

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE BAJA TENSIÓN Y MEDIA
TENSIÓN MEDIANTE VARIADORES DE VELOCIDAD
INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:
ELMER ENRIQUEZ ROMERO**

**PROMOCIÓN
2010-II
LIMA-PERÚ
2014**

**ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE BAJA TENSIÓN Y MEDIA
TENSIÓN MEDIANTE VARIADORES DE VELOCIDAD**

A mis padres y hermanos por el
apoyo brindado durante toda mi
vida

SUMARIO

El presente informe presenta el desarrollo del accionamiento de motores de baja y media tensión mediante variadores de velocidad, teniendo en cuenta las tecnologías más recientes en el campo de los variadores de velocidad. Se explican las consideraciones que se deben tener en cuenta para la correcta selección y buen funcionamiento.

Para lograr este objetivo en el capítulo II se desarrolla la base teórica sobre el funcionamiento de los variadores de velocidad para motores de baja y media tensión.

En el capítulo III se presenta las características principales y criterios para la selección de un variador de velocidad en media tensión.

En el capítulo IV se presenta las características principales y criterios para la selección de un variador de velocidad en baja tensión.

En el capítulo V se presenta un ejemplo práctico de empleo de variadores de velocidad en media y baja tensión en una planta minera de la sociedad minera El Brocal.

En el capítulo VI se presenta el análisis económico aplicativo para la planta minera de la sociedad minera El Brocal.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
GENERALIDADES	3
1.1 Necesidades para el accionamiento de variadores de velocidad	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Evaluación de la Problemática	3
1.4 Limitaciones.....	4
1.5 Síntesis.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	5
2.1 El motor asíncrono.....	5
2.2 Control de velocidad en máquinas asíncronas.....	6
2.3 Características típicas de las cargas.....	6
2.3.1 Par de carga constante ($T = \text{cte.}$).....	6
2.3.2 Par de carga cuadrático ($T \propto n^2$).....	7
2.3.3 Potencia constante ($P \propto M \cdot W = \text{Cte.}$).....	8
2.4 Tipos de arranque para motores de inducción	8
2.4.1 Arranque directo	8
2.4.2 Arranque estrella triángulo	10
2.4.3 Arranque suave.....	11
2.4.4 Arranque con variadores de velocidad	12
2.5 Porque un control de la velocidad variable.....	14
2.6 Variador de frecuencia.....	15
2.7 Formas de controlar un proceso con un variador de velocidad	15
2.8 Tipos de variadores de velocidad.....	16
2.8.1 Variadores eléctrico - electrónicos	16
2.9 Composición de los variadores de frecuencia.....	18
2.9.1 Etapa rectificadora	18
2.9.2 Etapa intermedia.....	18
2.9.3 Etapa inversor	18
2.9.4 Etapa de control.....	18

2.10 Rectificador de 6 pulsos	18
2.11 Técnicas de modulación en los variadores de frecuencia	20
CAPÍTULO III	21
ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE BAJA TENSIÓN	21
3.1 Variadores para motores de baja tensión (AFL)	21
3.1.1 Características	22
3.1.2 Puesta a tierra	26
3.1.2 Pintura y acabado	26
3.1.3 Pruebas	26
CAPÍTULO IV	31
ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE MEDIA TENSIÓN.....	31
4.1 Variadores para motores de media tensión (AFM)	31
4.1.1 Principales componentes	33
4.1.2 Características	33
CAPÍTULO V	42
ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN AMPLIACIÓN A 18000 TPD MINERA BROCAL	42
5.1 Antecedentes	42
5.2 Sistema eléctrico.....	42
5.2.1 Parámetros principales de los motores eléctricos	43
5.2.2 Área de análisis con variadores en media tensión	43
5.2.3 Análisis del flujo de carga	44
5.2.4 Área de análisis con variadores en baja tensión	51
5.2.5 Análisis del flujo de carga	52
CAPÍTULO VI	57
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	57
6.1 Como rebajar el consumo	57
6.2 Leyes de afinidad.....	58
6.2 Análisis económico de empleo de variadores de velocidad en minera el brocal.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
ANEXOS	62
ANEXO A	63
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE CARGAS DE LOS MOTORES.....	63
Fig. A.1: Curva característica de carga – Molino de Bolas	64
Fig. A.2: Curva característica de carga – Molino SAG.....	64
Fig. A.3: Curva característica de carga – Bomba Centrífuga	65

Fig. A.4: Curva característica de carga – Chancadora primaria	65
Fig. A.5: Curva característica de carga – Remolienda.....	66
ANEXO B	67
DIAGRAMA UNIFILAR DEL ÁREA DE MOLIENDA, CHANCADO Y FLOTACIÓN	67
Fig. B.2: Diagrama unifilar arrancadores área molienda y flotación	70
Fig. B.3: Diagrama unifilar general área chancado.....	72
Fig. B.4: Diagrama unifilar bombas de pulpa área chancado.....	74
BIBLIOGRAFÍA	76

INTRODUCCIÓN

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo las bombas, molinos, fajas transportadores, etc. En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.

El estudio de este fenómeno para cada caso particular tiene una gran importancia práctica, ya que la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar para un servicio determinado, requieren el conocimiento de las particularidades de éste producto.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos y electrónicos.

La máquina de inducción alimentada con corriente C.A., especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico más común en todo tipo de aplicaciones industriales y el que abarca un margen de potencias mayor. Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro.

La fase de arranque merece una especial atención. El par debe ser el necesario para mover la carga con una aceleración adecuada hasta que se alcanza la velocidad de funcionamiento en régimen permanente, procurando que no aparezcan problemas eléctricos o mecánicos capaces de perjudicar al motor, a la instalación eléctrica o a los elementos que hay que mover.

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia.

El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

En este informe se explicara el empleo de variadores de velocidad en baja y media tensión para el área de molienda y chancado de la sociedad minera El Brocal.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

En este capítulo se describe la problemática que motiva la realización del informe, la cual consiste principalmente en conocer y emplear variadores de velocidad para el accionamiento de motores de baja y media tensión, así como también los objetivos y el alcance del presente informe.

1.1 Necesidades para el accionamiento de variadores de velocidad

Actualmente la industria moderna emplea motores eléctricos en los diferentes procesos productivos, estos motores tienen una alta corriente de arranque y consumos de energía considerable. Frente a esta necesidad se requiere el empleo de variadores de velocidad para el accionamiento de los motores eléctricos con el fin de:

- Limitar la corriente de arranque.
- Control la velocidad variable.

La alta corriente de arranque de los motores eléctricos genera problemas como:

- Interrupción en el proceso productivo.
- Sobrecalentamiento en los motores, transformadores, conductores y reducción de la vida útil de los equipos.

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal:

- Limitar la corriente de arranque del motor asíncrono a valores aceptables mediante el empleo de variadores de velocidad.
- Evaluar el ahorro de energía empleando variadores de velocidad.

Los objetivos específicos son:

Describir al variador de velocidad empleado en el accionamiento de motores de baja y media tensión.

Brindar los criterios básicos para la selección de variadores de velocidad.

1.3 Evaluación de la Problemática

La corriente de arranque de los motores eléctricos presenta problemas en:

- Pérdidas en el proceso: Ocasionado por las diversas paradas intempestivas de los equipos dentro de la planta industrial, pérdidas por tiempo de reparación o sustitución de los equipos eléctricos o componentes electrónicos.

–Sobrecalentamiento en los motores y transformadores: Estos eventos de sobrecalentamiento generan pérdidas de aislamiento en las bobinas, la pérdida de aislamiento originan cortocircuito entre espiras y falla a tierra, por consecuencia la vida útil del equipo resulta menor.

–Sobrecalentamiento de los conductores y fusibles: Ocasionado por el efecto piel ocasionado por el nivel de armónicos.

–Multas pagadas a OSINERGMIN por sobrepasar la potencia instalada.

1.4 Limitaciones

El trabajo considera el accionamiento de motores eléctricos empleando variadores de velocidad de las siguientes características:

–Variadores de media tensión con un nivel máximo de tensión de 7000 V.

–Variadores cuya configuración de la rectificación sea de 6 pulsos, 12 pulsos, 18 pulsos.

