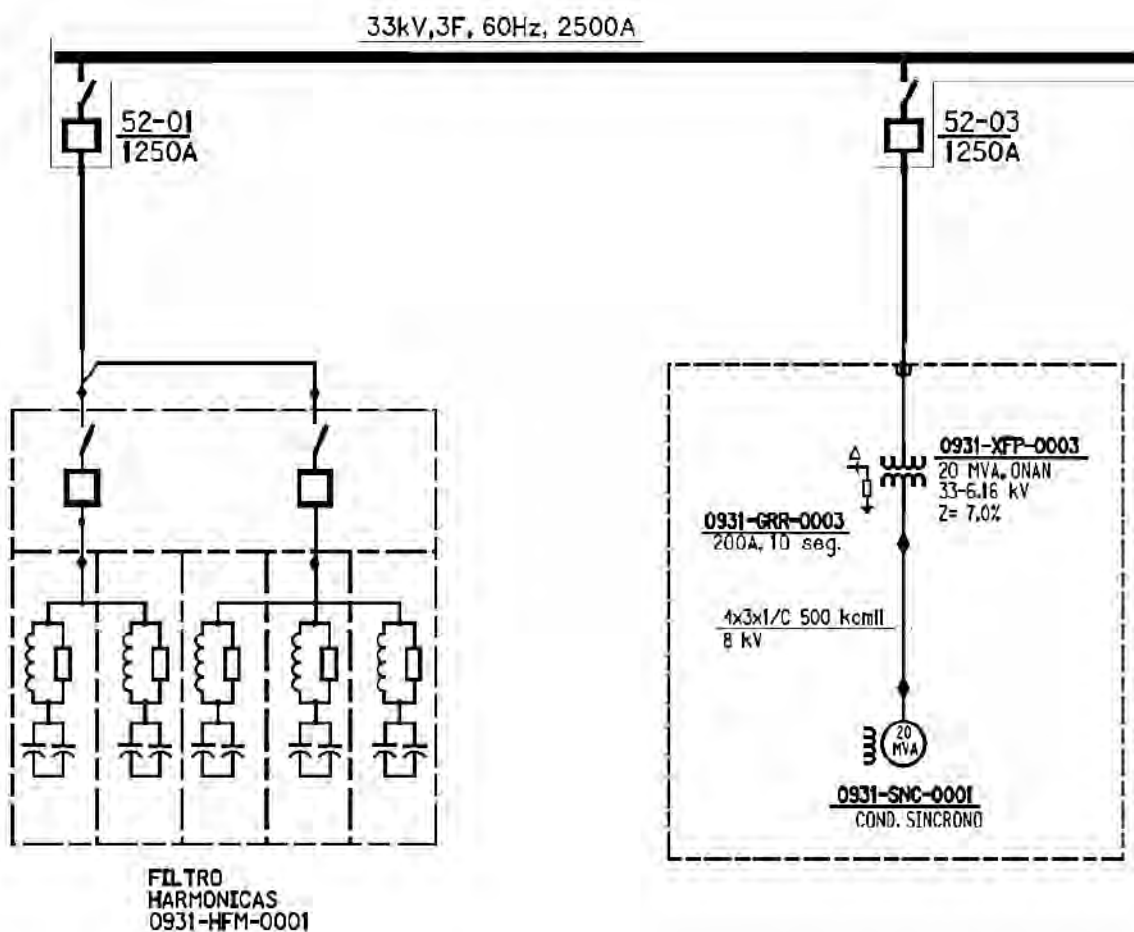


Figura 77. Parte del banco de filtros conectado a la barra de 33 kV de la subestación 931.

Elaboración: Adaptado de los planos de [5].

## 5.7 Esquema de protección del cicloconvertidor

Para detener el funcionamiento del cicloconvertidor, se deben retirar las señales en las compuertas de los tiristores, antes que abra el interruptor principal de 33 kV ubicado en la subestación principal, es decir, el control del cicloconvertidor debe estar coordinado con el esquema de protección del sistema eléctrico (931-SGM-0001).

Según [15], se debe implementar un retardo de 100 ms una vez que el esquema de protección dispare, antes que el interruptor abra sus contactos, es decir, el Cicloconvertidor debe ser desconectado del sistema de potencia después de que todos los tiristores hayan sido apagados.

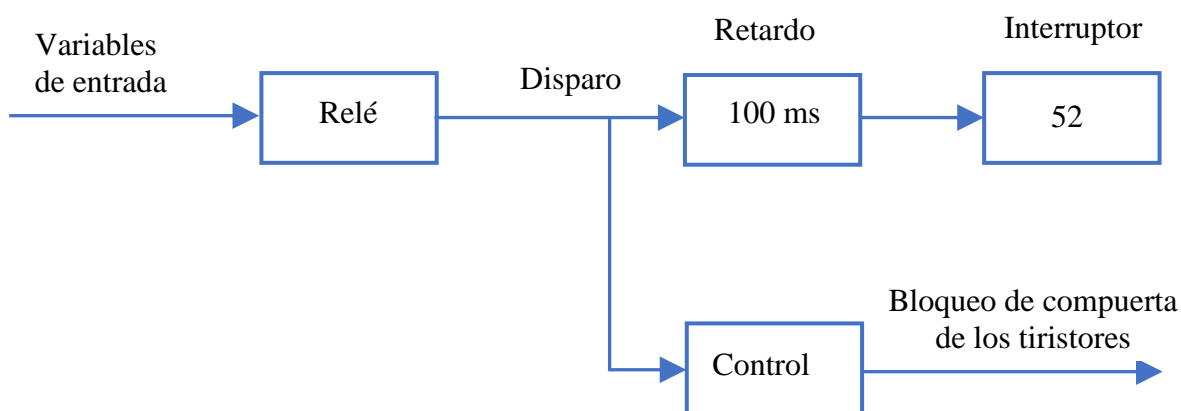


Figura 78. Diagrama de bloque del esquema de protección y control típico

Fuente: Adaptado de [15].

Por otro lado, la protección de sobrecorriente debe ser ajustado para proteger los transformadores del convertidor y respaldar al cicloconvertidor. Como ya se mencionó el relé de sobrecorriente debe ajustarse con un retardo de tiempo de al menos 100 ms.

Respecto a la protección de voltaje, se recomienda ajustar el relé de sub tensión al 85% del valor nominal para proteger el cicloconvertidor de las perturbaciones de la red. Tener bajas tensiones en terminales del cicloconvertidor puede provocar fallas en la conmutación.

Tener variaciones en la frecuencia en la red, es un síntoma de una falla mayor en el sistema eléctrico de potencia. Por esta razón [15] recomienda implementar el relé de baja frecuencia en el lado primario del transformador.

## 5.8 Control vectorial

El control vectorial es la base de los accionamientos modernos de alto rendimiento. También llamado como control de desacoplamiento, ortogonal o transvector. Las técnicas del control vectorial pueden ser clasificados según su método de encontrar la posición instantánea del flujo de la máquina [19]:

- Método indirecto.
- Método directo o con retroalimentación.

El control vectorial indirecto es muy popular en los accionamientos industriales: es inherentemente un trabajo de cuatro cuadrantes hasta la velocidad cero y es adecuado para el circuito de control de velocidad, pero depende mucho de los parámetros de la máquina. En condiciones de flujo alineado a lo largo del eje  $d$  del marco de referencia giratorio síncrono, la corriente del estator se desacopla en dos componentes:  $i_q$  es proporcional al torque de la máquina, mientras  $i_d$  es proporcional al flujo de la máquina. Por lo tanto, la orientación de campo implica que la transformación en línea de las variables de la máquina tiene en cuenta un marco giratorio hipotético equivalente a una máquina de CC. Mediante la transformación en tiempo real de vuelta al marco trifásico de la estación, las corrientes del estator impresas impondrán una respuesta transitoria similar a la CC.

la orientación del campo también se puede lograr mediante la estimación en línea de la posición del vector de campo, y generalmente el flujo del estator se alineará con el eje  $d$ .



### 5.8.1 Transformación de coordenadas

Para el estudio del motor síncrono y de sus accionamientos se hace necesario el uso de transformaciones matemáticas, que relacionen las corrientes eléctricas en el estator, para así obtener un modelo dinámico de la máquina.

#### 5.8.1.1 Transformación de Clarke

Tiene como objetivo sustituir el efecto de un devanado trifásico ( $a, b$  y  $c$ ) desfasados  $120^\circ$  en el espacio, por otro bifásico ( $\alpha$  y  $\beta$ ) desfasados en  $90^\circ$ . Veamos para el siguiente caso:

Se tiene un motor de inducción trifásico, donde sus tres devanados tienen  $N_s$  espiras por polo y fase, que llevan, respectivamente, corrientes  $i_a, i_b, i_c$ . Si los dos sistemas deben producir la misma  $f.m.m$  en el entrehierro de la máquina, calcular:

Los valores de las corrientes  $i_\alpha, i_\beta$  en función de  $i_a, i_b, i_c$  cuando la medida del ángulo formado por el eje  $\beta$  y el eje  $a$  del sistema trifásico sea  $\theta$ .

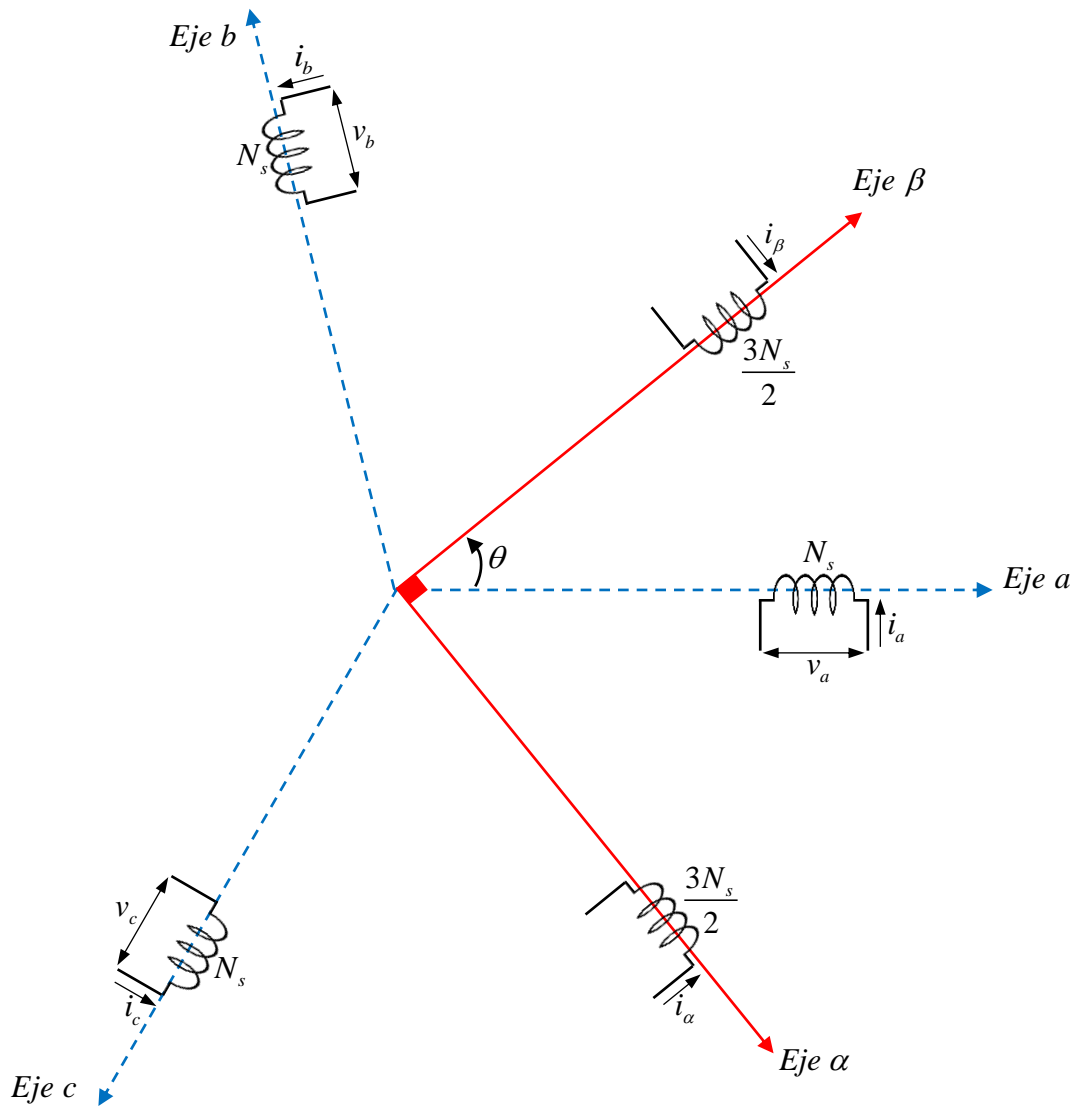


Figura 79. Transformación de Clarke.

Fuente: Elaboración propia

**Solución.**

Proyectaremos las corrientes del sistema trifásico sobre los ejes  $\alpha$  y  $\beta$  del sistema bifásico, entonces: Las intensidades totales sobre los ejes  $\beta$  y  $\alpha$ , será:

$$i_{\beta} = i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ) \quad (6.1)$$

$$i_{\alpha} = i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ) \quad (6.2)$$

Entonces la fuerza magnetomotriz producida por estas dos nuevas corrientes será:

$$F.m.m._{\beta} = \frac{4}{\pi} N_s K_w i_{\beta}$$

$$F.m.m._{\beta} = \frac{4}{\pi} N_s K_w [(i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ))] \quad (6.3)$$

$$F.m.m._{\alpha} = \frac{4}{\pi} N_s K_w i_{\alpha}$$

$$F.m.m._{\alpha} = \frac{4}{\pi} N_s K_w [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)] \quad (6.4)$$

Mientras que el devanado bifásico, que tiene  $\frac{3N_s}{2}$  espiras por polo y fase, produce en estos ejes unas f.m.m.s.:

$$F.m.m._{\beta} = \frac{4}{\pi} \frac{3N_s K_w}{2} i_{\beta} \quad ; \quad F.m.m._{\alpha} = \frac{4}{\pi} \frac{3N_s K_w}{2} i_{\alpha} \quad (6.5)$$

Al igualar las f.m.m.s. del mismo eje de las ecuaciones (6.3), (6.4) y (6.5) se obtiene:

$$i_{\beta} = \frac{2}{3} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)]$$

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)] \quad (6.6)$$

Estas ecuaciones representan los valores de las corrientes que deben circular por el devanado bifásico para que produzcan las mismas f.m.m.s. que el sistema trifásico. Ahora para que la transformación sea biunívoca deben aparecer tres nuevas variables de corriente después de la conversión. Esta variable no debe contribuir a la creación de f.m.m. en el entrehierro y por conveniencia la tercera variable será la corriente homopolar  $i_0$ , que viene expresada por:

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (6.7)$$

De este modo la ley de transformación trifásica a bifásica vendrá expresada en forma matricial por:

$$\begin{Bmatrix} i_\beta \\ i_\alpha \\ i_0 \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta-120^\circ) & \text{sen}(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix}$$

Donde la matriz de transformación o matriz de Clark, viene dado por:

$$\mathbf{T}_{\beta\alpha 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta-120^\circ) & \text{sen}(\theta+120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Por calculo matricial se puede demostrar que la transformación inversa de Clarke, viene expresada por:

$$\mathbf{T}_{\beta\alpha 0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \text{sen}(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \text{sen}(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

### 5.8.1.2 Transformación de Park

Tiene como objetivo sustituir el efecto de un **devanado bifásico fijo** ( $\alpha$  y  $\beta$ ), desfasados en el espacio en  $90^\circ$ , con  $N_s$  espiras cada uno y que llevan respectivamente corrientes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , por otro devanado bifásico móvil ( $d$  y  $q$ ) situados entre a  $90^\circ$ , con el mismo número de espiras, girando a una velocidad angular de  $\omega_1$  rad/s respecto del primero en el entrehierro de la máquina.

Veamos el siguiente caso:

En la figura 20 se muestra que el *eje q* del devanado móvil forma  $\theta$  grados eléctricos respecto del *eje  $\beta$*  del devanado fijo, siendo  $\theta = \omega_1 t + \theta_0$ , se requiere determinar los valores de las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  en función de  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , siendo:

$$i_\alpha = \text{Im} \cos(\omega_1 t + \alpha) ; i_\beta = -\text{Im} \text{sen}(\omega_1 t + \alpha).$$

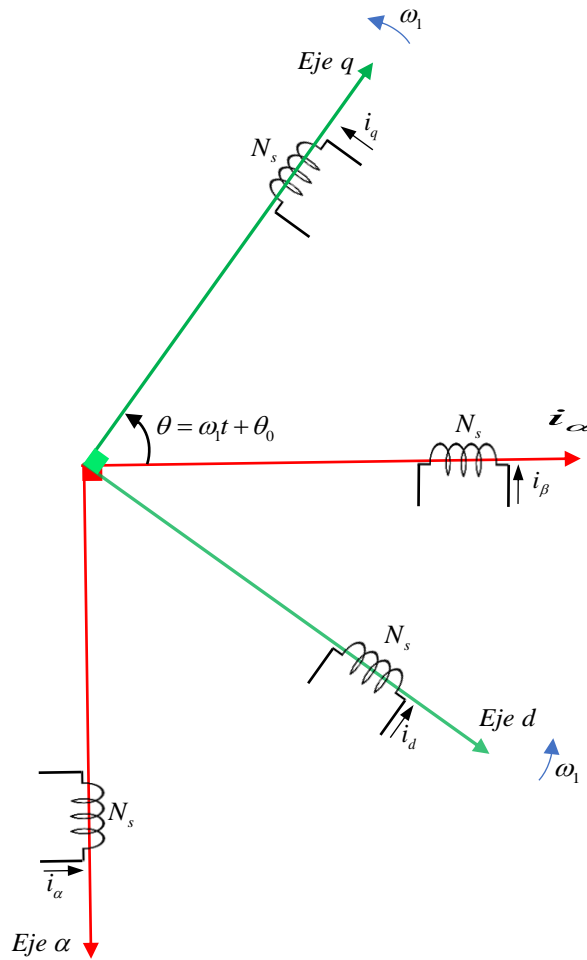


Figura 80. Transformación de ejes fijo a ejes giratorios.

Fuente: Elaboración propia.

**Solución:**

Proyectaremos las corrientes del sistema bifásico, sobre los ejes  $d$  y  $q$ , entonces las intensidades totales sobre cada eje serán:

$$\begin{aligned} i_d &= i_\beta \cos \theta - i_\alpha \operatorname{sen} \theta \\ i_q &= i_\beta \operatorname{sen} \theta + i_\alpha \cos \theta \end{aligned} \quad (6.10)$$

Entonces la fuerza magnetomotriz producida por estas dos intensidades será:

$$F.m.m._q = N_s [i_\beta \cos \theta - i_\alpha \operatorname{sen} \theta] \quad ; \quad F.m.m._d = N_s [i_\beta \operatorname{sen} \theta + i_\alpha \cos \theta] . \quad (6.11)$$

Que debe ser igual a las F.m.m.s producidas por los devanados móviles:

$$\begin{aligned} F.m.m._q &= N_s i_q \\ F.m.m._d &= N_s i_d \end{aligned} \quad (6.12)$$

Igualando las ecuaciones 6.10 y 6.11, se obtiene:

$$\begin{aligned} i_d &= i_\beta \cos \theta - i_\alpha \operatorname{sen} \theta \\ i_q &= i_\beta \operatorname{sen} \theta + i_\alpha \cos \theta \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} i_q \\ i_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta \\ \operatorname{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_\beta \\ i_\alpha \end{Bmatrix} \quad (6.13)$$

Es decir, la matriz de transformación vale:

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta \\ \operatorname{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Ahora reemplazando los valores de  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  y teniendo en cuenta que  $\theta = \omega_1 t + \theta_0$ , en la ecuación 6.13, se tiene:

$$\begin{Bmatrix} i_q \\ i_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t + \theta_0) & -\operatorname{sen}(\omega_1 t + \theta_0) \\ \operatorname{sen}(\omega_1 t + \theta_0) & \cos(\omega_1 t + \theta_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \operatorname{Im} \cos(\omega_1 t + \alpha) \\ -\operatorname{Im} \operatorname{sen}(\omega_1 t + \alpha) \end{Bmatrix}$$

De donde los valores de corrientes de eje cuadratura y directo son:

$$i_q = \operatorname{Im} \cos(\theta_0 - \alpha) \quad ; \quad i_d = \operatorname{Im} \operatorname{sen}(\theta_0 - \alpha) \quad (6.15)$$

Es importante darse cuenta del significado físico que implica la transformación anterior. En definitiva, se ha sustituido un sistema bifásico estático por un sistema bifásico móvil. Las corrientes en el sistema bifásico fijo varían con respecto al tiempo según señala (6.10), mientras que en el sistema móvil y de acuerdo con (6.15) las corrientes son constantes, como si fueran corriente continua y solamente dependen de la fase inicial de la corriente  $\alpha$  y del ángulo inicial de giro  $\theta_0$ .

Por otro lado, la matriz transformación inversa de (6.14) vale:

$$T_{\theta}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

Entonces aplicando las relaciones inversas a (6.10) son:

$$i_{\beta} = i_q \cos \theta + i_d \text{sen} \theta ; i_{\alpha} = -i_q \text{sen} \theta + i_d \cos \theta \quad (6.17)$$

Ahora de las ecuaciones 6.6 y 6.13, es posible obtener una transformación conjunta que transforme un conjunto trifásico de devanados fijos  $a, b$  y  $c$  situados en el estator por un sistema bifásico móvil  $d, q, 0$  que se mueve a velocidad angular  $\omega_1$  respecto a un referencial fijo, de donde se tiene:

$$\begin{Bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \text{sen} \theta & \text{sen}(\theta - 120^\circ) & \text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{Bmatrix} \quad (6.18)$$

En la que  $\theta = \omega_1 t + \theta_0$ . La matriz de transformación de Park está dada por:

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \text{sen} \theta & \text{sen}(\theta - 120^\circ) & \text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

## 5.9 Control vectorial de un motor síncrono

También denominado control por orientación de campo, de acuerdo con [13] el objetivo del control vectorial es separar el vector espacial de corriente de estator en dos componentes en cuadratura, una corriente responsable de crear el flujo del motor ( $i_d$ ) y la otra de generar par ( $i_q$ ), y controlarlas de forma independiente.

En el motor síncrono anillo se tendrá una excitación permanente, por lo que se controlará la corriente de excitación c.d. en un rango muy pequeño, manteniendo así un flujo (campo magnético en el entrehierro de la maquina) constante.

Mientras que en el estator, que al igual que en un motor de inducción, se tendrá una corriente magnetizante ( $i_d$ ) y una corriente de torque ( $i_q$ ), donde se intentará que toda la corriente generada en el estator sea torque y la corriente magnetizante sea nulo; de este modo todo el flujo magnético generado en el entrehierro de la maquina será generado por la corriente de excitación o de campo, logrando así que en el estator se tenga una máxima eficiencia de consumo, idealmente ( $\cos \varphi = 1$ ).



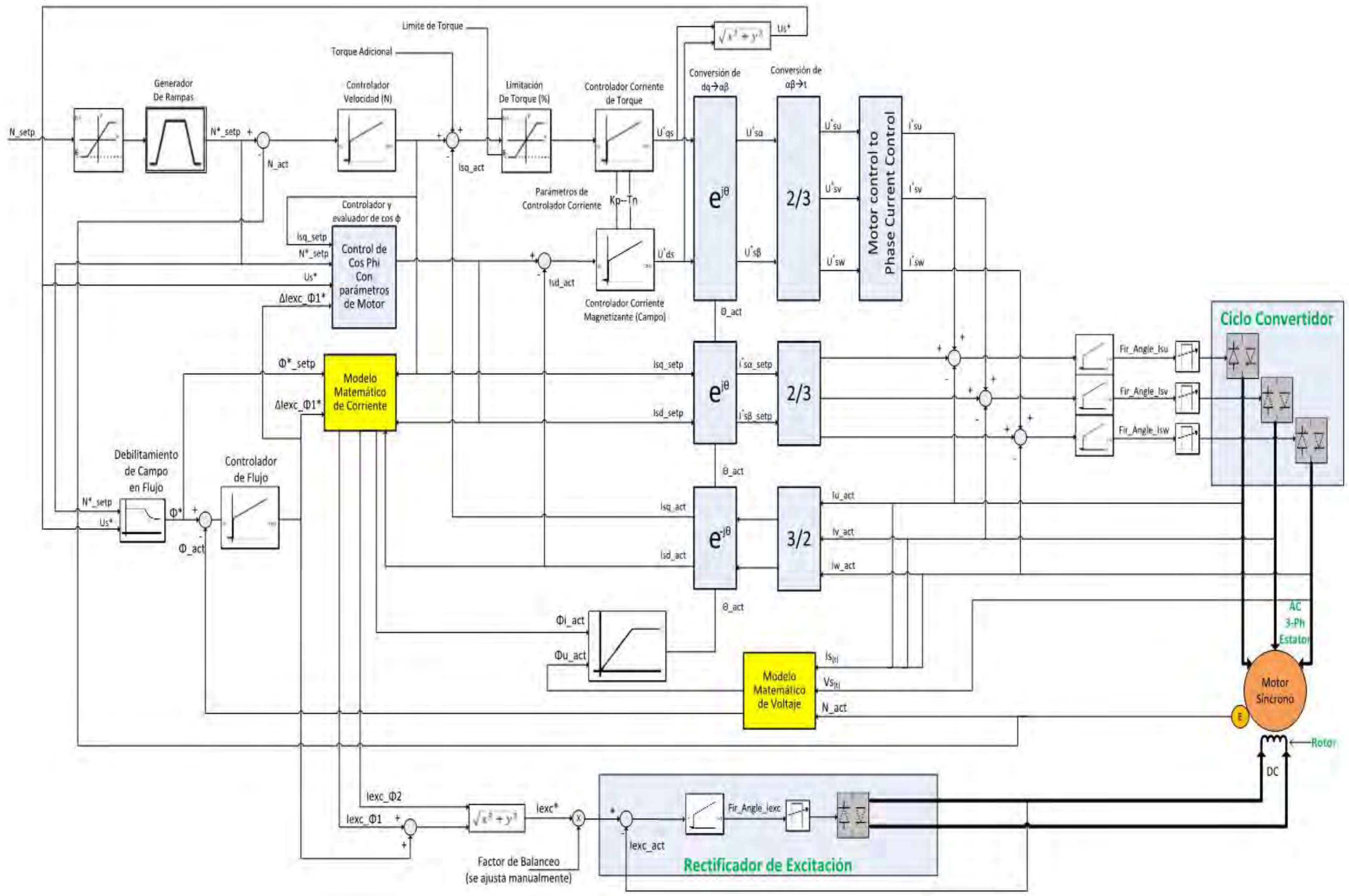


Figura 81. Control vectorial típico de un motor de anillo.  
 Fuente: PQR Engineering and Services.

### 5.9.1 Configuración del sistema para la aplicación de molinos gearless en Antapaccay

El cicloconvertidor Sinamics SL150 es parte de un sistema dedicado a dar funcionalidad a un molino sin engranaje. En la Figura 82 se muestra la configuración para el molino Sag, compuesto por: Dos PLCs S7 400, ET200, Sinamics SL150, rectificador Simoreg DC Master, PDA y estaciones del operador.

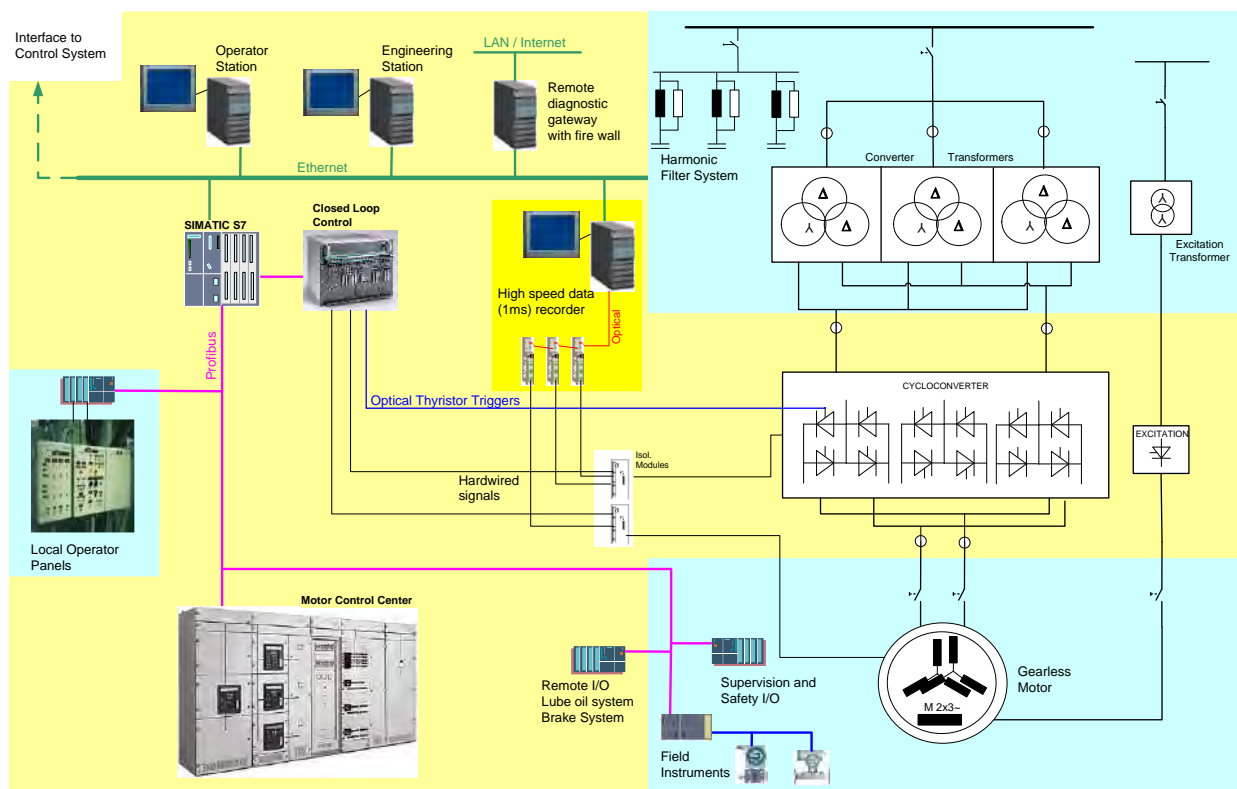


Figura 82. Configuración del proyecto Molino Sag.

Fuente: PQR Engineering and Services.

### 5.10 Estructura del sistema de control Sinamics SL150

Ahora se detalla la estructura del close loop control, conformado por el controlador CU320 que viene a ser el maestro de los PSA's pero esclavo del controlador simotion D445, así como los ET200 y el Simoreg DC Master.

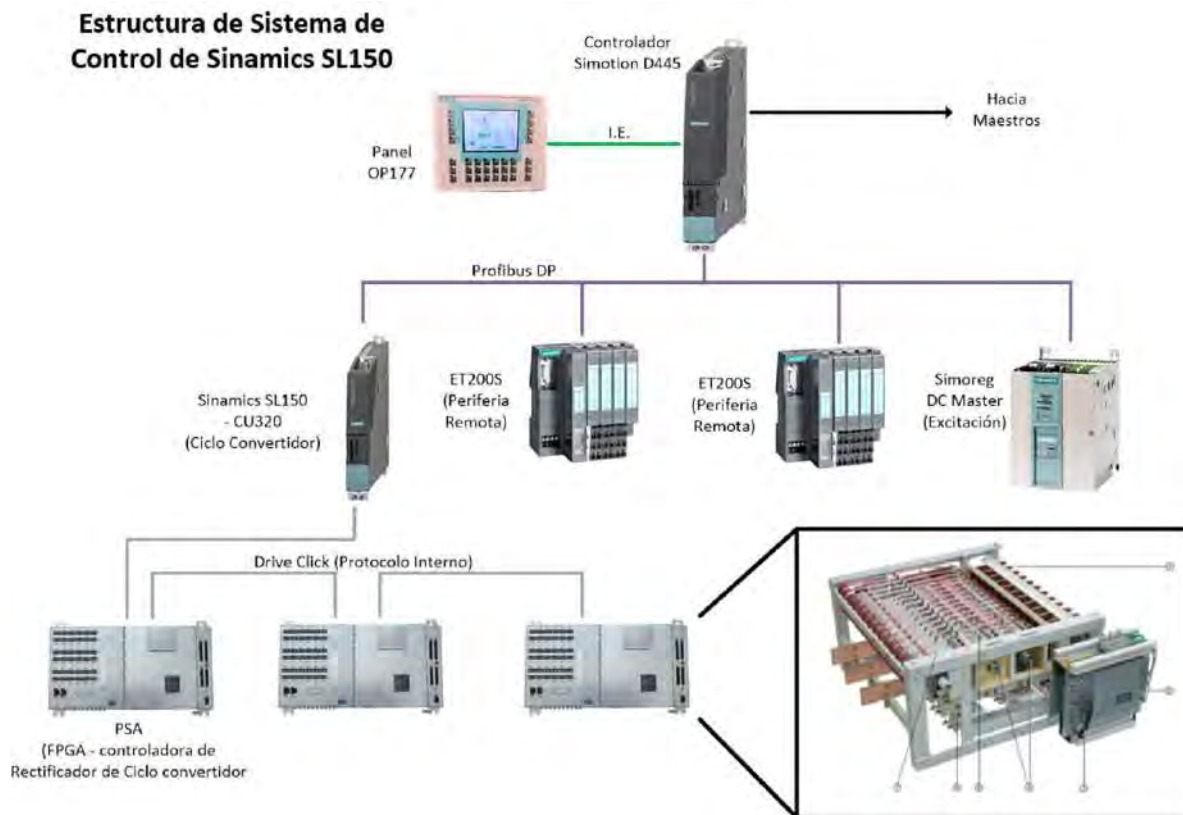


Figura 83. Topología de control del Sinamics SL150

Fuente: PQR Engineering and Services.