El trabajo no incluye:

–El proceso de diseño de los variadores de velocidad.

–El diseño de filtro de armónicos.

–El diseño de componentes electrónicos para las etapas de rectificación e inversión.

1.5 Síntesis

El siguiente trabajo explicará el accionamiento de motores de baja y media tensión empleando variadores de velocidad, para motores del área de molienda, área de chancado y el análisis económico aplicativo.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 El motor asíncrono

Los motores asíncronos, alimentados en corriente alterna trifásica, mueven la gran mayoría de las máquinas: bombas, espesadores, ventiladores, etc.; en aparatos de elevación y transporte: grúas, montacargas, etc. y en cualquier otra aplicación donde se requiera un motor económico, robusto, con facilidad de instalación y mantenimiento, pero sin regulación de velocidad. Actualmente, la electrónica de potencia y de control han resuelto este problema y han hecho aún más universal el uso de este tipo de motor.

El motor trifásico asíncrono también se conoce como un motor de jaula de ardilla o rotor de jaula de ardilla. Comparable con un transformador de rotación y de acuerdo con su modo de acción, también se usa generalmente el término motor de inducción.

El funcionamiento de una máquina asíncrona se basa en el principio de la interacción electromagnética entre el campo magnético giratorio, creado por un sistema de corrientes trifásicas suministrada desde la red al devanado del estator y las corrientes que se inducen en el devanado del rotor cuando el campo giratorio cruza sus hilos conductores. Así pues el trabajo de la máquina asíncrona por su esencia física es semejante al funcionamiento de un transformador considerando el estator como devanado primario y el rotor como devanado secundario que en el caso general puede girar a una velocidad " ω_m ". La Figura 2.1 muestra el motor de inducción [1].

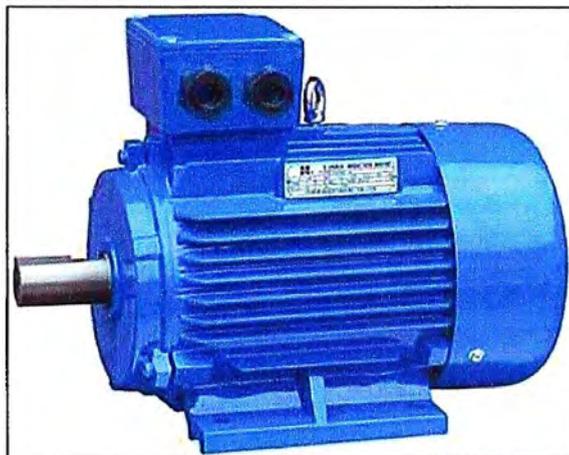


Fig. 2.1: Motor asíncrono

2.2 Control de velocidad en máquinas asíncronas

Un motor de inducción es esencialmente un motor de velocidad constante cuando está conectado a una fuente de potencia de voltaje y frecuencia constante. La velocidad de operación es muy cercana a la velocidad síncrona. Si el torque de carga se incrementa la velocidad cae en pequeña cantidad. Esta es la razón por la cual se le usa frecuentemente en sistemas de trabajo de velocidad constante.

Muchas aplicaciones industriales, sin embargo requieren diversas velocidades o un rango continuo ajustable de velocidades.

Tradicionalmente, los motores DC han sido usados en sistemas de operación de velocidad ajustable. Sin embargo, los motores DC son caros, requieren frecuente mantenimiento de conmutadores y escobillas, y están prohibidos de usarlos en ambientes explosivos.

Las máquinas asíncronas de otro lado, son de bajo precio, robustas, no tienen conmutadores, y son usados para aplicaciones con altas velocidades. El uso de los controladores de estado sólido, ha hecho más complejo su uso que el de los motores DC; ha hecho posible que el motor de inducción se use en sistemas de operación de velocidad variable.

2.3 Características típicas de las cargas

2.3.1 Par de carga constante ($T=cte.$)

Se da en sistemas que tienen siempre (o aproximadamente) el mismo par resistente, como molinos, bombas de pistón, transportadoras en carga (cintas, elevadores, sinfines, etc.). Las curvas de par velocidad (teórica y real) pueden ser las siguientes:

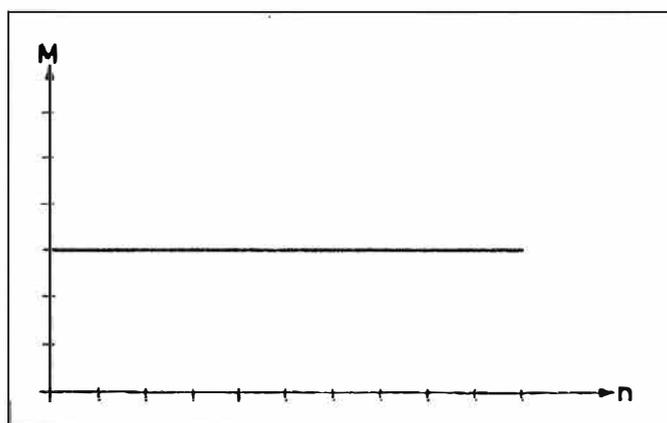


Fig. 2.2: Esquema de motor con carga a par constante

En el arranque (real) puede ser necesario un sobre par para vencer la fuerza de rozamiento del sistema, parado con carga. (El sobre par debe programarse de acuerdo a las necesidades y posibilidades del variador, ya que puede incrementar excesivamente el valor de I_n).

La potencia necesaria aumenta proporcionalmente a la velocidad, por lo que se produce una aceleración lineal hasta lograr la velocidad nominal o de trabajo [13].

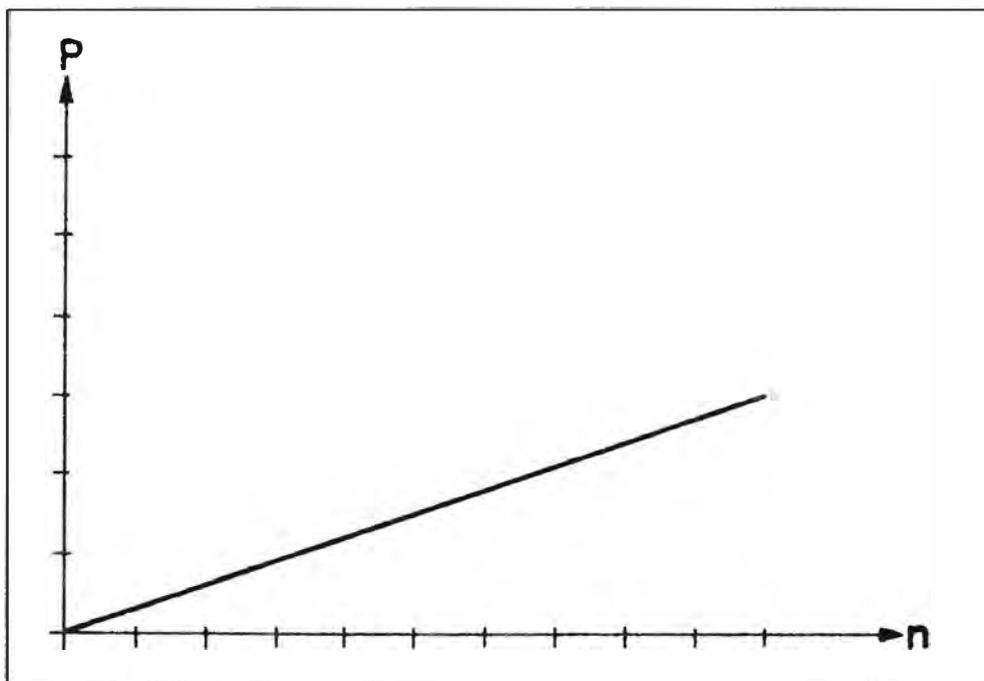


Fig. 2.3: Curva características potencia vs eficiencia para el motor con par constante

2.3.2 Par de carga cuadrático ($T \propto n^2$)

El par es proporcional al cuadrado de la velocidad. Es decir, inicialmente muy bajo, va creciendo de forma cuadrática al aumentar la velocidad [13].

Esta característica se da en ventiladores, motores de bombas centrífugas, etc.