# *Capítulo VI. SIMATIC WinCC flexible*



Figura 84. Interfaz hombre-máquina de un proceso industrial.

Fuente: [20]

## 6.1 Introducción

Viene de las siglas del inglés Windows Control Center, es un SCADA que permite visualizar y controlar el sistema GMD desde una PC. Por este medio es posible:

- Visualizar el estado de todos los componentes del sistema, como por el ejemplo el modo de operación del molino. Esto es de vital importancia para saber si todas las islas están en listo para dar partida al equipo.
- Visualizar en tiempo real el comportamiento de las variables críticas de la operación.
- Visualizar los valores máximos y mínimos en los que se debe mantener las variables, garantizando la estabilidad y protección al sistema. También es posible realizar un forzado (realizar un cambio de valores, por uno deseado y conveniente) en ciertas condiciones; como por ejemplo en el arranque del molino.
- Tener acceso a las secuencias de arranque y paro del molino.
- Ver el historial de alarmas, previos a la salida del molino.
- Acceder a las tendencias de las principales variables de operación, ello permite facilitar en el diagnóstico de un problema, así como la visualización de los resultados después la solución implementada.

A continuación, en las figuras siguientes se mostrará todas las pantallas del WinCC para el molino Sag, ya que es similar para los molinos de Bolas.

## 6.2 Vista general del del molino.

En esta primera pestaña es posible visualizar un resumen de los principales valores de operación; como el peso, potencia y torque del molino.

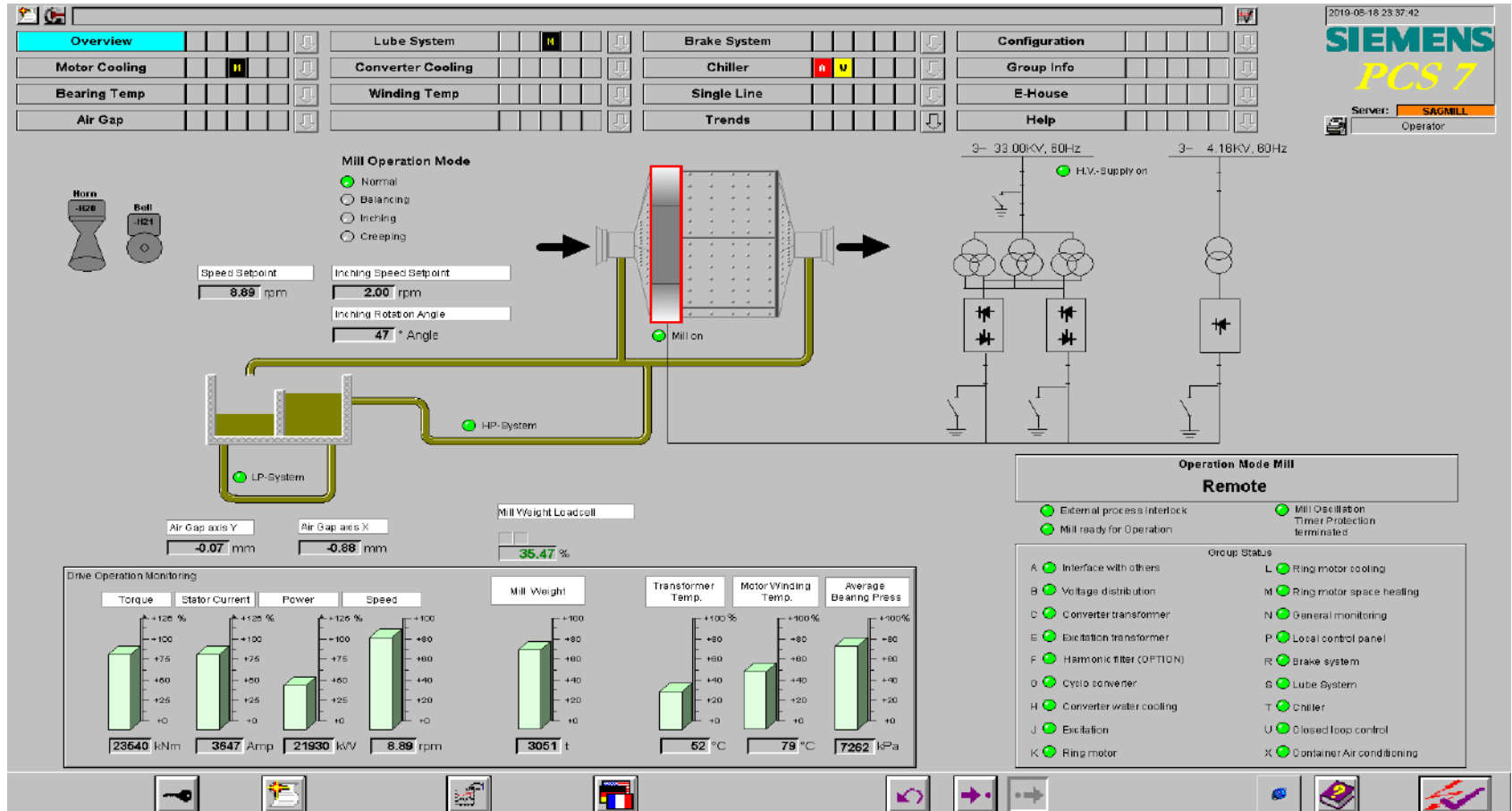


Figura 85. Vista general del molino SAG

Fuente: [5]

### 6.3 Tendencias del molino Sag en mantenimiento

A continuación, se muestra la operación del molino para el posicionamiento correcto de los revestimientos a cambiarse.



Figura 86. Modos de mantenimiento del Molino.

Fuente: [5]

El mismo procedimiento, pero esta vez con un cambio de giro, visto desde el lado de alimentación del molino.

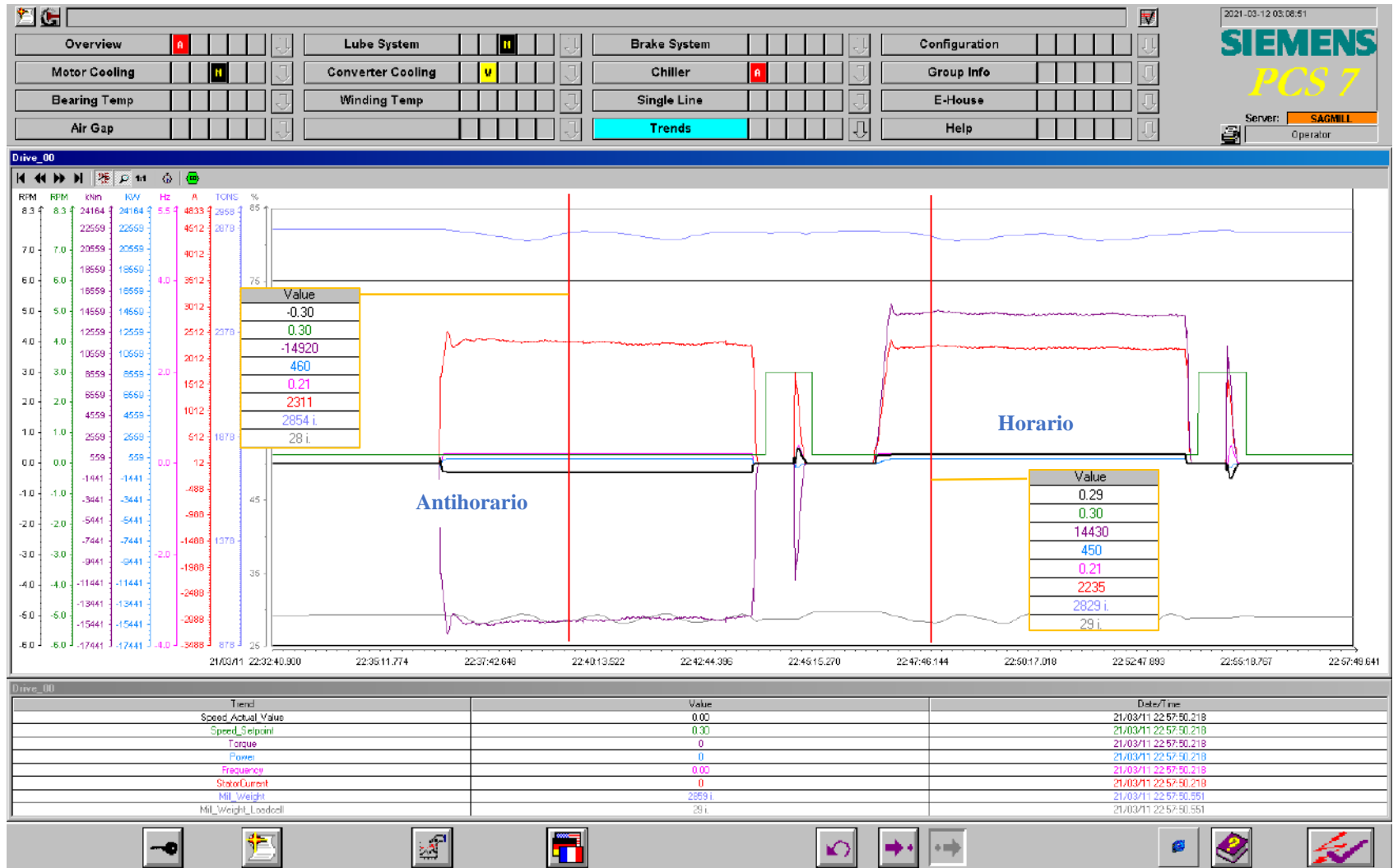


Figura 87. Cambio de sentido de giro del molino.

Fuente: [5]



## 6.4 Sistema de enfriamiento del motor síncrono.

En la siguiente ventana se visualiza las temperaturas de aire, agua y estado de los ventiladores en los cuatro cuadrantes del motor anillo.

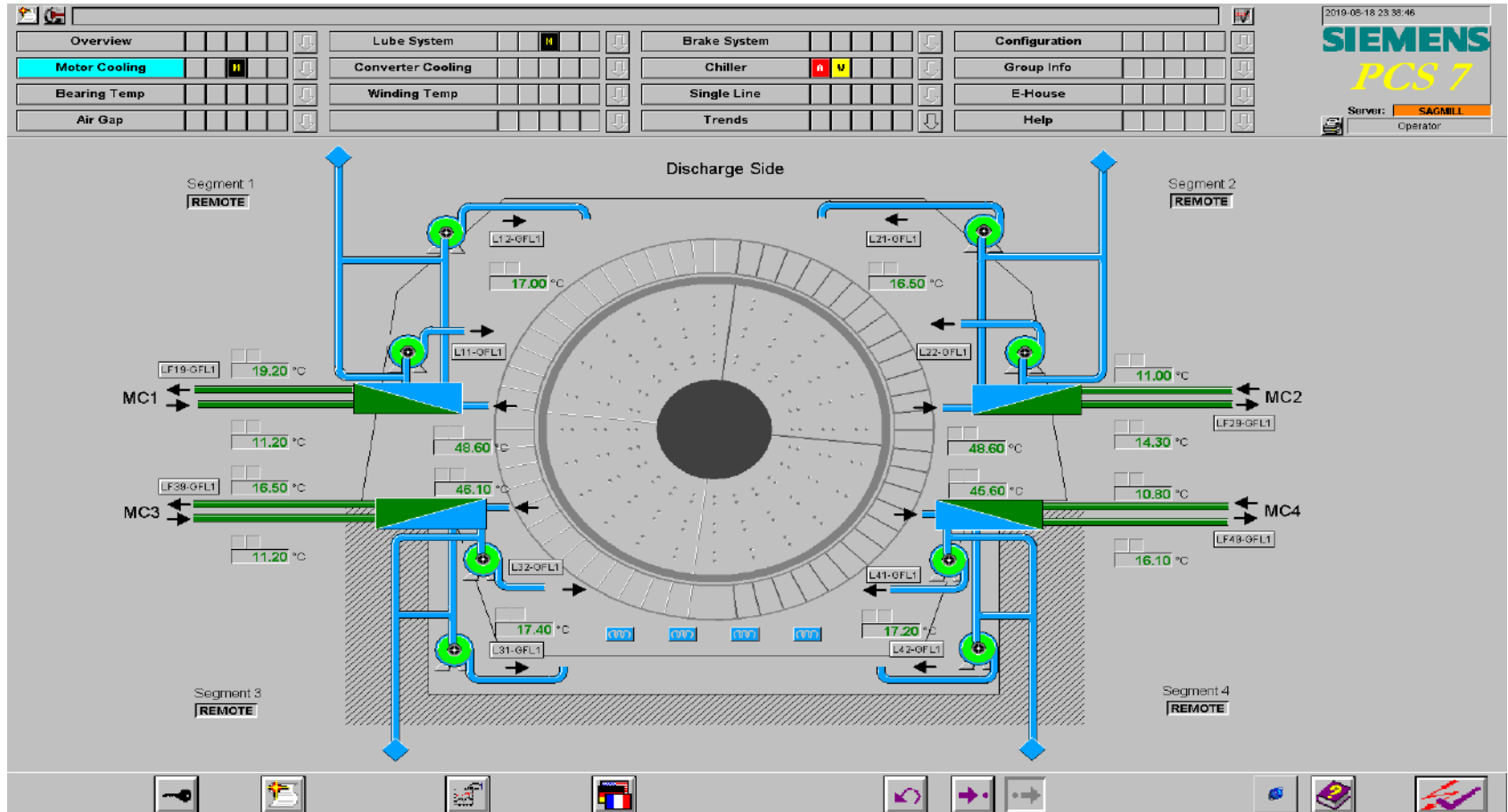


Figura 88. Sistema de enfriamiento del motor de anillo – Molino Sag.

Fuente: [5]

## 6.5 Temperatura de los trunnion del molino.

Es indispensable tener valores en tiempo real de las temperaturas de los descansos lado carga y descarga del molino, evitando dañar componentes críticos para su funcionamiento.

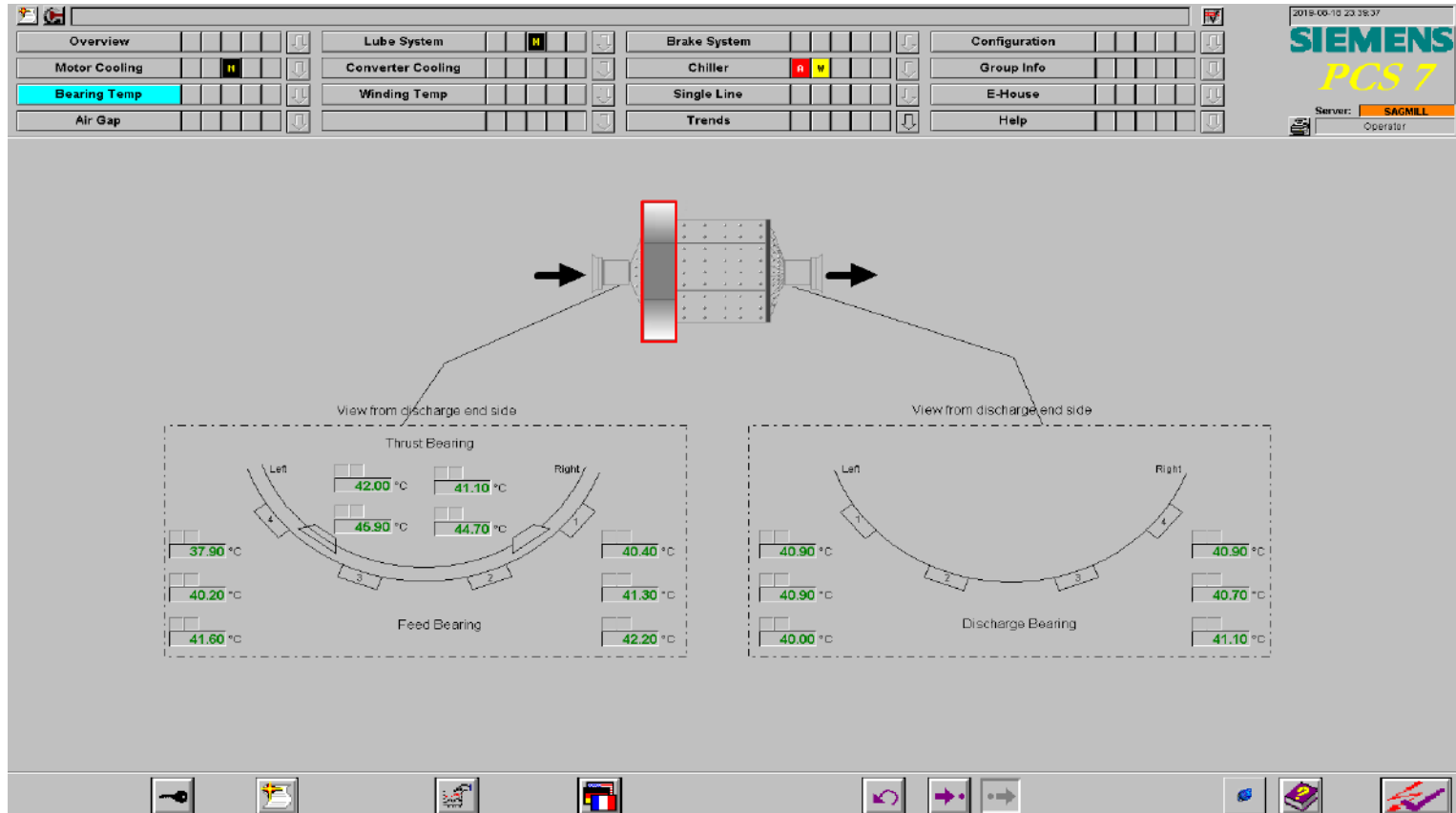


Figura 89. Temperatura de los descansos del molino Sag.

Fuente: [5].

## 6.6 Medición del entrehierro de la maquina síncrona.

Es de vital importancia poder vigilar el correcto alineamiento del estator y rotor, es por ello que los motores síncronos de los molinos llevan instalados 2 sensores de entrehierro (Figura 90) por cada coordenada del motor ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ), haciendo un total de 8 sensores capacitivos.

A continuación, se muestra un cuadro resumen de los valores de operación y protección de los motores anillo.

Tabla 13

*Resumen de valores de entrehierro de operación, alarma y disparo.*

|                            | Molino Sag   | Molino de Bolas 1 | Molino de Bolas 2 |
|----------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| Valor de alarma            | <b>15 mm</b> | <b>11.5 mm</b>    | <b>11.5 mm</b>    |
| Valor de disparo           | <b>14 mm</b> | <b>10.5 mm</b>    | <b>10.5 mm</b>    |
| Valor promedio $270^\circ$ | 17.5 mm      | 13.64 mm          | 14.1 mm           |
| Valor promedio $90^\circ$  | 19.2 mm      | 13.08 mm          | 13.6 mm           |
| Valor promedio $0^\circ$   | 22.4 mm      | 15.48 mm          | 15.4 mm           |
| Valor promedio $180^\circ$ | 22.8 mm      | 15.58 mm          | 16.2 mm           |

Nota. Los datos fueron obtenidos del WinCC y SIMOTION SCOUT.

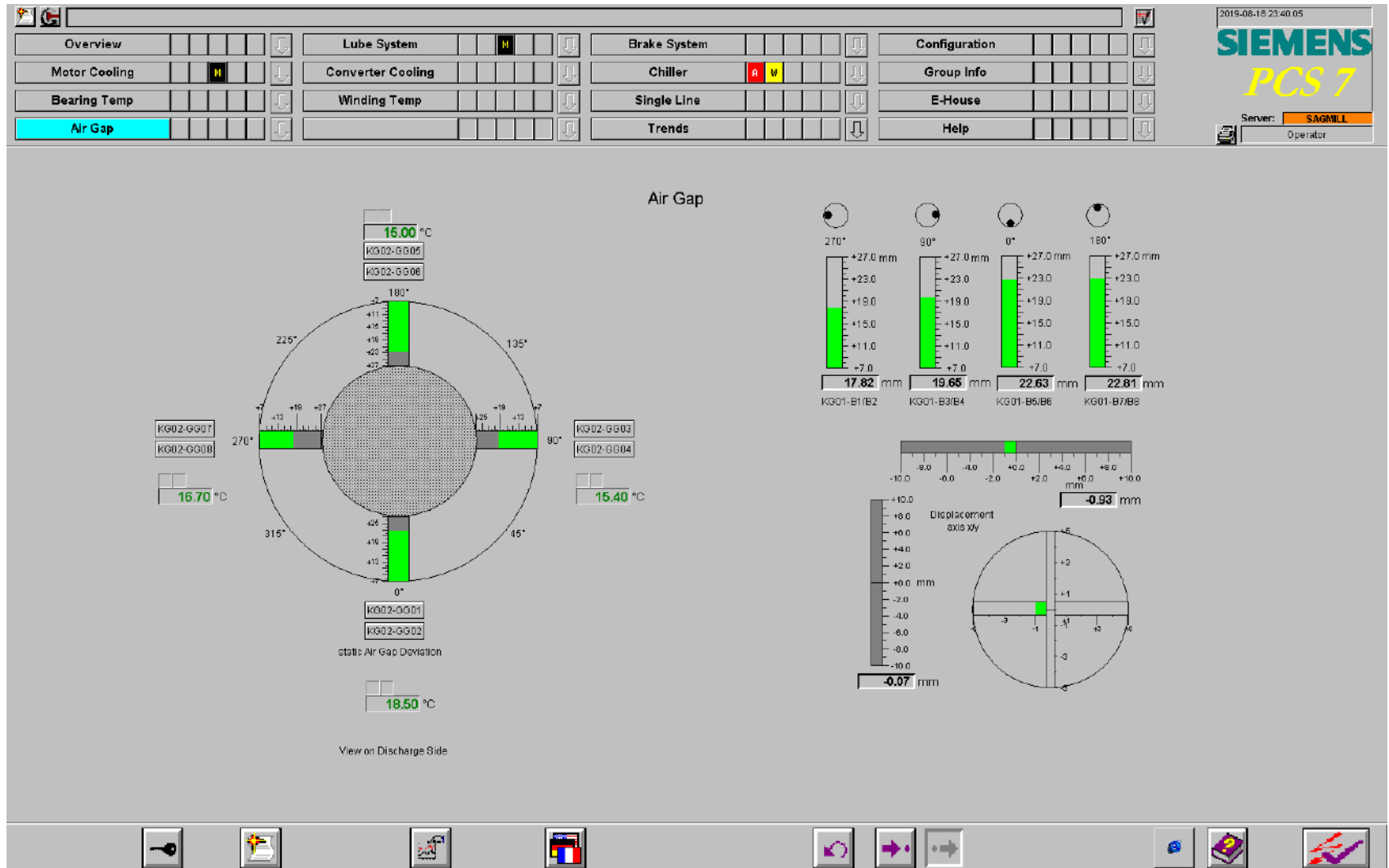


Figura 90. Valores del entrehierro del motor síncrono del molino Sag.

Fuente: [5]

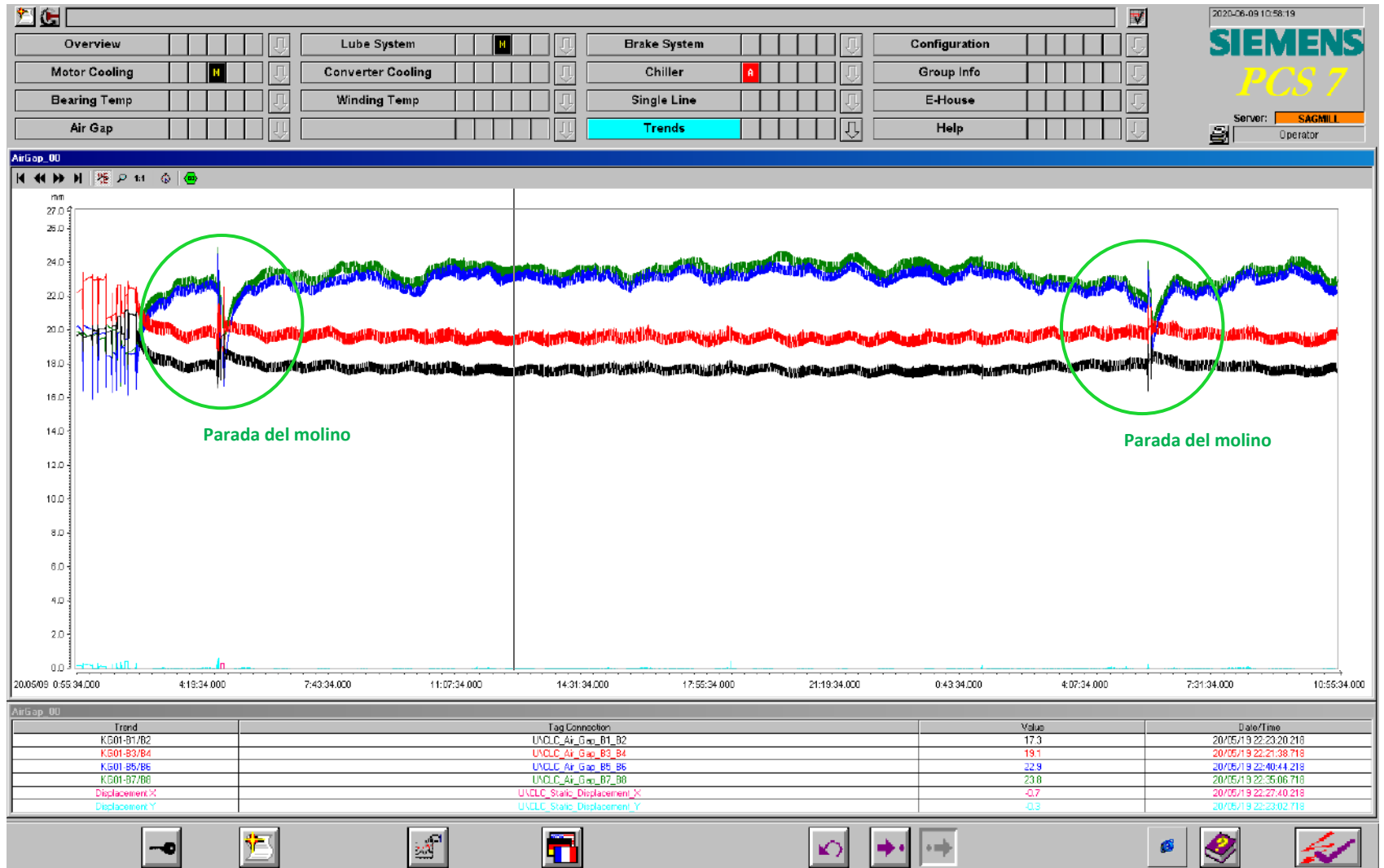


Figura 91. Comportamiento de los valores del entrehierro en la parada del molino.

Fuente: [5]

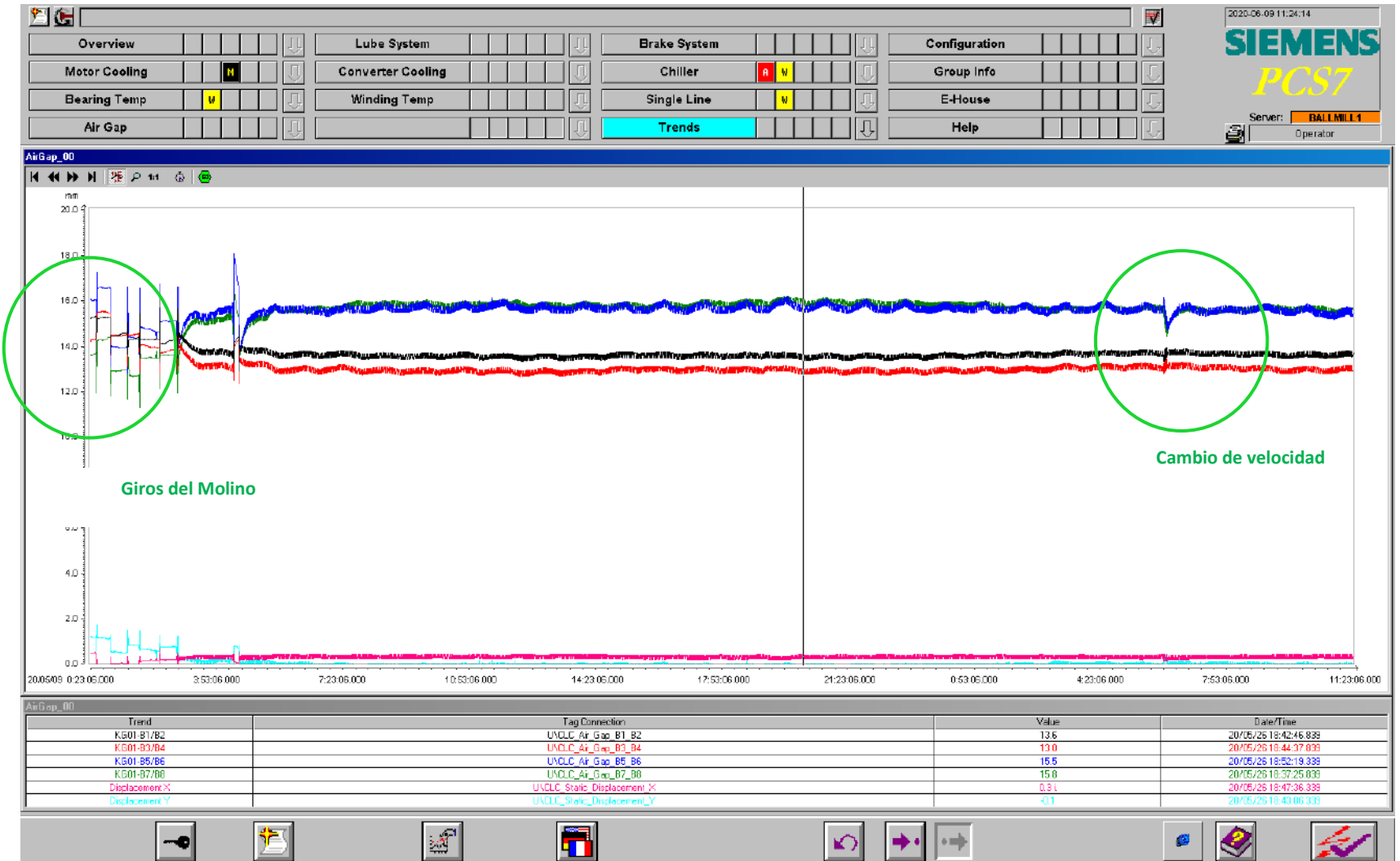


Figura 92. Comportamiento de los valores del entrehierro en giros y cambios de velocidad.

Fuente: [5]

### 6.7 Sistema de lubricación del molino Sag.

Esta ventana permite monitorear las temperaturas, flujos y presiones de aceite dentro del sistema de lubricación del molino.

También es posible verificar el estado de las bombas de baja y alta presión.

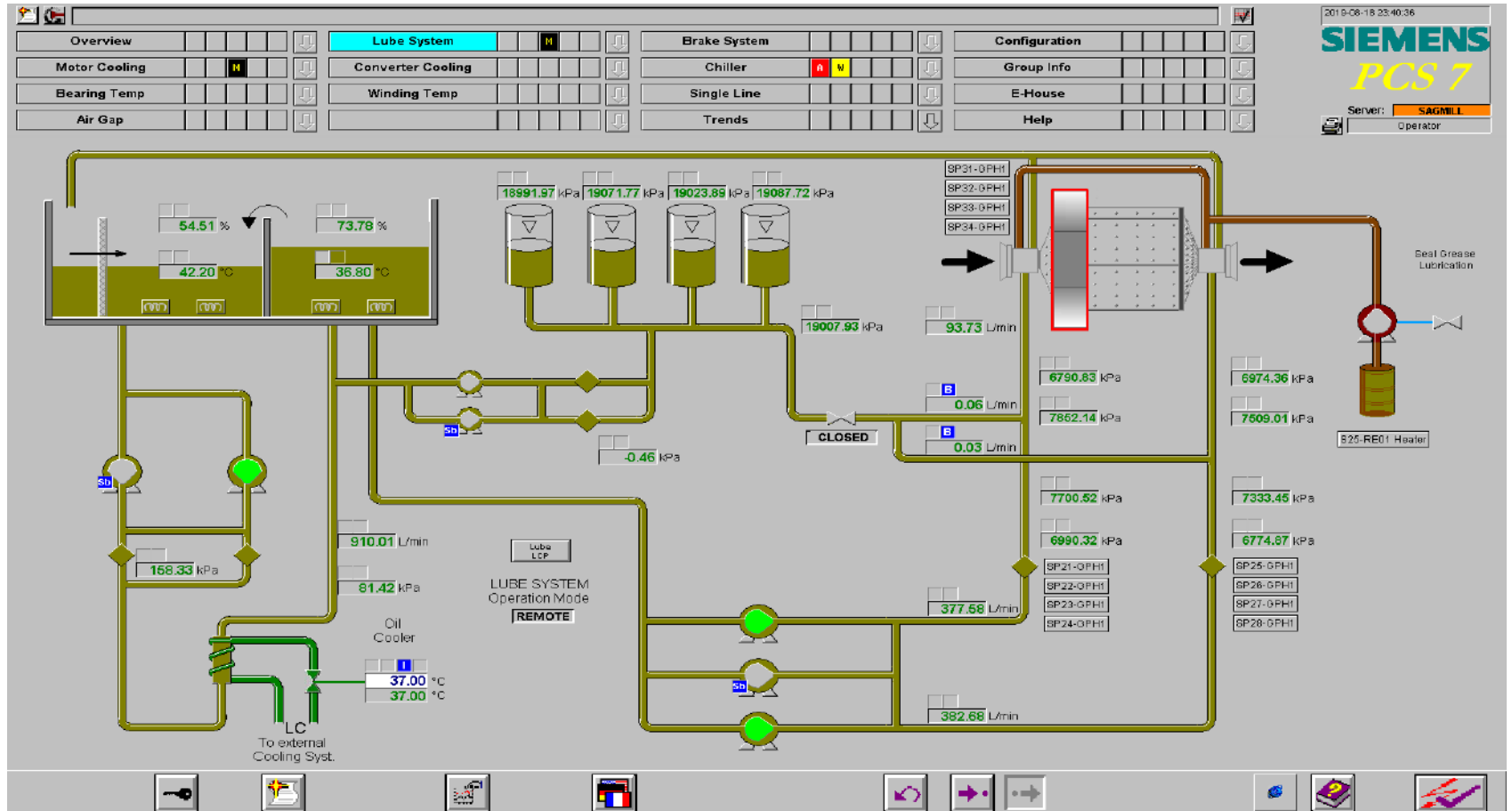


Figura 93. Sistema de lubricación del molino Sag.