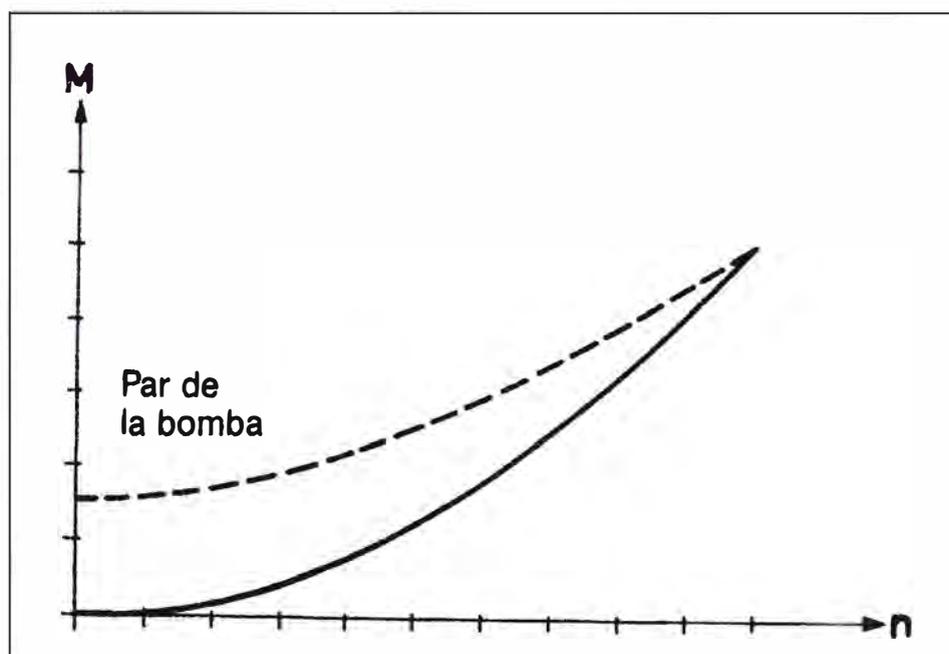


Fig. 2.4: Esquema de motor con carga a par cuadrático

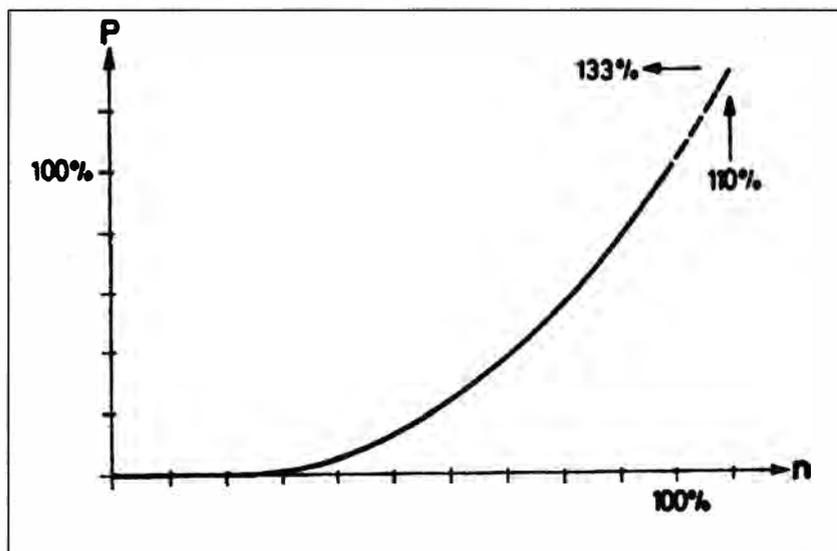


Fig. 2.5: Curva características potencia vs eficiencia para el motor con par cuadrático

2.3.3 Potencia constante ($P \propto M \cdot \omega = \text{Cte.}$)

Contrario que antes, el par disminuye al aumentar la velocidad, para mantener la potencia constante.

Este tipo de demanda, se da en máquinas herramienta (corte), bobinadoras, laminación, etc. A veces se aprovechan las características de sobre-velocidad para mejorar las posibilidades del proceso, si el par necesario no es alto [13].

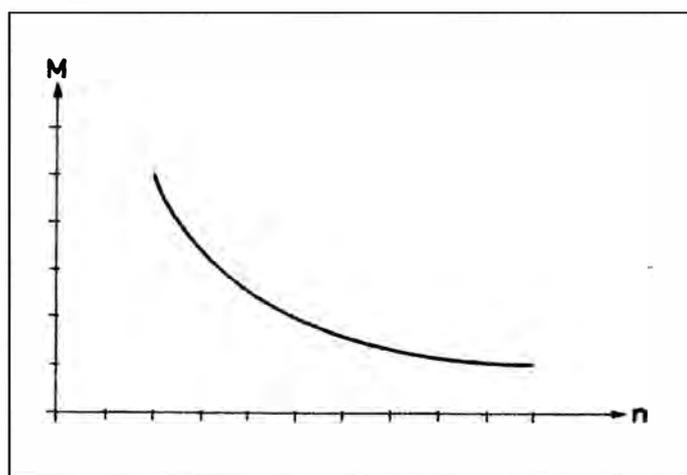


Fig. 2.6: Esquema de motor con potencia constante

2.4 Tipos de arranque para motores de inducción

2.4.1 Arranque directo

El arranque de motor directo es el método más sencillo para arrancar un motor trifásico asíncrono. Los devanados del estator están conectados directamente a la red eléctrica por un proceso de conmutación simple.

Como resultado de esta aplicación obtendremos altas corrientes de arranque (corriente

de sobrecarga) que a su vez causan molestas caídas en la tensión de red. Por este motivo, las compañías eléctricas suelen limitar la potencia nominal de los motores conectados a la red.

El arranque directo crea un estrés térmico en los devanados del motor y fuerzas electrodinámicas momentáneas. Con frecuencia, el arranque directo reduce la vida de los devanados de un motor estándar.

El bloqueo del rotor (rotor bloqueado) es un fallo grave que puede llevar a la destrucción térmica del motor trifásico asíncrono. Cada devanado del motor debe estar protegido por un dispositivo de protección para evitar que ocurran este tipo de sobrecargas térmicas. Una solución económica es el uso de relés de sobrecarga, más conocidos como relés térmicos o relés bimetálicos.

Estos relés de sobrecarga se conocen como interruptores protectores de motor en combinación con un módulo de conexión.

Figura 2.7, muestra el esquema de conexión del arranque directo para el motor de inducción [3].

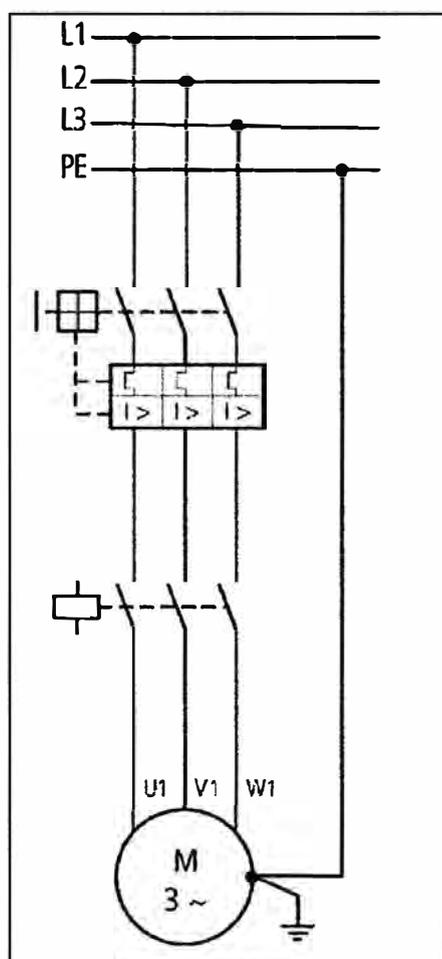


Fig. 2.7: Esquema de arranque directo para el motor de inducción

2.4.2 Arranque estrella triángulo

Con un arranque de motor estrella-triángulo, la puesta en marcha del motor trifásico asíncrono se realiza mediante una transición entre los devanados. Los puentes en el cajetín de bornes del motor se omiten, y las 6 conexiones de los devanados se conectarán a la red eléctrica mediante una conmutación llamada estrella-triángulo (conmutación manual o automática de los contactores).

Durante el funcionamiento, los devanados del motor están conectados en triángulo. El voltaje del devanado (UW), por lo tanto debe ser igual a la tensión de fase (LSN) del sistema trifásico. Por ejemplo, en una tensión de red de 3 ϕ , 400 V, el voltaje en la placa de características del motor debe estar especificado como 400/690 V.

En una conexión en estrella, la tensión de red (LSN) de los devanados individuales del motor se reduce por un factor de $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58$). Por ejemplo: $400 \text{ V} * 1/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$. El par de arranque y la corriente de entrada (en la conexión en estrella) se reducen a un tercio de los valores de la conexión en triángulo. Corriente de arranque típica: 2 a 2,5 I_n

Figura 2.8 muestra el esquema de conexión del arranque estrella triángulo para el motor de inducción [3].

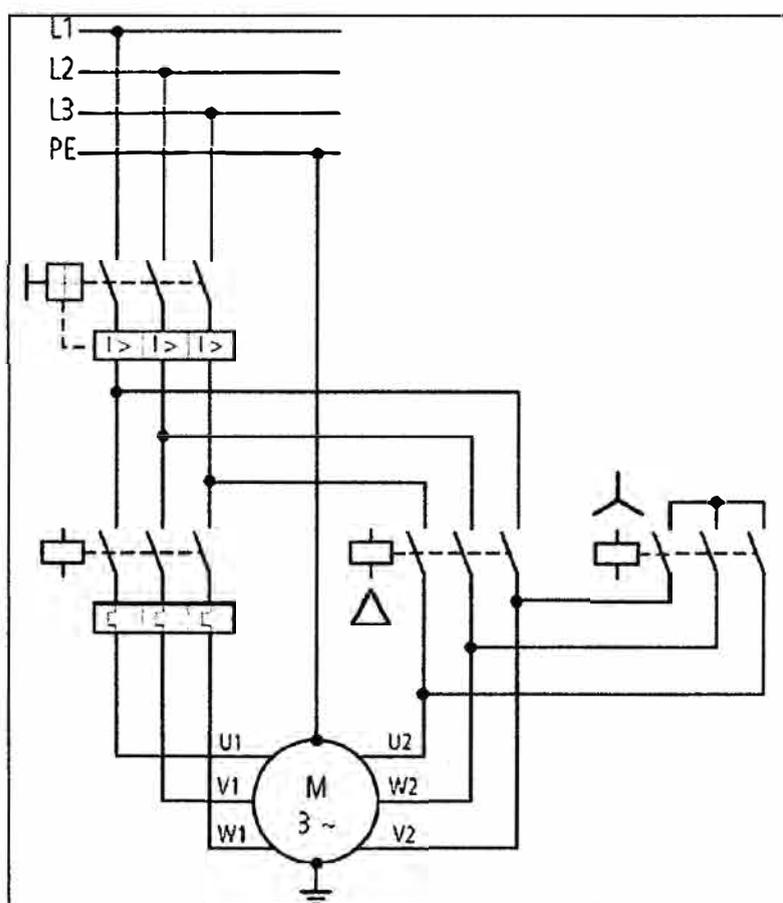


Fig. 2.8: Esquema de arranque estrella triángulo para el motor de inducción

2.4.3 Arranque suave

En muchos casos, el arranque directo o el arranque estrella-triángulo del motor trifásico asíncrono no es la mejor solución ya que altas corrientes de pico pueden influir en el suministro eléctrico y un aumento repentino del par puede inducir a los componentes mecánicos de la maquina o al sistema a altos niveles de estrés.

El arrancador suave proporciona un remedio. Permite un aumento continuo y lineal del par y ofrece la posibilidad de una reducción selectiva de la corriente de arranque. La tensión del motor se incrementa a partir de una tensión inicial y un tiempo de rampa de aceleración, seleccionados mediante selectores hasta llegar a la tensión nominal del motor. El arrancador también puede controlar la rampa de parada mediante la reducción de la tensión.

La curva característica del motor asíncrono trifásico sólo se aplica cuando la tensión del motor es igual a la tensión de red (ULN). Si aplicamos una tensión inferior, obtendremos una reducción cuadrática en el par ($M \sim U^2$). Cuando lo comparamos, por ejemplo, con un arranque estrella triángulo, la tensión del motor se reduce hasta el 58% ($\sim 1/\sqrt{3}$), y el par se reduce a alrededor del 33% (un tercio).

La tensión del motor en un arrancador se modifica por el control del ángulo de cada fase en media onda sinusoidal. Con este fin, dos tiristores en cada una de las fases están conectados en anti paralelo, uno de ellos para la media onda positiva y el otro para la media onda negativa [3].

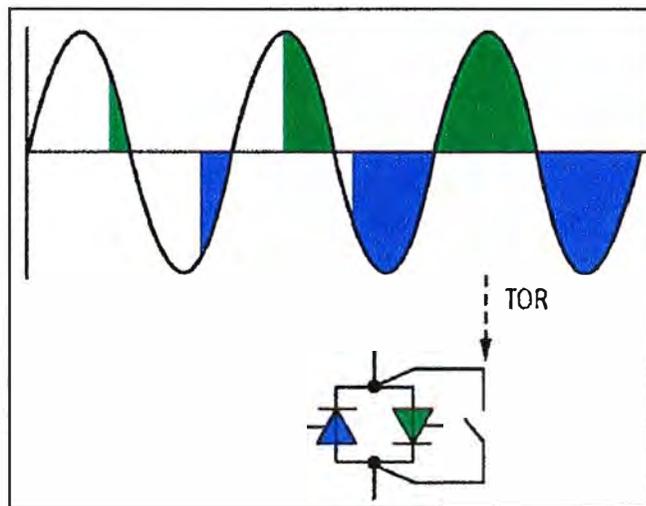


Fig. 2.9: Esquema de rectificación para la onda sinusoidal

Cuando la rampa de aceleración (t_{Start}) ha finalizado, los tiristores están completamente controlados (media onda sinusoidal completa \Rightarrow fin de rampa: TOR).

Como los tiristores sólo están activos durante la fase de aceleración o durante la fase de desaceleración, pueden ser By pasados a través de los contactos de Bypass durante la

operación continua. Las pérdidas en el arrancador suave se pueden reducir gracias a la inferior resistencia que ofrecen los contactos mecánicos de la conmutación.

La Figura 2.10 muestra el esquema de conexión del arranque suave para el motor de inducción.

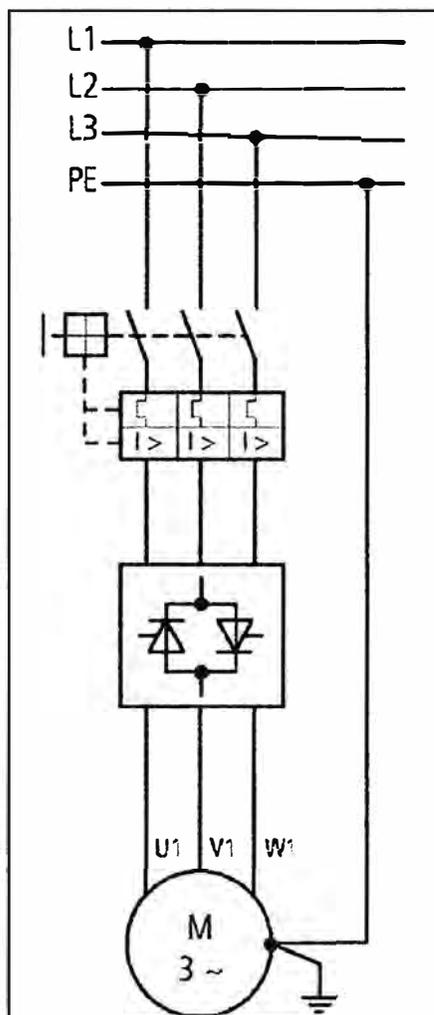


Fig. 2.10: Esquema de arranque suave para el motor de inducción

2.4.4 Arranque con variadores de velocidad

El convertidor de frecuencia es en última instancia, la mejor solución para un arranque continuo y sin escalones de motor asíncrono trifásico. La limitación de corriente ajustable evita los picos de corriente en el suministro de red eléctrica y repentinas cargas en las partes mecánicas de la máquina y en los sistemas.