Fuente: [5]

## 6.8 Sistema de enfriamiento del cicloconvertidor del motor síncrono.

Mantener frío el sistema de convertidores es una tarea que se considera tan crítica como las demás. Así como la conductividad del agua usada como medio de refrigeración.

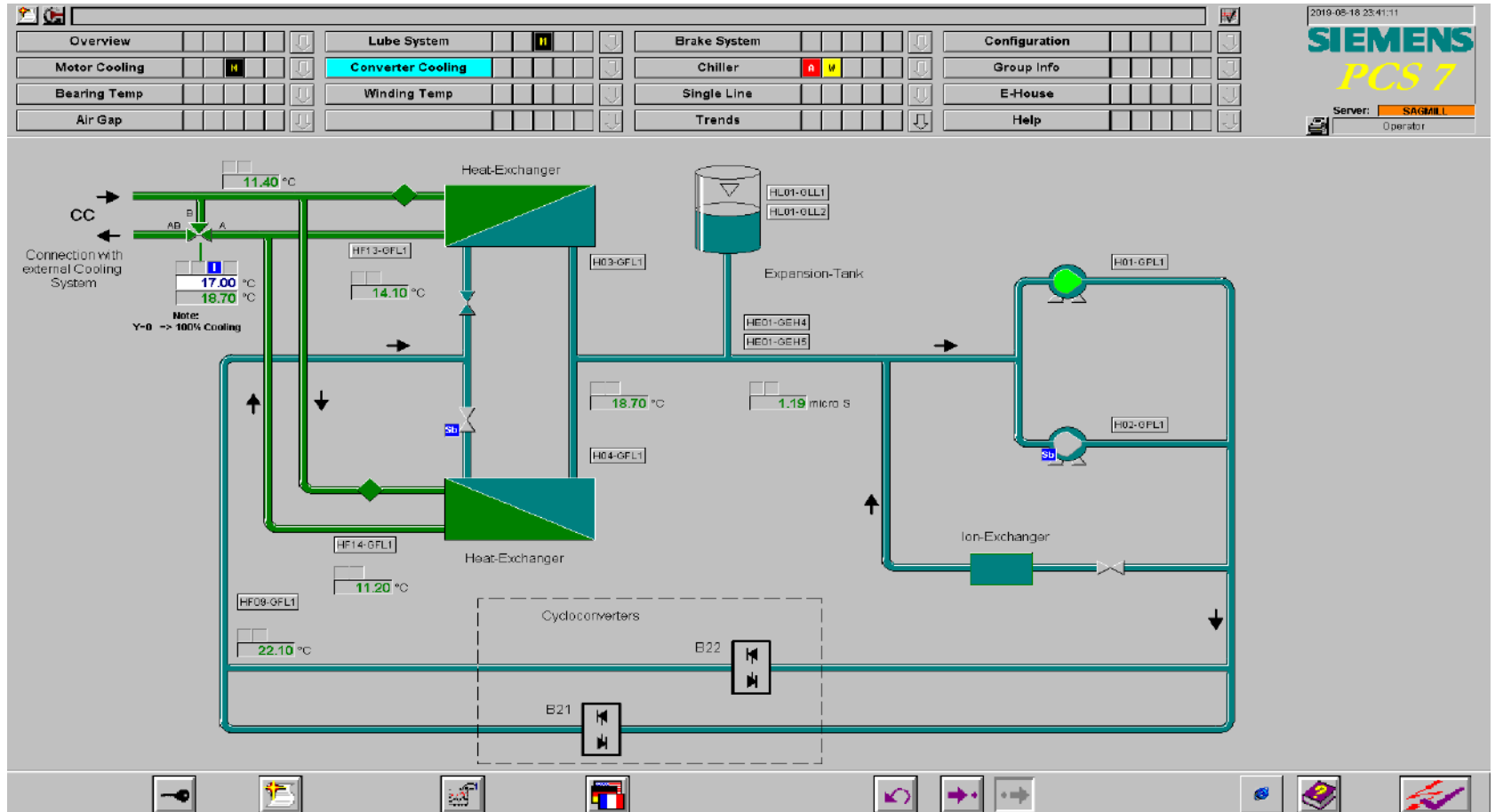


Figura 94. Sistema de enfriamiento del cicloconvertidor del motor síncrono – Molino Sag.

Fuente: [5]



### 6.9 Temperatura de los arrollamientos del motor síncrono.

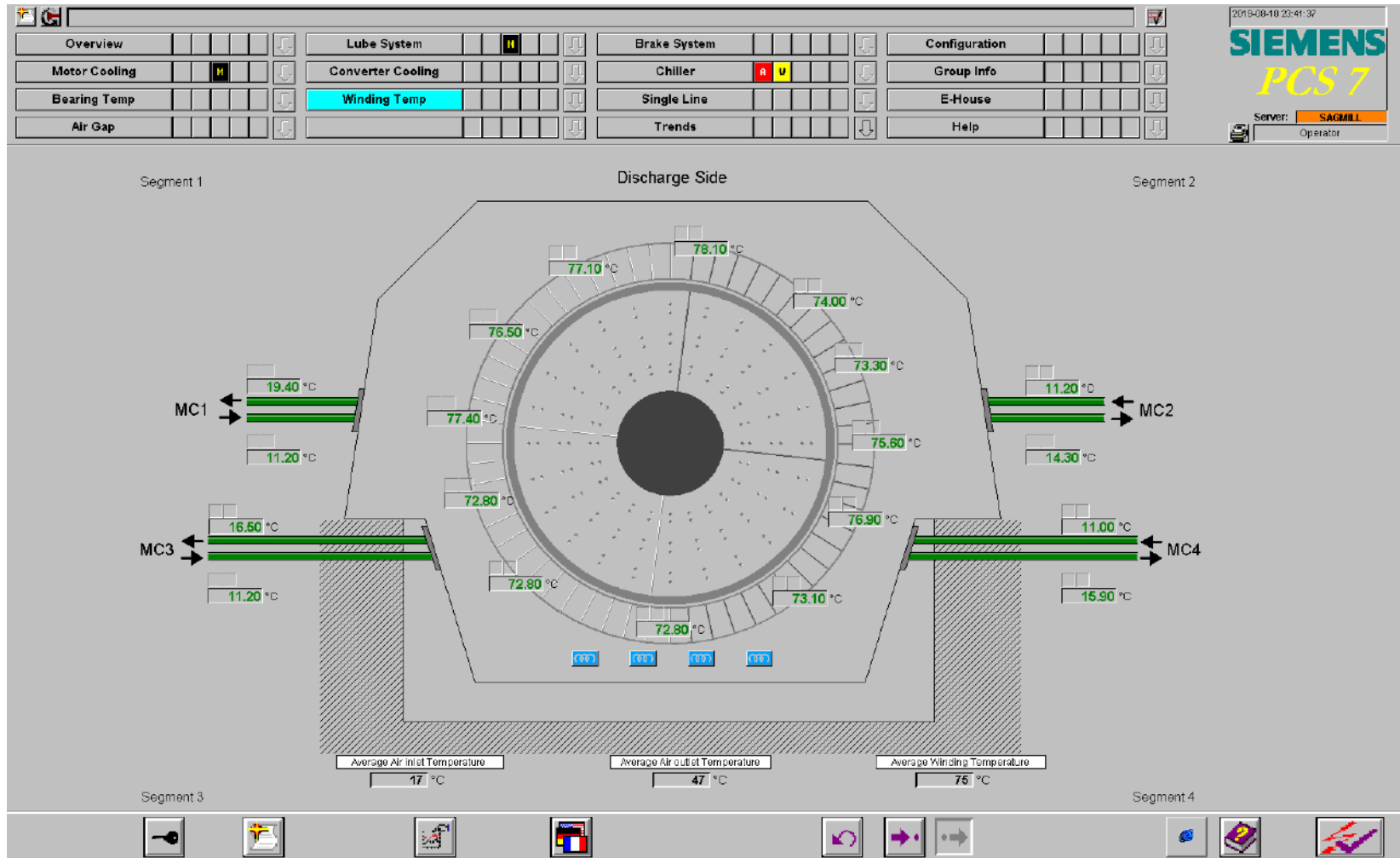


Figura 95. Valores de temperatura de los dos devanados de armadura del motor de anillo – Molino Sag.

Fuente: [5]

6.10 Sistema de freno del molino

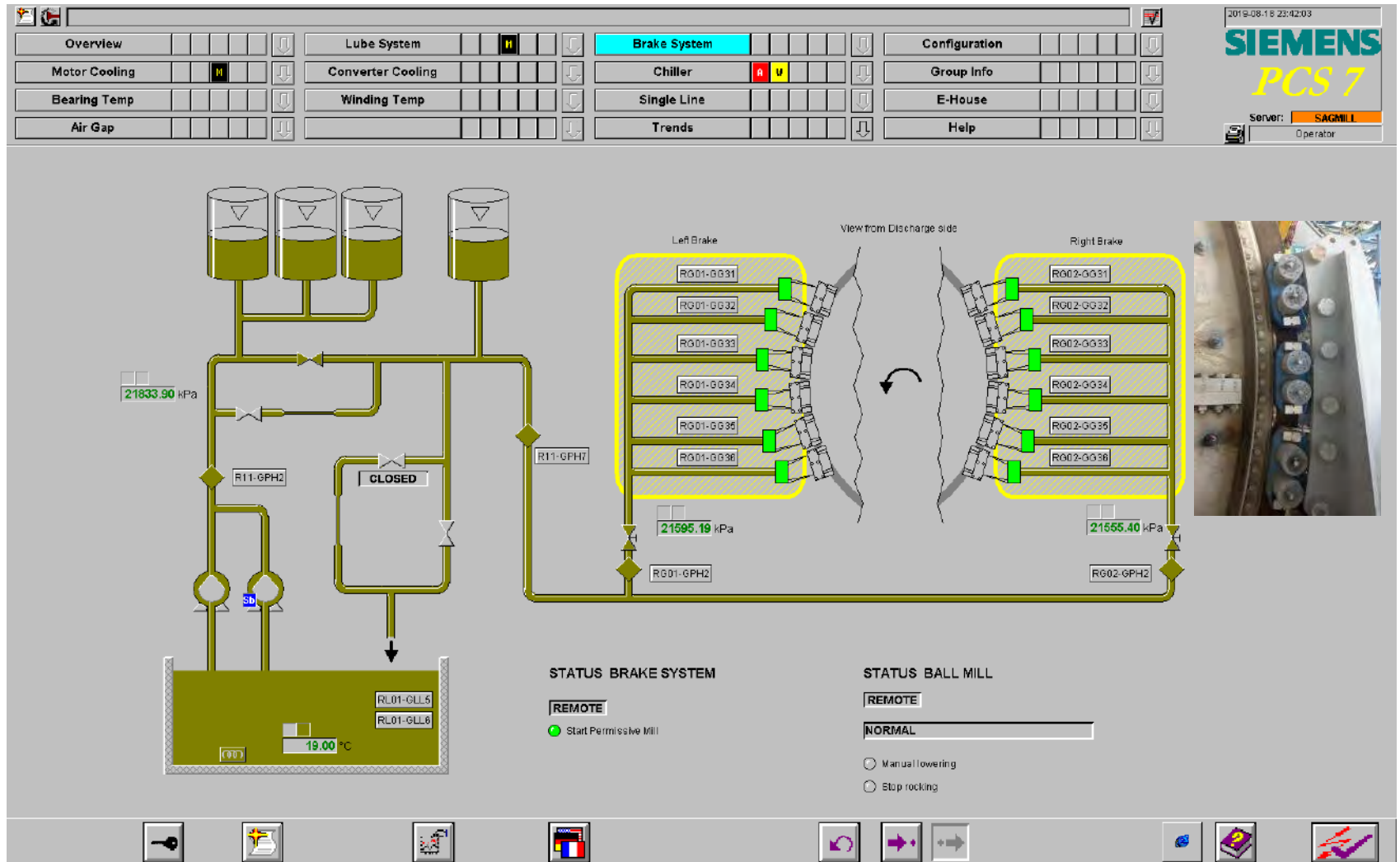


Figura 96. Componentes del sistema de freno del molino Sag.

Fuente: [5]

## 6.11 Sistema de los enfriadores del motor/molino.

En Antapaccay se cuenta con ocho enfriadores, de los cuales tres son para el molino Sag, dos para cada molino de Bolas y un enfriador es usado como reserva para el molino que lo necesite, teniendo prioridad el molino Sag.

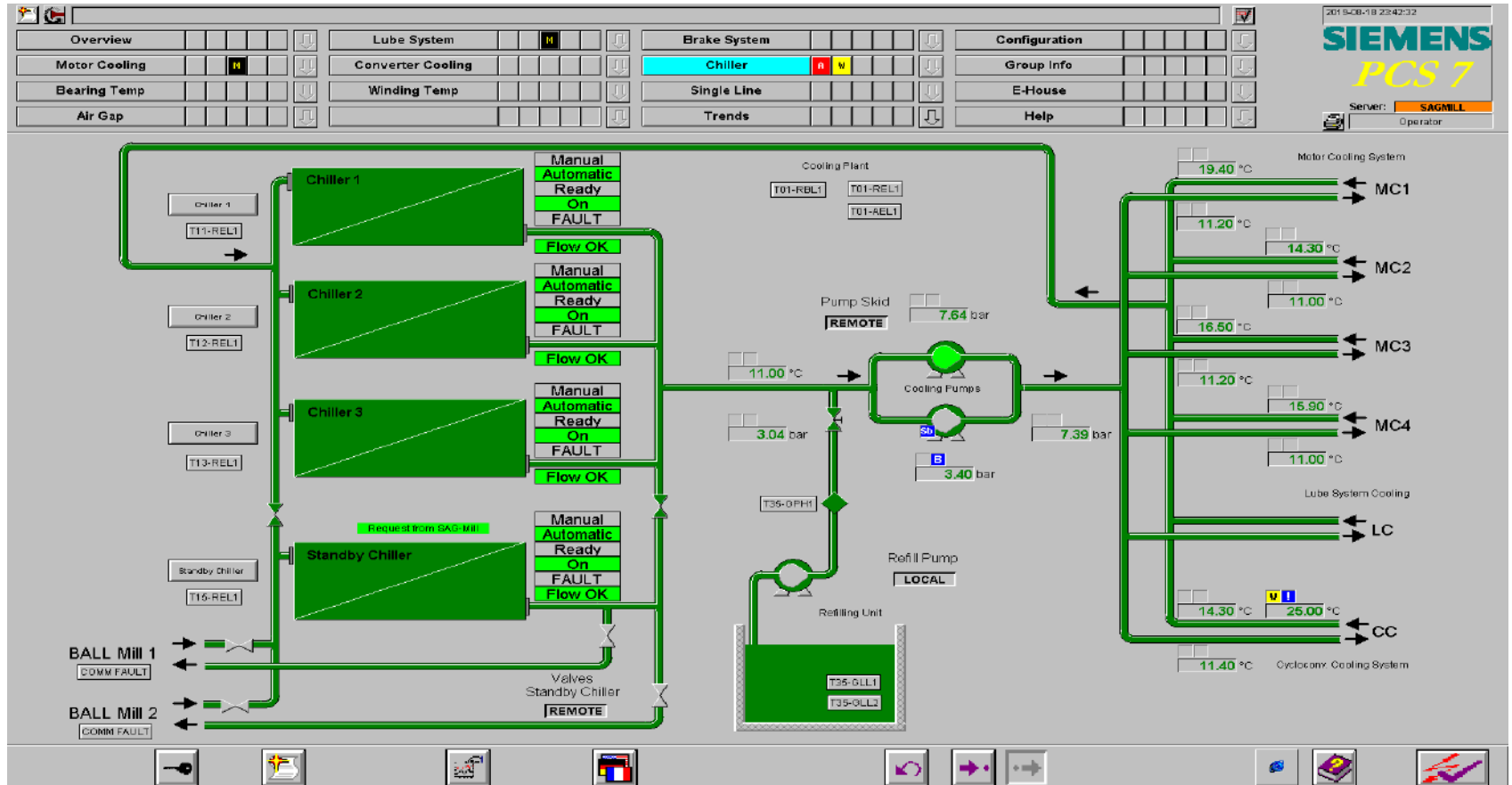


Figura 97. Conjunto de enfriadores usados para el molino Sag y sus auxiliares.