Además del arranque suave, el convertidor de frecuencia también permite el control de la velocidad (frecuencia) del motor. Considerando que los motores estando conectados directamente a la red eléctrica sólo pueden lograr las condiciones ideales de funcionamiento en el punto de estado de funcionamiento constante (= indicación de la

placa de características), pueden ser utilizados en todo el rango de velocidades con el control de frecuencia, por ejemplo, desde 4 V a 0,5 Hz a 400 V 50 Hz. La relación constante de voltaje / frecuencia (V/f) garantiza puntos independientes que operan con el par nominal de la carga (MM).

En comparación con las soluciones anteriormente descritas, los convertidores de frecuencia parecen ser la solución más costosa a primera vista.

El mayor coste de adquisición y las medidas adicionales sobre la instalación (cables blindados y filtro RFI para la compatibilidad electromagnética, EMC) son las principales razones. Pero durante una operación a largo plazo, el arranque suave del motor, además de la eficiencia energética y la optimización de procesos, muestra beneficios económicos. Esto es especialmente cierto para bombas y ventiladores. Por la adecuación de la velocidad de rotación del proceso de producción y la compensación de interferencias externas, el convertidor de frecuencia garantiza una vida útil más larga y una mejor seguridad funcional

Otras ventajas de los convertidores de frecuencia incluyen la estabilidad a altas velocidades con fluctuaciones en la carga (fluctuaciones por debajo de un 1%) y la opción de cambio en el sentido de giro.

La Figura 2.11 muestra el esquema de conexión del arranque con variador de velocidad para el motor de inducción [3].

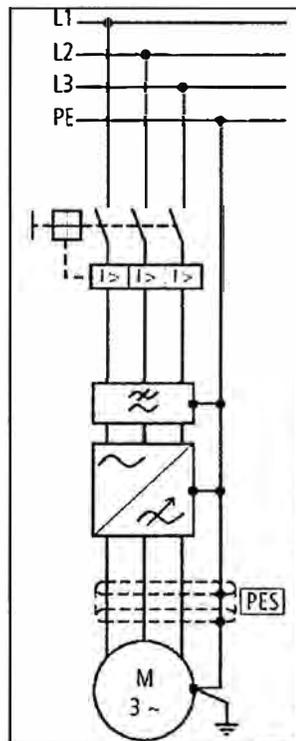


Fig. 2.11: Esquema de arranque con variador para el motor de inducción

2.5 Porque un control de la velocidad variable

Para entender por qué es necesario controlar la velocidad variable, primero es preciso comprender los requisitos de los diferentes procesos. Dichos procesos se pueden dividir en dos grandes categorías: el tratamiento de material y el transporte de material. No obstante, estos dos títulos básicos engloban numerosas subcategorías.

Ambas categorías comparten una característica común: su capacidad de ajustar procesos. El ajuste se consigue gracias a los accionamientos de velocidad variable. En este capítulo se describen los principales procesos industriales y no industriales que utilizan accionamientos de velocidad variable.

La Figura 2.12 y Figura 2.13 muestra el diagrama de proceso para el sistema de molienda de una planta de minera.

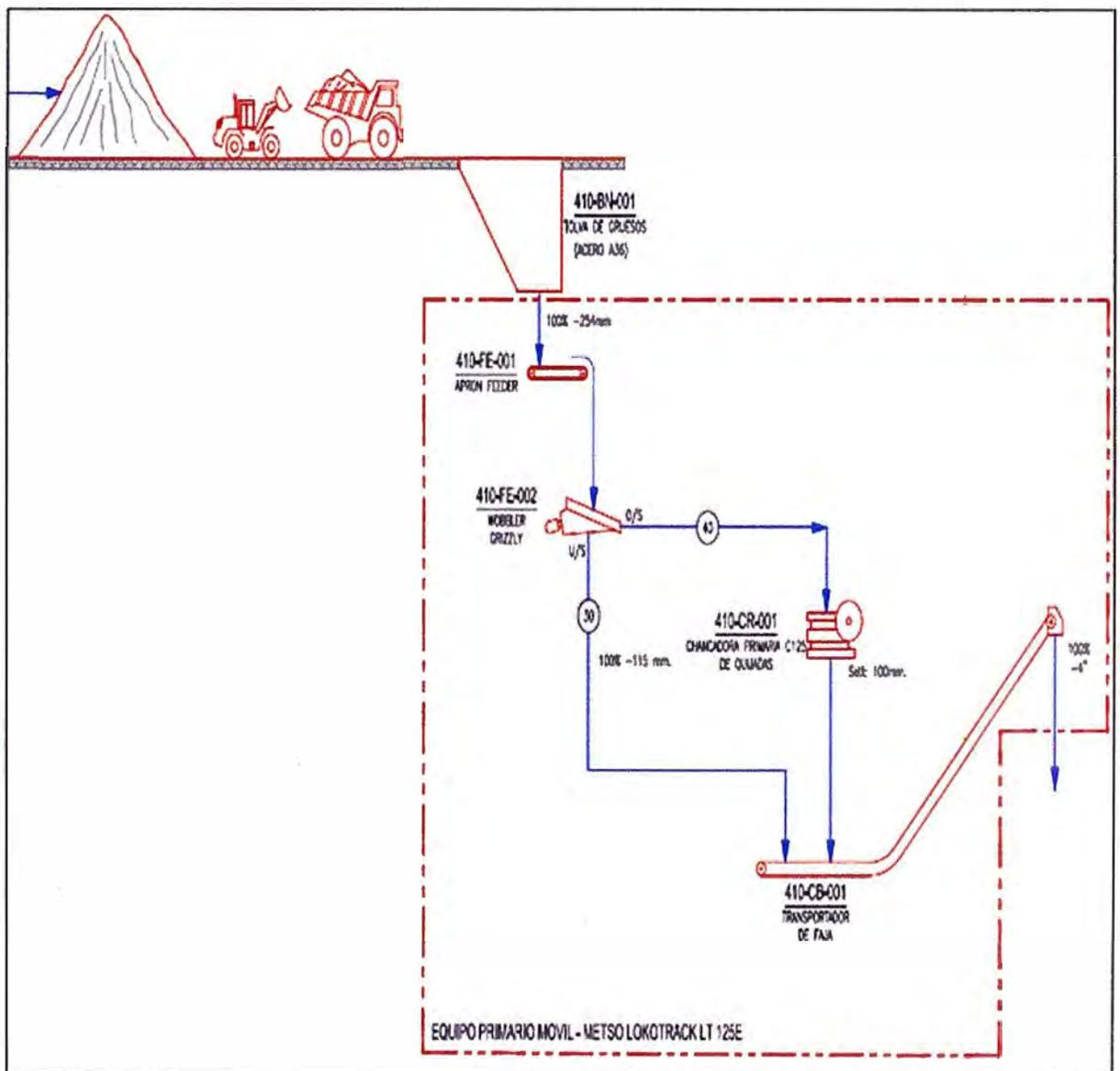


Fig. 2.12: Diagrama de proceso para el sistema de chancado

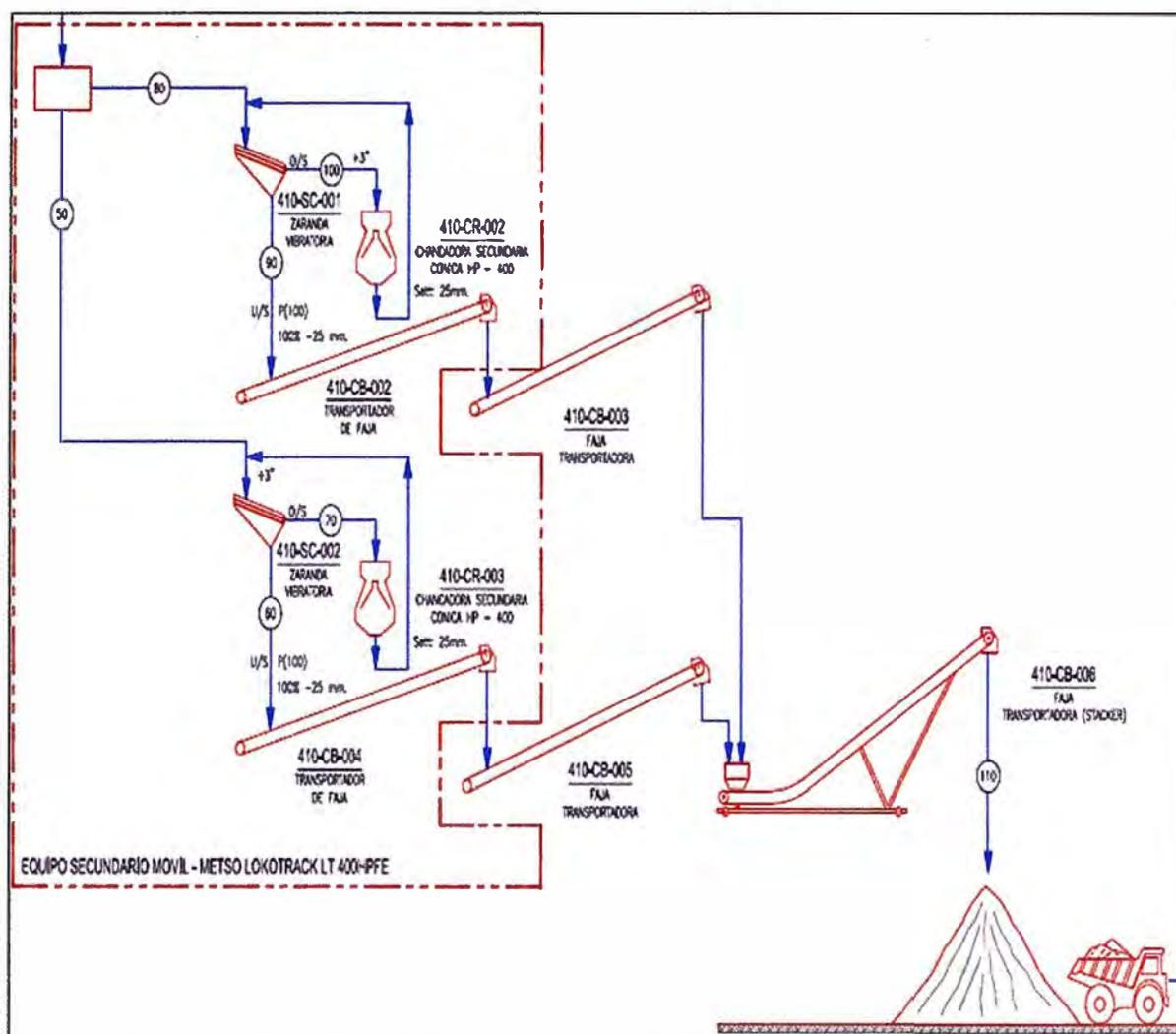


Fig. 2.13: Diagrama de proceso para el sistema de chancado

2.6 Variador de frecuencia

El Variador de Velocidad en un sentido amplio, es un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores eléctricos.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua también puede ser designada como variador de velocidad.

2.7 Formas de controlar un proceso con un variador de velocidad

Entre las diversas ventajas en el control del proceso proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

- Operaciones más suaves.

- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en diversos procesos.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Control del par motor (torque).

2.8 Tipos de variadores de velocidad

En términos generales, puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad: mecánicos, hidráulicos y eléctrico-electrónicos, siendo este último de interés para el tema propuesto.

2.8.1 Variadores eléctrico - electrónicos

Los variadores eléctrico-electrónicos incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo es práctica común emplear el término variador únicamente al controlador eléctrico.

Los primeros variadores de esta categoría emplearon la tecnología de los tubos de vacío. Con los años después se han ido incorporando dispositivos de estado sólido, lo cual ha reducido significativamente el volumen y costo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los dispositivos.

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

- Variadores para motores de DC.
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy.
- Variadores de deslizamiento.
- Variadores para motores de CA (también conocidos como variadores de frecuencia).

a. Variadores para motores de DC

Estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de corriente directa serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes.

Este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de DC: controlando su voltaje terminal, o bien, manipulando el valor de la corriente de campo.

b. Variadores de deslizamiento

Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier motor de inducción, la velocidad mecánica (N_m) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$N_m = \frac{120 \cdot f \cdot (1-s)}{P} \quad (2.1)$$

Dónde:

“s” es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1

De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, razón por la cual en la actualidad tiene muy poca aplicación.

c. Variadores para motores de AC

Los variadores de frecuencia permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión [7]:

$$N_m = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.2)$$

Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_m = \frac{120 \cdot f \cdot (1-s)}{P} \quad (2.3)$$

Dónde:

N_s = velocidad síncrona (rpm)

N_m = velocidad mecánica (rpm)

f = frecuencia de alimentación (Hz)

s = deslizamiento (adimensional)

P = número de polos (adimensional)

Como puede verse en las expresiones (2.2) y (2.3), la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina

Estos variadores mantienen la razón Voltaje/ Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida en el motor.

2.9 Composición de los variadores de frecuencia

El variador regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

2.9.1 Etapa rectificadora

En esta etapa la tensión alterna se convierte tensión continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

2.9.2 Etapa intermedia

En esta etapa existe un filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

2.9.3 Etapa inversor

En esta etapa se convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc.

2.9.4 Etapa de control

Esta etapa controla los IGBT's para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia a través de cálculos matemáticos.

2.10 Rectificador de 6 pulsos

En la Figura 2.14, se presenta el circuito típico de entrada típica en CA de un rectificador de 6 pulsos alimentado por un transformador Y-Y de un rectificador trifásico de 6 pulsos, así como la forma de onda resultante Figura 2.15 y la magnitud de inyección de sus corrientes armónicas en la Figura 2.16.

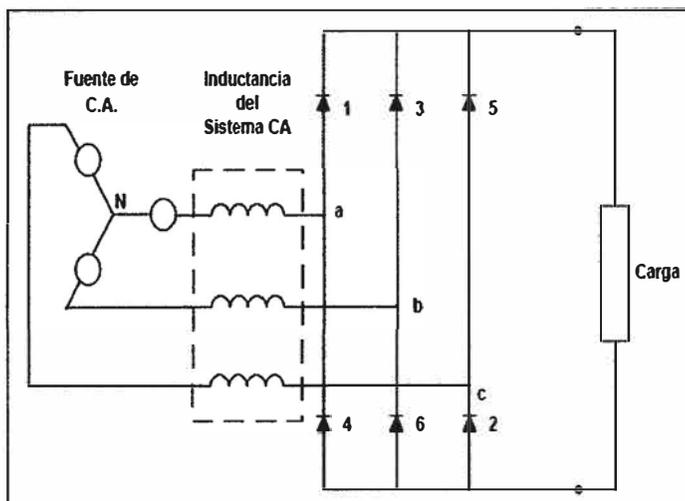


Fig. 2.14 Rectificador trifásico de seis pulsos con la inductancia del sistema de CA.