Fuente: [5]

### 6.12 E-house molino Sag.

Tiene el objetivo de mostrar al electricista el estado de los equipos en el cuarto de potencia y de control, el color verde indica que los equipos se encuentran trabajando correctamente.

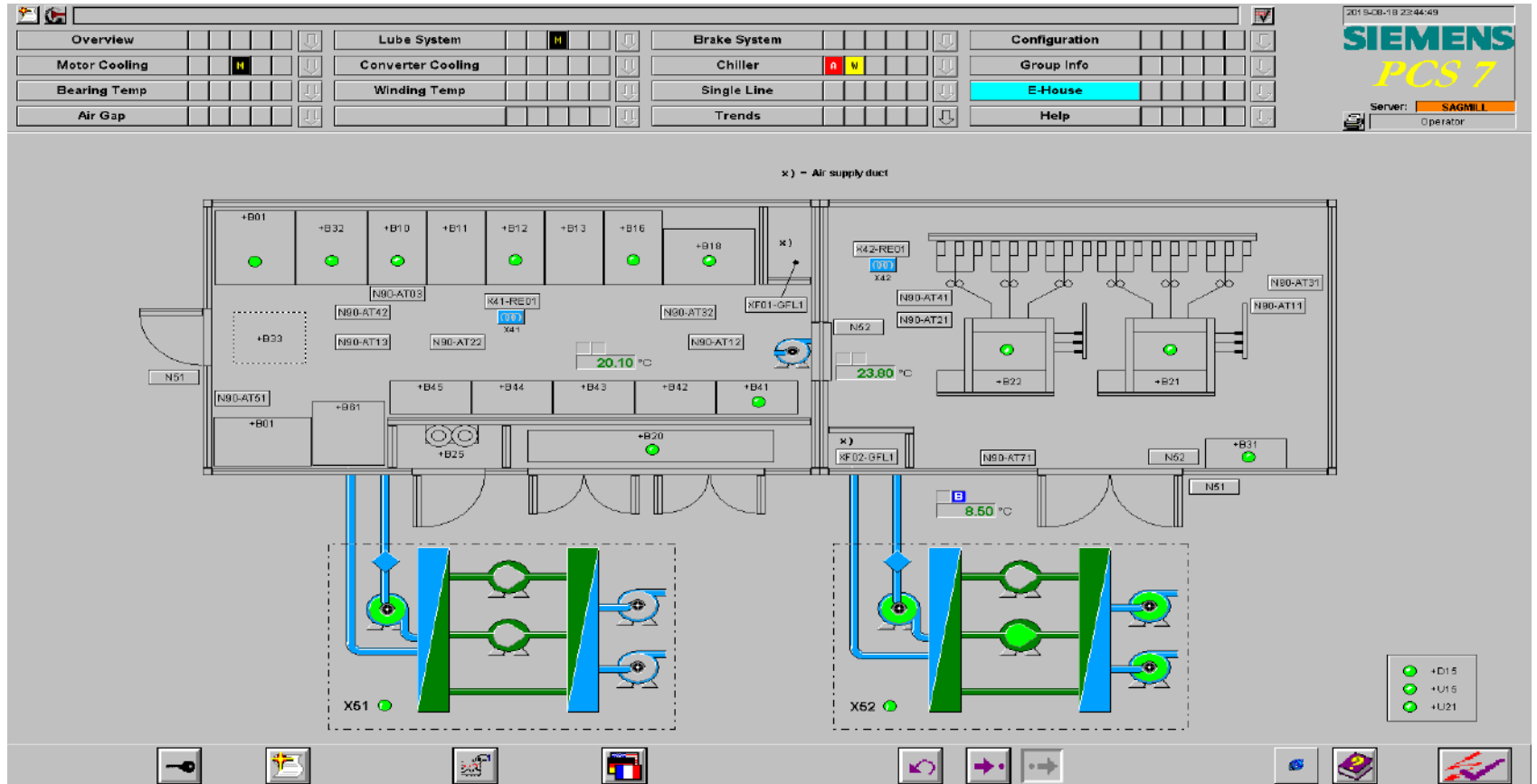


Figura 98. Equipos dentro del e-house del molino Sag.

Fuente: [5]

Tiene el objetivo de mostrar el tipo de parada que tuvo el molino, los permisos pendientes de revisión para el arranque del molino.

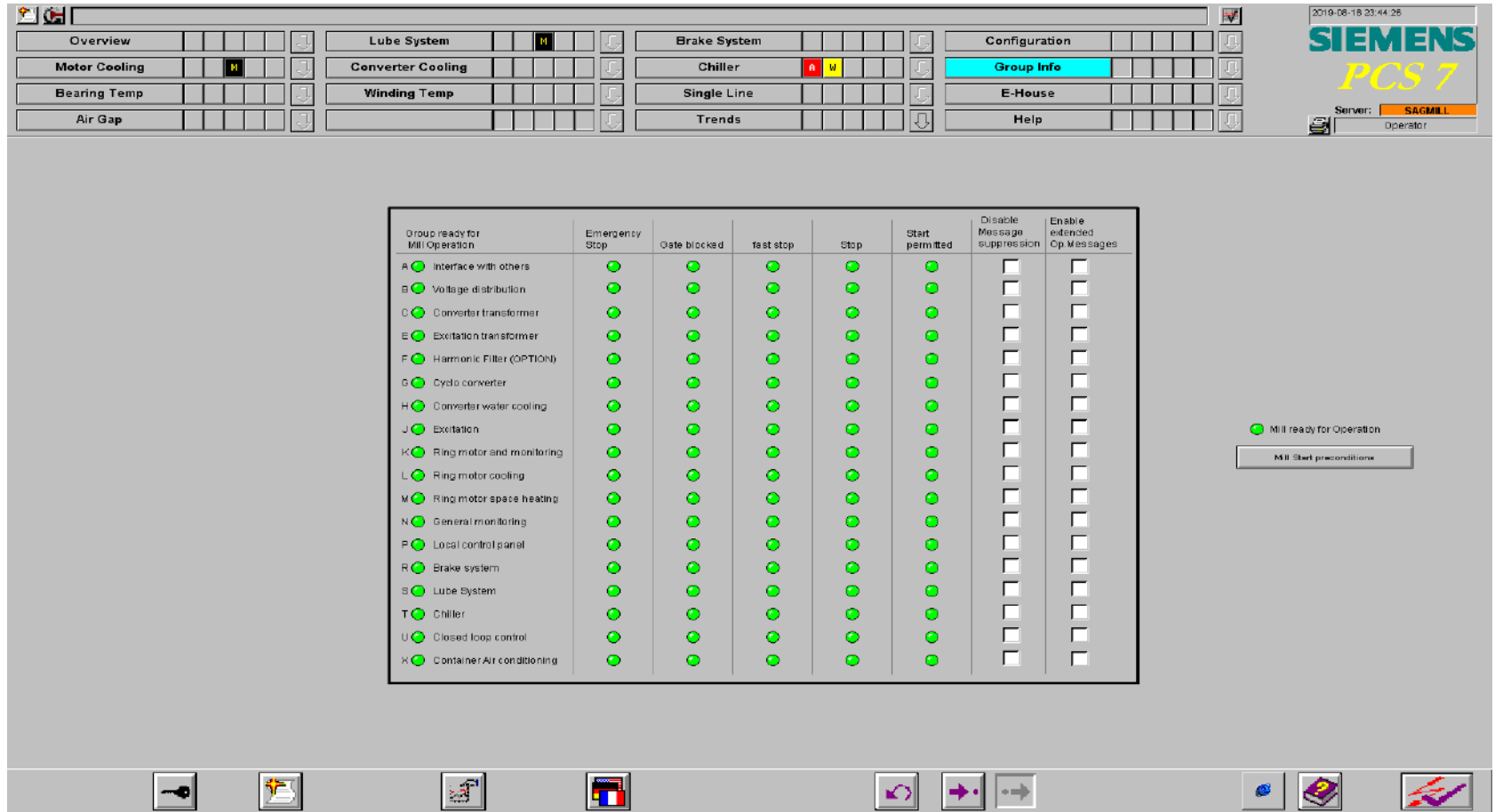


Figura 99. Información del estado actual de las islas del molino Sag.

Fuente: [5]

### 6.13 Leyenda WinCC

Ventana que muestra el estado del sistema GMD a través de colores, que facilitan al electricista, una rápida identificación de un evento no deseado.

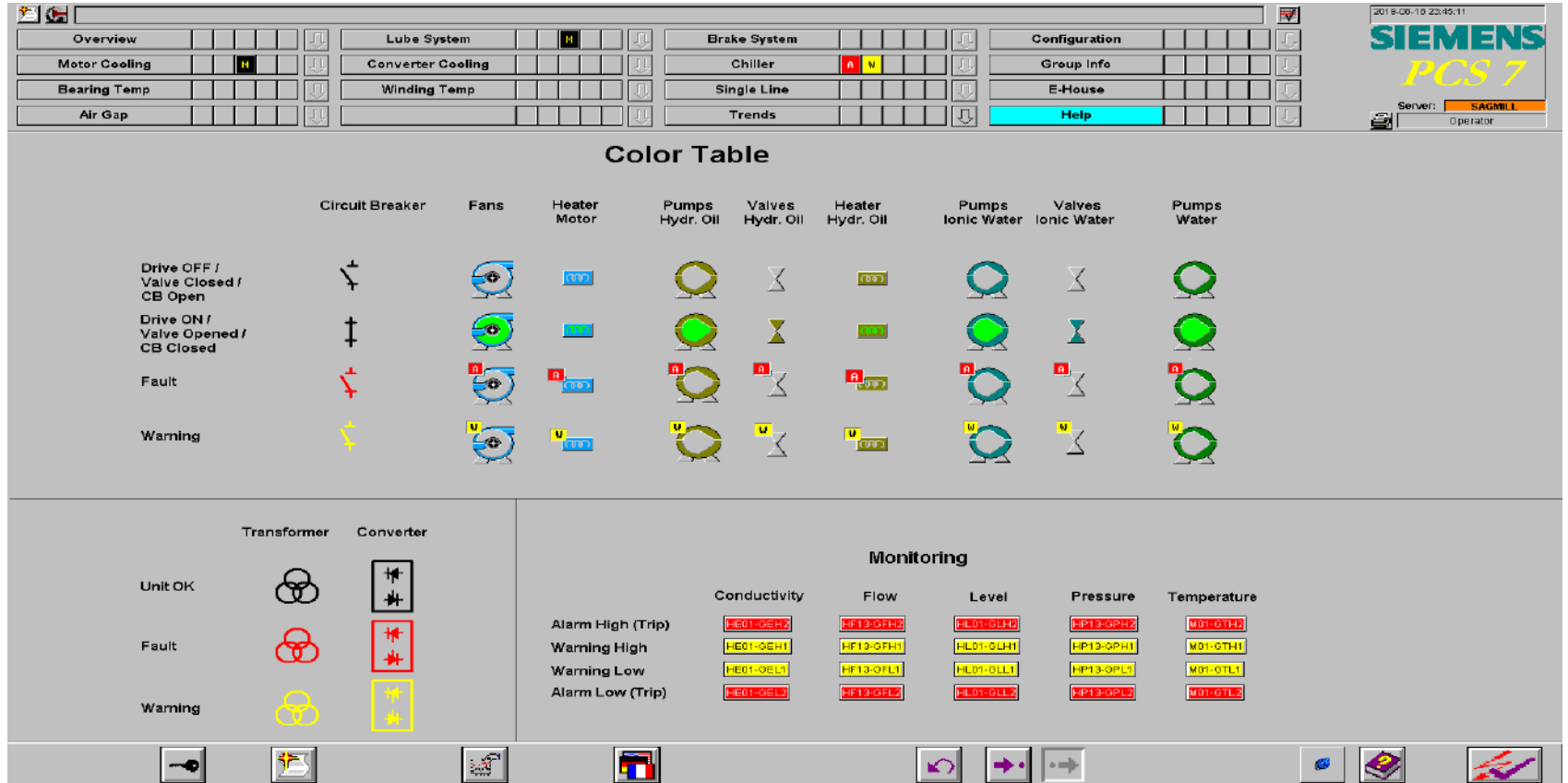


Figura 100. Símbolos usados para indicar estado o condición de un componente del sistema.

Fuente: [5]

### 6.14 Tendencias de las variables más importantes del sistema motor/molino.

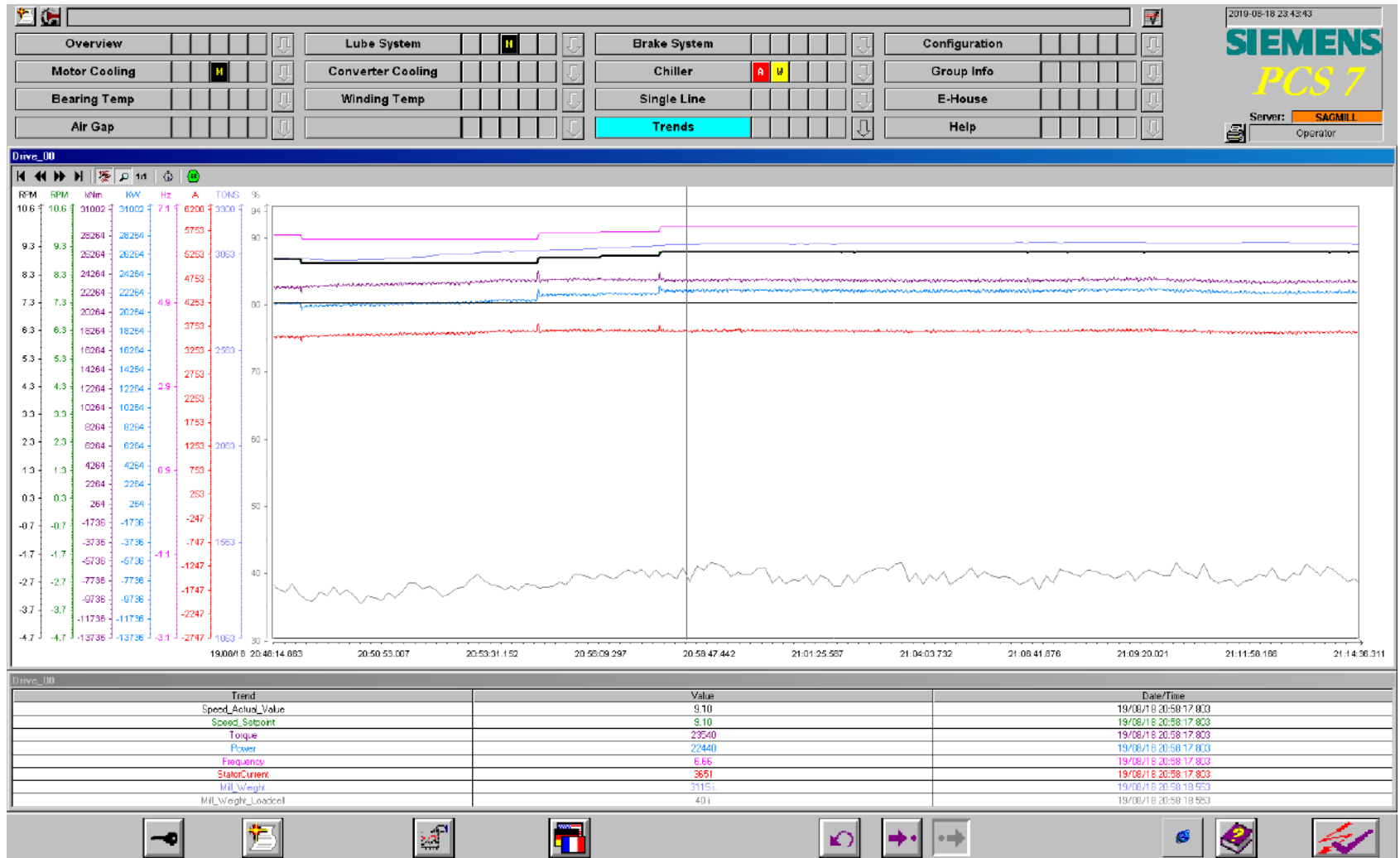


Figura 101. Tendencias de velocidad, torque, potencias, peso y corriente del molino Sag.