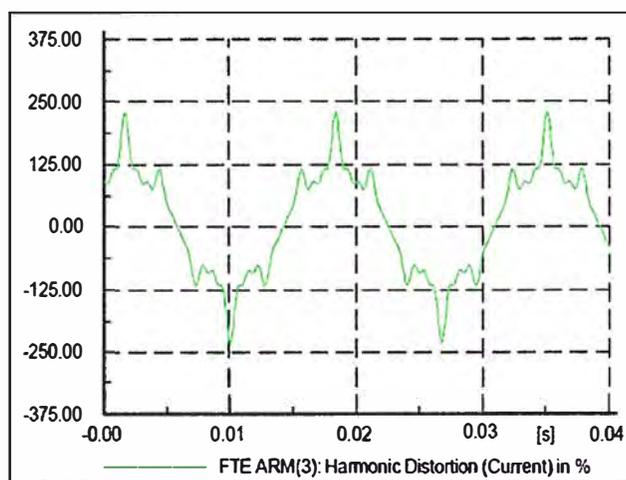


Fig. 2.15 Forma de onda de rectificador trifásico de seis pulsos

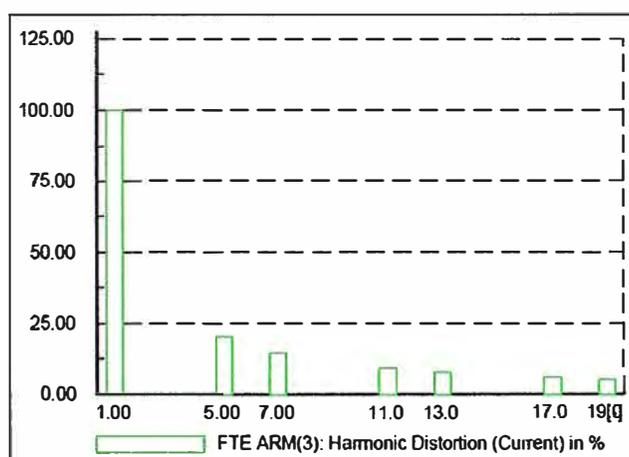


Fig. 2.16 Porcentaje distorsión de armónicos rectificador trifásico de seis pulsos

2.11 Técnicas de modulación en los variadores de frecuencia

La función de un convertidor de frecuencia es cambiar una tensión de entrada de corriente alterna con una magnitud y frecuencia fija, en una tensión simétrica de salida en corriente alterna, con amplitud y frecuencia deseadas. Entre estas dos etapas hay una etapa intermedia de rectificación a corriente continua de la entrada, para después ondular a las magnitudes deseadas

Al variar la frecuencia eléctrica aplicada al estator la velocidad de rotación del campo magnético cambia en proporción directa al cambio de la frecuencia eléctrica.

El control de la velocidad se realiza mediante la frecuencia de conmutación de los componentes electrónicos (IGBT, transistor, MOSFET o GTO) que forman el ondulator.

La regulación de la tensión de salida se puede realizar de tres formas diferentes:

- Modificando el valor de la tensión de salida del rectificador, mediante un rectificador controlado.
- Variando el ancho de conducción de la tensión de salida, retrasando y adelantando la conducción y bloqueo de los semiconductores respecto de sus pasos por 0° y 180° .
- Conmutar los semiconductores del ondulator varias veces por cada ciclo de la frecuencia fundamental, de modo que la proporción entre los tiempos de encendido t_{on} y de apagado t_{off} , dé el valor medio de la tensión de salida mediante la relación $t_{on}/(t_{on}+t_{off})$.

Las dos primeras posibilidades se dan en los convertidores de frecuencia con salida por bloques, y la última en los de salidas por pulsos, que es la más conocida.

CAPÍTULO III ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE BAJA TENSIÓN

3.1 Variadores para motores de baja tensión (AFL)

Los Variadores de Frecuencia de Baja Tensión se utilizan para el control de velocidad y par en motores de inducción estándar, y representan el caballo de batalla en las aplicaciones industriales. ABB es líder mundial tanto en variadores de frecuencia como en motores.

La tecnología de los Variadores de Frecuencia extiende el rango de velocidad de trabajo de los motores desde cero hasta valores por encima de la velocidad nominal, incrementando la productividad del proceso. Cuando la capacidad es lo suficientemente baja, el Variador de Frecuencia reduce la velocidad de la máquina y ahorra energía [12].

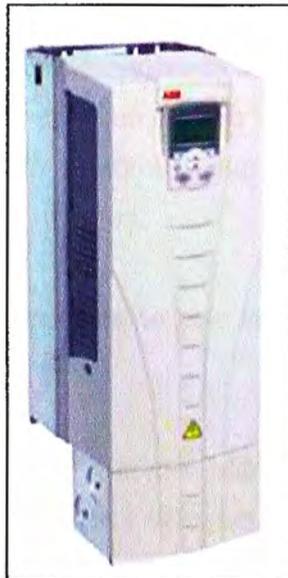


Fig. 3.1 Variador de baja tensión

La tecnología de los Variadores de Frecuencia extiende el rango de velocidad de trabajo de los motores desde cero hasta valores por encima de la velocidad nominal, incrementando la productividad del proceso. Cuando la capacidad es lo suficientemente baja, el Variador de Frecuencia reduce la velocidad de la máquina y ahorra energía.

Para motores menores a 250 kW la tensión de salida será de 460 V.

Los variadores de frecuencia para motores hasta 40 Hp pueden ser instalados dentro de los centros de control de motores y pueden ser tipo fijo o extraíble [12].



Fig. 3.2 Centro control de motores de baja tensión

Los variadores de frecuencia para motores hasta 75 Hp pueden ser instalados en una columna entera en el centro control de y son del tipo fijo.

Los variadores de frecuencia para motores hasta 100 Hp son instalados en forma independiente del centro control de motores.

3.1.1 Características

Los variadores de velocidad para motores de baja tensión deberán contar como mínimo de las siguientes características

a. General

–El equipo estará constituido por un sistema completo, compuesto por: convertidor, equipos de filtrado de armónicos y el motor eléctrico (el motor solamente si es requerido en las hojas de datos).

–El motor puede ser instalado en un ambiente corrosivo, pero el AFL y su equipo asociado se instalará en una sala eléctrica, como la parte de un centro de control de motores o en un panel individual.

–El sistema deberá ser dimensionado para las características del equipo accionado en el rango de operación especificada, con una variación de voltaje del sistema de $\pm 10\%$ y con las siguientes consideraciones de diseño:

–Torque máximo de arranque de 150% durante 10 segundos de arranque.

–Torque máximo de 120% durante 60 segundos de aceleración.

- Torque máximo de 100% de la curva en forma continúa.
- Torque nominal de 115% de la curva nominal según requerimientos del equipo accionado basados en el rango de velocidad de operación.
- El equipo suministrado será diseñado para las condiciones sísmicas.
- El sistema debe ser capaz de responder a una alteración del 20% del punto de referencia dentro los 120 segundos continuos y reajustes al punto de ajuste.
- El sistema deberá ser capaz de resistir los esfuerzos térmicos y dinámicos y los esfuerzos de torsión mecánicos transitorios como resultado de un cortocircuito, el nivel de falla se indica en las hojas de datos.
- El equipo debe ser diseñado y fabricado para facilitar la inspección, limpieza, reparación y el mantenimiento y para garantizar seguridad absoluta durante la operación, inspección y el mantenimiento.
- Todo el equipo deberá funcionar sin vibración excesiva y con el menor ruido posible.

b. Convertidor

–El convertidor es requerido para proporcionar la rectificación controlada del suministro de energía hasta el circuito intermedio y de inversión controlada a un suministro de alimentación variable y frecuencia variable para un motor de corriente alterna.

–El convertidor estará compuesta por:

Rectificador

Acoplamiento de C.C.

Suavizador del reactor

Inversor

Control asociado, indicación, la protección y las instalaciones de alarma.

–Cuando se especifica, el convertidor tendrá cada tramo de puente dimensionado para proporcionar la capacidad nominal completa con un elemento tiristor fuera de servicio.

–El disparo de los generadores de impulso, amplificadores de impulso y distribuidores, los circuitos de supervisión de compuerta y los dispositivos asociados podrán ser montados a partir de módulos estandarizados, industriales, utilizando componentes de estado sólido. La transmisión de impulsos de disparo del generador de impulsos a la puerta de tiristores será a través de transformadores o cables enchufables de fibra óptica para el aislamiento galvánico. Todas las superficies de contacto expuestas será de oro o plata.

–Deberán contar siempre a la entrada de la fuente con circuitos limitadores y de sobretensiones para proteger los tiristores.

–El suavizador de reactor deberán calibrarse para desacoplar la falla del rectificador y el

inversor y limitar la corriente de falla. Será del tipo de núcleo en aire seco para instalación en interiores.

–Los AFL se diseñan para el control local y remoto de la velocidad y potencia, incluyendo todas las señales de entrada y de salida.

c. Registro y protección

–Registro histórico de la naturaleza de las fallas pasadas.