Fuente: [5]

## Conclusiones

De acuerdo al desarrollo del informe, se concluye lo siguiente:

- Compañía Minera Antapaccay S.A. a través de sus distintas gerencias, en especial a la gerencia de mantenimiento, no solo busca una rentabilidad económica como toda organización privada, sino también la rentabilidad social haciendo posible la dinamización de la economía regional, logrando el distintivo como una Empresa Socialmente Responsable (ESR) desde el año 2016. Sumado a lo anterior, contar con la credencial de Great Place to Work®, permite retener al mejor equipo de trabajo y atraer a nuevos colaboradores altamente competitivos. Y pese a los efectos originados por la pandemia del COVID – 19, Compañía Minera Antapaccay S.A. continúa realizando inversiones en equipamiento minero, como es la compra de 17 camiones Komatsu 980E-5 y la reparación de una pala CAT 7495 de carguío en el año 2019.
- El esquema operacional de un molino Sag y dos molinos de Bolas para la etapa de molienda en Compañía Minera Antapaccay S.A. permite prescindir de las chancadoras secundaria y terciaria, haciéndola más eficiente que los esquemas tradicionales.
- El uso de Molinos sin engranajes para la molienda, permite la reducción de costos de mantenimiento mecánico y eléctrico, al no contar con cajas reductoras (accionamientos gemelos) que ocupan espacio y generan ruido adicional en la planta. Desde el punto de vista operativo, los molinos son capaces de reiniciar la marcha, tan pronto se rompa la carga congelada, no existe limitación por el número de arranques del motor.
- Los motores síncronos son la solución preferida para molinos de alta potencia, en los últimos años se ha observado una clara tendencia en la gran minería. En el arranque de



motores síncronos existen dos técnicas de control, siendo la primera la de corriente o también llamado control vectorial y la otra, control de voltaje. El control vectorial limita la corriente del estator durante el arranque del motor a un valor no superior al 150 %. El motor arranca usando el modo de control de corriente hasta que la velocidad alcanza 3 rpm y luego cambia al control de voltaje. De este modo, el tiempo mínimo de arranque está limitado a 30 segundos con dos rampas de aceleración separadas por 10 segundos. Y en el comportamiento de los motores de anillo, operan desde el arranque con un factor de potencia en retraso, siendo para el caso del motor de 24 MW un valor medio de 97.83. Por otro lado, de acuerdo al registro de consumo de energías de los tres molinos, el mes de agosto del año 2020, se concluye que la etapa de molienda, tiene un consumo de, más de la mitad de lo que consume todo Antapaccay, así como lo muestra grafico siguiente.

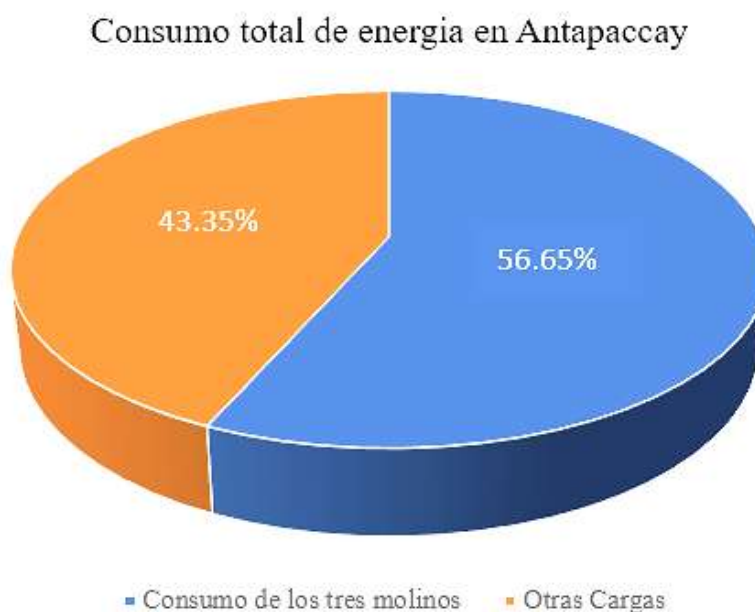


Figura 102. Consumo de los tres motores de anillo.

Fuente: Elaboración propia.

- La máxima frecuencia de salida está limitada aproximadamente a una tercera parte de la frecuencia de c.a. de entrada para mantener una onda aceptable y bajo contenido de armónicos. Para lograr conseguir un cicloconvertidor trifásico de 12 pulsos es necesario contar con un banco de tres transformadores trifásicos de aislamiento con diferente tipo de conexionado en sus devanados (estrella - triangulo). Y una adecuada protección del cicloconvertidor, garantiza la operatividad de los 144 tiristores en caso del motor del molino Sag, entregándose en los terminales de la maquina la onda sinusoidal de diseño.
- El correcto dominio del SIMATIC WinCC flexible en la operación de molinos sin engranajes, siempre será de gran ayuda no solo para el control o monitoreo de los sistemas auxiliares, sino también para la identificación y/o análisis de fallos de difícil diagnóstico o predecir los mismos.

## Bibliografía

- [1] Xstrata Copper, *Xstrata Copper Peru Operations Division 2012 Sustainability Report*, p. 5, 2012.
- [2] M. d. E. y. d. Minas, «BALANCE DEL SECTOR MINERO AL PRIMER SEMESTRE DEL 2021,» 2021.
- [3] P. 3. C. MINERA, 21 setiembre 2021. [En línea]. Available: <https://perumin.com/perumin35/public/es/noticia/antapaccay-nuestra-rentabilidad-social-nos-permite-mejorar-la-calidad-de-vida-de-nuestros-vecinos>. [Último acceso: 13 enero 2022].
- [4] PERU21, 04 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://peru21.pe/economia/compania-minera-antapaccay-obtiene-la-certificacion-great-place-to-work-noticia/>. [Último acceso: 13 enero 2022].
- [5] Compañía Minera Antapaccay S.A..
- [6] Glencore, «Glencore operaciones Perú,» [En línea]. Available: <https://www.glencoreperu.pe/es/antapaccay/Paginas/default.aspx>. [Último acceso: 01 marzo 2021].
- [7] Expansión. [En línea]. Available: [https://www.expansion.com/mercados/cotizaciones/materias/cobre\(londres\)\\_MCU.html](https://www.expansion.com/mercados/cotizaciones/materias/cobre(londres)_MCU.html). [Último acceso: 10 enero 2021].

- [8] Corporacion Mesto 2020, «Molinos AG/SAG,» [En línea]. Available: <https://www.metso.com/es/productos/molienda/molinos-autogenos-y-semiautogenos/>. [Último acceso: 01 Marzo 2021].
- [9] K. T. a. H. Liepold, «The Siemens 42ft gearless mill drive, still an evolutionary design approach?,» de *International Conference on Semi-Autogenous and High Pressure Grinding Technology*, Vancouver, 2016.
- [10] J. Rodriguez Fernandez, L. M. Cerdá Filiu y R. Bezos Sánchez-Horneros, *Automatismos industriales*, Madrid: Paraninfo, 2014.
- [11] S. Seung - Ki, *Control of Electric Machine Drive Systems*, New Jersey: IEEE PRESS, 2011.
- [12] S. J. Chapman, *Maquinas electricas*, Mexico: MC GRAW HILL, 2012.
- [13] J. F. A. Jesus Frayle Mora, *Accionamientos eléctricos*, Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES, SL, 2019.
- [14] J. C. S. V. T. Oscar Marcos, *Mantenimiento de maquinas eléctricas*, Madrid: Editex S.A., Mayo 2004.
- [15] L. M. R. P. A. C. O. P. Aravena, «High Power Cycloconverter for Mining Applications: Practical Recommendations for Operation, Protection and Compensation,» de *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Lake Buena Vista, FL, USA, 2013.
- [16] SIEMENS, [En línea]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/medium-voltage-converters/sinamics-sl150.html>. [Último acceso: 01 03 2021].

- [17] B. K. Bose, «Ore-Grinding Cycloconverter Drive Operation and Fault: My Experience with an Australian Grid,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, n° 5, pp. 12-22, 15 December 2011.
- [18] J. R. J. R. K. T. N. B. Jorge O. Pontt, «Operation of High-Power Cycloconverter-Fed Gearless Drives Under Abnormal Conditions,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, n° 3, pp. 814-820, 29 May 2007.
- [19] F. A. F. M. Godoy Simoes, *Modeling and Analysis with Induction Generators*, Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group, 2015.
- [20] SIEMENS AG, «SIMATIC WinCC flexible,» Abril 2009.
- [21] G. Glencore, «Glencore Operaciones Peru,» 2017-2019. [En línea]. Available: <http://antapaccay-laboral.bumeran.com.pe/>.
- [22] COES, «Unifilar del SEIN,» [En línea]. Available: <https://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/CaractSEIN/DiagramaUnifilar>. [Último acceso: 03 Agosto 2020].
- [23] Ministerio de Energía y de Minas, "Cartera de Proyectos Construcción de Mina 2021, Ministerio de Energía y de Minas", Primera ed., Lima, Noviembre de 2021.

# ANEXOS



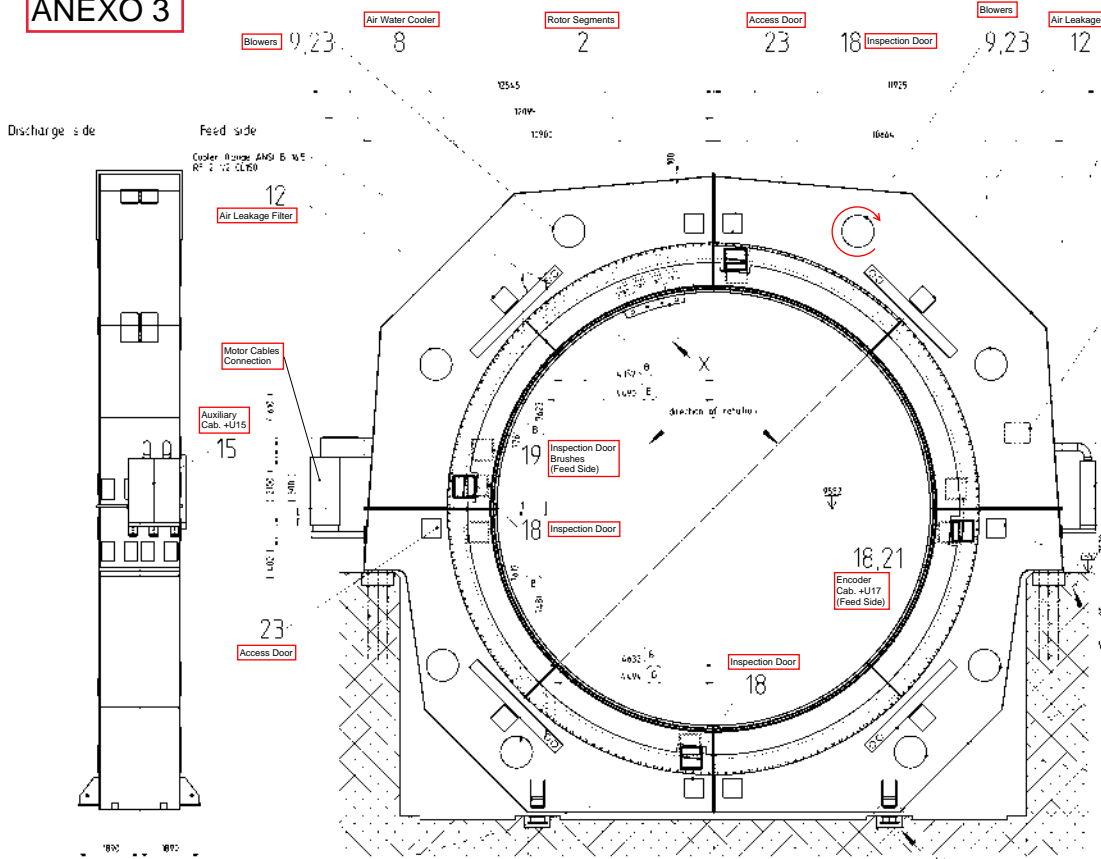
ANEXO 2: DATOS DE PLACA DEL MOTOR DE LOS MOLINOS DE BOLAS

| <b>SIEMENS</b>                     |        |       |                                   |                 |                   |  |
|------------------------------------|--------|-------|-----------------------------------|-----------------|-------------------|--|
| TIPO: 1DN8243-8XA32-Z              |        |       |                                   | 2008            |                   |  |
| 3~ MOTOR                           |        |       |                                   | NO: D0850104501 |                   |  |
| V                                  | A      | kW    | Cl. de servicio                   | cosφ            | min <sup>-1</sup> |  |
| 3900                               | ↘ 2593 | 16400 | S1                                | 0.955 u         | 11.370            |  |
| ←-----→                            |        |       | W1 V1 U1 U1 V1 W1                 |                 | 6.064 Hz          |  |
| EXCITACION:                        |        |       | 287 V                             |                 | 754 A             |  |
| CL. DE AISL.: 155 (F)              |        |       | TEMP. AMB. MIN./MAX.: -5 °C/40 °C |                 | 431 t             |  |
|                                    |        |       | IP55                              |                 |                   |  |
| IC75W                              |        |       | 1383 l/min AGUA                   |                 | 20 °C             |  |
| ALTURA DE DISPOS.: 4200 m          |        |       |                                   |                 |                   |  |
| IEC 60034                          |        |       |                                   |                 |                   |  |
| Siemens AG, Dynamowerk Berlin      |        |       |                                   |                 |                   |  |
| Nonnendammallee 72, D-13629 Berlin |        |       |                                   |                 |                   |  |
| MADE IN GERMANY                    |        |       |                                   |                 |                   |  |

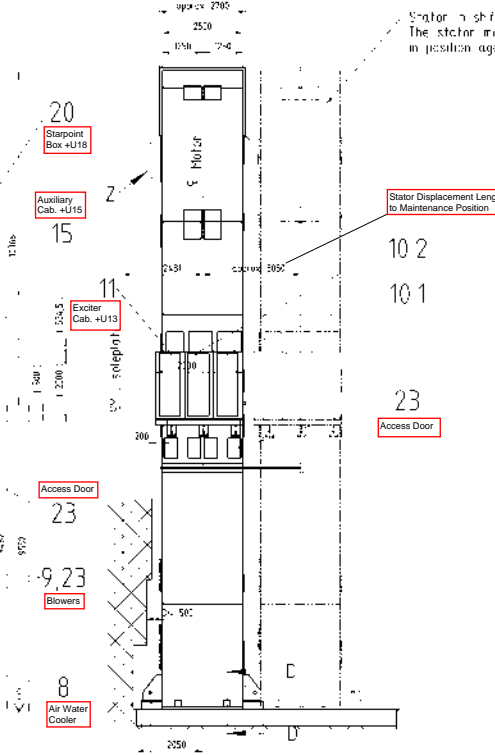


# ANEXO 3

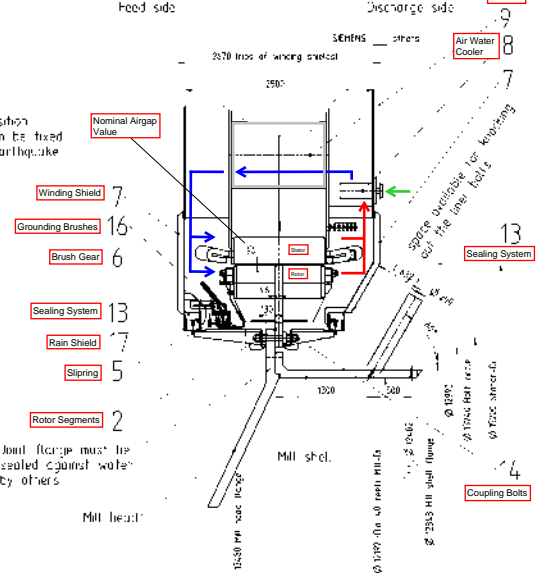
## View at Discharge side



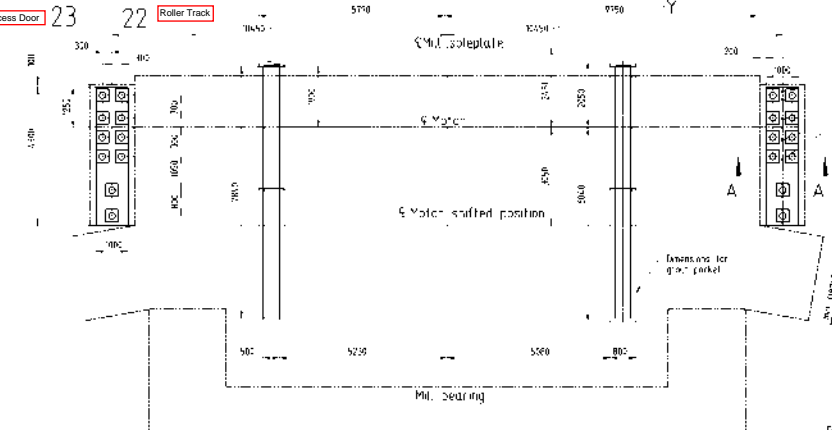
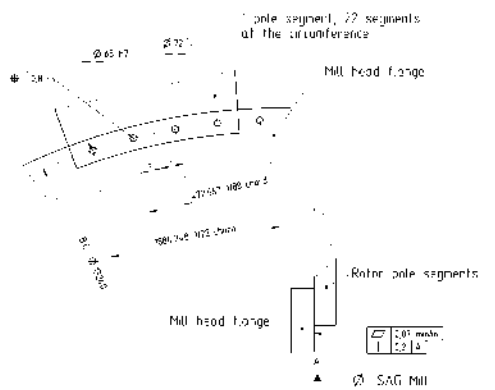
## Feed side Discharge side



## Detail Z



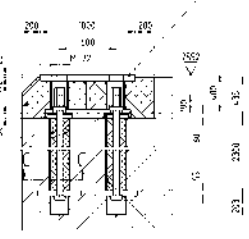
## Detail X



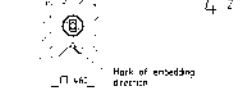
3 Sole Plates  
4 Pins each side (see Detail VI)

welded supports and load roller for stator movement

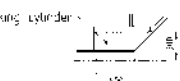
## Section A-A



## Section C-C



## Section D-D



Before starting the stator, loosen, unscrew and remove nut, then unscrew the short stud bolt

Stator Jacking cylinders

Soleplates

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| ISSUED          | FOR APPROVAL |
| FOR INFORMATION | FOR OFFER    |

- Soleplate absolutely horizontal  
Height tolerance of the upper machined surface to be within  $\pm 0.05mm$   
Horizontal position of the soleplate centerline (x and y) to be within  $\pm 0.5mm$  at ambient temperatures
- Anchor sleeves (supplied by SIEMENS):  
The vertical tolerance for embedding the anchor sleeves is  $\pm 5mm$   
The axis of each anchor sleeve must be within a cylinder with  $\pm 5mm$  diameter, for horizontal distance tolerance between the anchor sleeves including the incline

|         |         |
|---------|---------|
| SIEMENS | SIEMENS |
| SIEMENS | SIEMENS |
| SIEMENS | SIEMENS |
| SIEMENS | SIEMENS |
| SIEMENS | SIEMENS |

|                   |                   |          |           |
|-------------------|-------------------|----------|-----------|
| Project Name      | Project No.       | Revision | Date      |
| Client            | Contract No.      | Scale    | Sheet No. |
| Design            | Drawn             | Checked  | Approved  |
| Dimension Drawing | 005-0110-586894-C |          |           |



INFORME DE TRABAJOS REALIZADOS EN LA PARADA DE MOLIENDA EL 09 DE SETIEMBRE DEL 2022

A: Angel Pinto.

De: Jaime Saico.





Asunto: Informe de trabajos realizados en la parada molienda de 9 de setiembre.

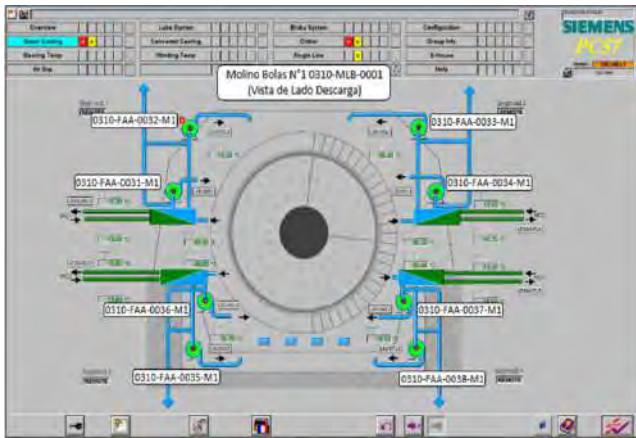


Fecha: 2022/09/10

**1. OBJETIVO**

- Informar sobre los trabajos ejecutados en la parada de molienda, así como las oportunidades de mejora y planes de acción identificadas.

**2. DETALLE DE LOS TRABAJOS EFECTUADOS EN MOLINOS**

| ITEM | OT       | CORRECCIÓN FUGA DE ACEITE TRANSFORMADOR 3 MOLINO SAG |   |
|------|----------|--|---|
| 1    | 10688940 | <b>EJECUTORES:</b>                                   | Se tuvo el soporte de Alta (2 técnicos), 1 técnico de gearless y 2 de Control Total.  |
|      |          | <b>HALLAZGOS:</b>                                    | Se encontró fuga de aceite por falta de <b>ajuste del busging de la fase S</b> del primario del transformador.<br> <p>Se verifica que la fuga de aceite fue por falta de ajuste de uno de los pernos del bushing.</p>   |
|      |          | <b>CORRECCIÓN:</b>                                   | Se procedió con el cambio de empaque y bushing reforzado. Se repuso la terminación y se realizó limpieza.<br>   |

| ITEM              | OT   | CAMBIO DEL VENTILADOR 310-FAA-0036 DEL MOLINO DE BOLAS 1 |  |
|-------------------|--|--|--|
| 2                 | 10688940   | <b>EJECUTORES:</b>                                       | Se tuvo el soporte 5 tecnicos de Control Total y 1 de  |
|                   |  | <b>HALLAZGOS:</b>  | <p>Según horómetro del WinnCC éste ventilador llevaba trabajando con mas de 60 mil h.</p>    |
|                   |  | <b>TRABAJOS PREVIOS:</b>                                 | <p>Luego de probar en el ventilador en taller, se traslada a la plataforma de molinos y con apoyo grua puente y abriendo un greating, se logra bajar a la parte inferior del molino:</p>  |
| <b>CORRECIÓN:</b> | <p>Se procedió con el armado de andamios y apertura de tapas para el cambio del ventilador. Con el nuevo isntado se verifico el correcto sentido de giro.</p>  |  |  |

| ITEM | OT       | MEDICION Y CAMBIO DE CAREBONES MOLINO SAG                        |  |
|------|----------|--|--|
| 3    | 10686261 | <b>EJECUTORES:</b> Roland Lopez                                  |  |
|      |          | <b>HALLAZGOS:</b> Se ralizo medición de carbones y se cambio 01. |  |

**MEDIDAS DE CARBONES MOTOR MOLINO SAG**

ANTAPACCAY

TAG:

UNIDAD DE MEDIDA:

|          | ANILLO IZQUIERDO |      | ANILLO DERECHO |      | TIERRA |
|----------|------------------|------|----------------|------|--------|
|          | 1                | 2    | 1              | 2    |        |
| SUPERIOR | 41.2             | 42.4 | 42.9           | 45.2 | 40.5   |
|          | 43.0             | 45.0 | 36.2           | 38.1 |        |
|          | 40.1             | 44.2 | 38.2           | 35.5 |        |
|          | 39.5             | 42.6 | 42.5           | 42.3 |        |
| INFERIOR | 38.9             | 32.4 | 49.3           | 40.5 | 42.8   |
|          | 36.5             | 38.6 | 47.9           | 39.0 |        |
|          | 40.0             | 41.3 | 42.1           | 40.6 |        |
|          | 43.8             | 42.6 | 42.4           | 43.6 |        |

MEDIDA ESTANDAR DEL CARBON 50 mm

MEDIDA DE RECAMBIO DEL CARBON 35 mm

Se debe dejar constancia en Observaciones cuál es el carbón que se cambió. La medida "B" debe ser de un máximo que no permita que el portacarbón haga contacto con el anillo.


**OBS** → Se cambio carbón. Se realizó cambio de 01 carbón.

EJECUTADO POR:

SUPERVISOR:

EMPRESA:

FECHA:



| ITEM | OT       | MEDICION Y CAMBIO DE CAREBONES MOLINO DE BOLAS 1                    |  |
|------|----------|---|--|
| 4    | 20799768 | <b>EJECUTORES:</b> Roland Lopez                                     |  |
|      |          | <b>HALLAZGOS:</b> Se realizó medición de carbones y se cambio 03 u. |  |

**MEDIDAS DE CARBONES MOTOR MOLINO BOLAS 1**

ANTAPACCAY

TAG:

UNIDAD DE MEDIDA:

|          | ANILLO IZQUIERDO |      | ANILLO DERECHO |      | TIERRA |
|----------|------------------|------|----------------|------|--------|
|          | 1                | 2    | 1              | 2    |        |
| SUPERIOR |                  |      |                |      | 42.4   |
|          | 42.4             | 45.7 | 45.3           | 42.1 |        |
|          | 34.5             | 44.5 | 45.0           | 45.8 |        |
|          | 42.5             | 42.2 | 48.0           | 48.2 |        |
| INFERIOR | 41.9             | 36.7 | 42.0           | 42.9 | 44.2   |
|          | 45.2             | 49.3 | 43.0           | 41.5 |        |
|          | 42.0             | 44.5 | 37.8           | 41.9 |        |
|          | 49.0             | 49.2 | 43.0           | 44.8 |        |

MEDIDA ESTANDAR DEL CARBON 50 mm

MEDIDA DE RECAMBIO DEL CARBON 35 mm

Se debe dejar constancia en Observaciones cuál es el carbón que se cambió. La medida "B" debe ser de un máximo que no permita que el portacarbón haga contacto con el anillo.


**OBS** → Se realizó cambio de 03 carbones

EJECUTADO POR:

SUPERVISOR:

EMPRESA:

FECHA:



| ITEM | OT       | MEDICION Y CAMBIO DE CAREBONES MOLINO DE BOLAS 2 |   |
|------|----------|--|---|
| 5    | 20799769 | <b>EJECUTORES:</b>                               | Roland Lopez                                      |
|      |          | <b>HALLAZGOS:</b>                                | Se realizó medición de carbones y se cambio 02 u. |

**MEDIDAS DE CARBONES MOTOR MOLINO BOLAS 2**

310-MLB-0002

ANTAPACCAY


TAG: \_\_\_\_\_

UNIDAD DE MEDIDA: \_\_\_\_\_ MILIMETROS (largo total carbón): \_\_\_\_\_

|  | ANILLO IZQUIERDO |          | ANILLO DERECHO |          | TIERRA |
|--|------------------|----------|----------------|----------|--------|
|  | Superior         | Inferior | Superior       | Inferior |        |
|  |                  |          |                |          | 43.9   |
|  | 45.5             | 48.5     | 31.5           | 46.2     |        |
|  | 49.3             | 48.0     | 47.5           | 37.5     |        |
|  | 35.8             | 49.2     | 47.9           | 57.5     |        |
|  | 38.5             | 49.3     | 45.5           | 48.3     |        |
|  | 45.9             | 49.3     | 41.3           | 37.5     |        |
|  | 46.9             | 40.1     | 43.8           | 42.3     | 47.0   |
|  | 43.8             | 49.3     | 44.0           | 41.2     |        |

MEDIDA ESTANDAR DEL CARBON 50 mm  
MEDIDA DE RECAMBIO DEL CARBON 35 mm

Se debe dejar constancia en Observaciones cuál es el carbón que se cambia. La medida "SI" debe ser de un máximo que no permita que el portacarbon haga contacto con el anillo.



EJECUTADO POR: R Lopez

SUPERVISOR: J S...

EMPRESA: Antapaccay

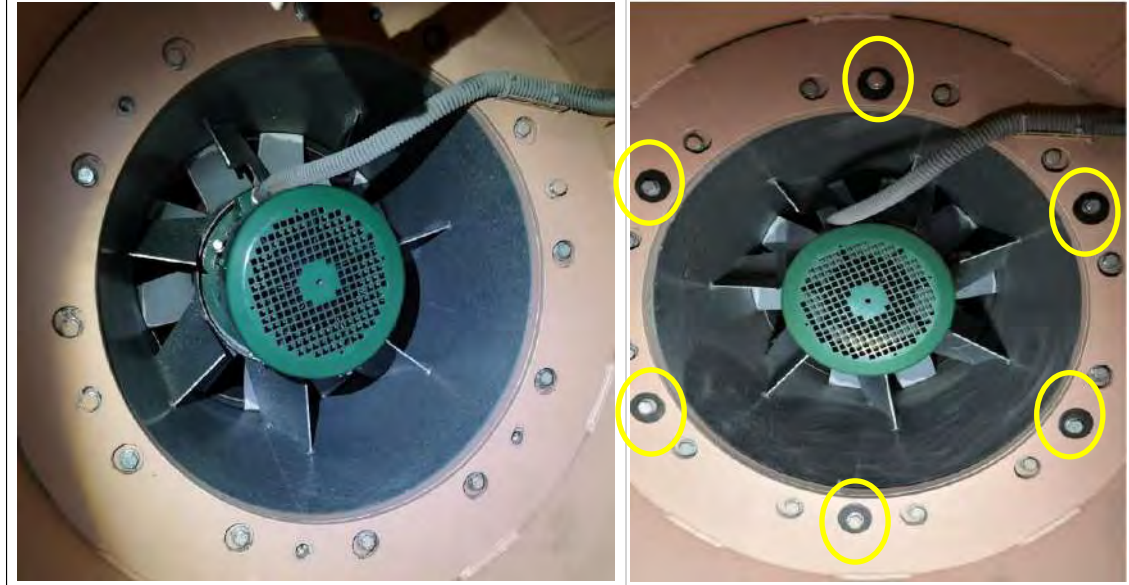
FECHA: 7-9-2022

OBS: Se realizó cambio de 2 carbones

| ITEM | OT | CORRECCION DE MONTAJE VENTILADOR 310-FAA-0038-M1 |  |
|------|----|--|--|
|------|----|--|--|

|   |          |                    |   |
|---|----------|--------------------|---|
| 6 | 10686365 | <b>EJECUTORES:</b> | Golbert Ccama y personal de ControlmTotal |
|---|----------|--------------------|---|

|  |   |
|--|---|
| <b>HALLAZGOS:</b> Ventilador sujetado con solo dos pernos. | <b>CORRECCIÓN:</b> Se retiró el ventilador y se hizo ojo chino en 6 posiciones para completar todos los pernos. |
|--|---|



| ITEM   | OT       | CAMBIO DE CONTROLADOR CAREL PC01 DEL CUARTO DE POTENCIA 310-MLB-001  |                                   |
|--|----------|--|-----------------------------------|
| 7  | 10686370 | <b>EJECUTORES:</b>   | Roland Lopez y personal de LASER. |
| <b>HALLAZGOS:</b>  |          | <b>CORRECCIÓN:</b>   |                                   |
| Se identifica que el controlador del HVAC del cuarto de potencia dejó de comandar sobre los ventiladores. Ello debido a que se encontró dos relés de 24Vdc inoperativos. |          | Se retiro el controlador CAREL del cuarto de potencia y se instala el controlador del cuarto de control. El controlador saliente se repara cambiando los dos relés inoperativos y se instala en el HVAC del cuarto de control. |                                   |

| ITEM                         | OT       | PRUEBAS DE LOS RELÉS DE PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE LOS MOLINOS SAG, BOLAS 1 Y BOLAS 2. |                                 |
|------------------------------|----------|--|---------------------------------|
| 8                            | 10686370 | <b>EJECUTORES:</b>   | Roland Lopez y personal de OyT. |
| <b>HALLAZGOS:</b>            |          | <b>CORRECCIÓN:</b>   |                                 |
| No se encontró desviaciones. |          | Se realizo la prueba de 21 relés de protección (diferencial y sobrecorriente) entre todos los molinos.       |                                 |

### 3. EVENTOS SUSCITADOS EN LA PARADA

Se tiene dos observaciones por parte de seguridad y uno en el arranque de planta:

- Correcto uso de escalera tijera. Se corrigió en el momento.
- Falta de línea de anclaje en la parte superior del transformador de potencia.
- En el arranque se tuvo alarma en el sensor de flujo de aire del segmento 3 del motor del molino de Bolas 1. Se dejó forzado para su revisión en la siguiente parada.

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La parada se desarrolló con la seguridad del caso, analizando los riesgos y controlándolos, sin reportar ningún incidente al personal o daño al equipo por parte de Antapaccay.

Por falta de personal, no se realizó dos actividades:

- Inspección y limpieza de cable de excitación del anillo rozante en el motor del molino Sag y bolas 1. (observación de Siemens). Se ejecutará en la parada siguiente parada.
- Revisión de cable de control/instrumentación interior Molino Bolas 1 (Observación de Siemens). Se ejecutará en la siguiente parada.

### 5. PLANES DE ACCIÓN

| ITEM | ¿QUÉ?  | ¿QUIÉN?     | ¿CUÁNDO? |
|------|--|-------------|----------|
| 1    | Implementación de líneas de anclaje para los transformadores de potencia de los molinos.     | Jaime Saico | 4 meses. |
| 2    | Compra de controladores configurados CAREL para HVACs de molinos.                            | Jaime Saico | 4 meses. |
| 3    | Cambio de ventiladores ubicados en la parte alta de los motores de los molinos con servicio. | Jaime Saico | 4 meses. |