–Proporcionar las facilidades para permitir la configuración / lectura en forma remota de todos los parámetros prefijados anteriormente.

–Se facilitará la contraseña de seguridad para prevenir cambios no autorizados en el panel de control local.

–El sistema de control del AFL deberá responder a la operación del pulsador de parada de emergencia remoto para desacelerar y parar el motor lo más pronto posible.

–Los AFL deberán incorporar las siguientes facilidades de protección:

Protección contra sobrecarga.

Sobretensión con reseteo automático (auto-reset).

Sub tensión con reseteo automático (auto-reset).

Protección de parada del motor.

Cortocircuito en la salida.

Supervisión de la frecuencia de salida.

–Los AFL se suministran completos con:

Aislador de puerta enclavamiento

Fusible del contactor

Selector local/remoto

Botoneras de arranque y parada

Luces de indicadores de funcionando, parada, falla del inversor y disparo del termistor.

Relé del termistor.

Control manual de velocidad.

Facilidades para aceptar señales digitales remotas de arranque y parada.

Contactos secos de funcionando y falla para indicación remota.

Interface para comunicación serial.

Diagnóstico de fallas del sistema del inversor.

Filtro de entrada (RFI).

Reactancia de salida debe ser dimensionada para la longitud del cable de alimentación del motor.

d. Interface de Control del Sistema

–La selección del punto de ajuste será realizada desde el DCS/PLC en modo REMOTO y desde el teclado en modo LOCAL.

–El AFL dispondrá de una entrada digital para el control remoto:

Arranque / parada.

Parada de emergencia.

Jog.

–Esta entrada digital será de 120 V, 60 Hz.

–El AFL deberá proporcionar salidas digitales para la indicación de los siguientes estados:

AFL listo

AFL Funcionando

Falla del AFL

–Esta señal deberá ser del tipo de contactos secos, 3 A nominal, 120 V, 60 Hz.

–El AFL debe ser capaz de tener una comunicación directa con el DCS/PLC bajo el protocolo de comunicación estándar (Ethernet, Profibus DP, Modbus TCP/IP, Modbus RTU). El AFL debe ser completamente accesible de manera que se pueda realizar las siguientes funciones remotas centralizadas:

Monitoreo remoto.

Control remoto.

Ajuste remoto de parámetros del AFL

Mediciones remotas

Registro de eventos

Configuración remota.

–Los tableros serán fabricados de planchas de acero y tendrán protección NEMA 12 con todas las puertas / paneles de acceso cerrado. NEMA 1 es la grado protección mínima que deberá mantener los componentes y las partes vivas cuando las puertas de acceso del panel frontal del tablero son abiertas para la inspección del equipo.

–El cableado interno debe ser de cobre trenzado con aislamiento de PVC, de sección mínima de 2.5 mm² (14 AWG), excepto cuando este expuesto a algún movimiento, se utilizará cable flexible en tubería flexible. Los cables se numeraran con férulas para que coincida con los terminales asociados o con los terminales tipo lengüetas de conexión a presión tipo pinza.

–Terminales para diferentes voltajes deben estar separados.

–Terminales para cables de entrada y salida deberán ser proporcionados completos, los

cables deben estar provisto de terminales.

e. Equipo de Filtrado de Armónicos

Las bobinas de filtrado del circuito deberán limitar el contenido de armónicos en el lado del suministro, dentro de los límites especificados en la norma IEEE 519 última edición.

f. Motor Principal

–El motor debe estar diseñado para funcionar en conjunto con el AFL en el rango de velocidad con especial énfasis en las vibraciones, ruido, distorsión armónica y con la certificación de ambientes peligrosos.

–El motor deberá ser del tipo inducción.

–Un termistor se proporcionará en cada bobinado del motor conectándolo a los terminales de la caja bornera principal.

3.1.2 Puesta a tierra

Todo los equipos deberán estar provistos de un terminal de tierra externa, sección 120 mm² (4/0 AWG) para permitir la conexión al sistema de puesta a tierra de la planta. Cuando un número de cubículos forman un conjunto, éstos deberán incluirán una barra integral de puesta a tierra con terminales externos en cada extremo.

3.1.2 Pintura y acabado

–En general, la preparación de la superficie y pintura se hará de conformidad con las especificaciones de pintura estándar del fabricante.

–La capa del acabado exterior deberá ser de color ANSI 61 y el acabado interior será un color claro a menos que se especifique lo contrario parte del comprador.

3.1.3 Pruebas

Las pruebas estándares se llevará a cabo para cada variador de frecuencia de baja tensión de acuerdo con los códigos y normas aplicables.

Las pruebas completas serán llevarán a cabo para cada variador de frecuencia de baja tensión.

Las pruebas completas deberán incluir las siguientes:

–El calentamiento funcionando a plena carga bajo condiciones nominales de carga y de velocidad.

–Pruebas sin carga en el rango de velocidades.

–Pruebas de sobre velocidad.

–Sobrecarga momentánea.

–Pruebas funcionales.

–Medición de la resistencia de aislamiento.

Todos los defectos detectados, como resultado de las pruebas, se reemplazarán o se

repararán y se re-probará al costo del fabricante antes del embarque.

Los informes de prueba certificados deberán ser presentados antes de liberar el equipo para el transporte.

La Tabla N° 3.1 muestra la hoja de datos para un variador de baja tensión.

TABLA N° 3.1 Hoja de datos variador de baja tensión [s/n]

N°	Descripción	Unidad	Requerido
1.0	General		
1.1	Proveedor		Indicar
1.2	Fabricante		Indicar
1.3	Ubicación del proyecto		Indicar
1.4	Norma de fabricación		
a	IEC		
b	ANSI/NEMA		Nema
2.0	Condiciones del sitio		
2.1	Temperatura (min/máx.)	°C	6.3
2.2	Altitud	msnm	4250
2.3	Humedad relativa	%	67.3
2.4	Tipo de atmosfera: (Salino/ polvo / Acido)		Indicar
2.5	Área Clasificación: Clase / Grupo / División		Indicar
2.6	Tipo de servicio: (Normal / Severo)		Indicar
2.7	Zona sísmica		NTE E.030
3.0	Sistema de alimentación		
3.1	Rango de tensión	Vac	460 ± 10 %
3.2	N° de fases		3 fases
3.3	Frecuencia	Hz	60
3.4	Capacidad de corto circuito	kA	40
3.5	Tipo de conexión a tierra		Solido
4.0	Sistema de control		
4.1	Rango de tensión	Vac	120
4.2	N° de fases) / Frecuencia	ph / Hz	1 ph / 60
5.0	Características mecánicas		
5.1	Equipo a accionar		Motor inducción
5.2	Rango de velocidad continua	%	60 - 110
5.3	Tipo de servicio		Continuo
5.4	Tipo de torque		Variable
6.0	Información del motor		
6.1	Potencia de salida a la altura de operación	kW	250

N°	Descripción	Unidad	Requerido
6.2	Rango de tensión	Vac	460
6.3	N° de fases		Trifásico
6.4	Frecuencia	Hz	60
6.5	Factor de servicio a la altura de operación		1
6.6	Norma de fabricación (Nema)		B
6.7	Clase de aislamiento		F
6.8	Aumento de temperatura		Clase B (80°C).
6.9	Corriente a plena carga	A	Indicar
6.10	Distancia motor/VFD (m)	m	150 Aprox.
6.11	Velocidad de salida del motor (RPM)	%	60 al 110
7.0	Requerimiento del accionamiento		
7.1	Modelo		Indicar
7.2	Numero de catálogo		Indicar
7.3	Encerramiento		IP 21
7.4	Tipo de rectificador		6 pulsos
7.5	Tipo de inversor		Indicar
7.6	Dimensiones generales	(WxDxH) mm	Indicar
7.7	Peso	kg.	Indicar
7.8	Clasificación		
a	Potencia nominal de salida del VFD a la altura de operación	Hp	Indicar
b	Corriente nominal de salida del VFD a la altura de operación	Amp.	Indicar
c	Temperatura límite a la altura de operación	°C	Indicar
d	Eficiencia a plena carga y velocidad	%	98(a plena carga)
e	Rango de factor de potencia (para todo el rango de velocidad)		0.98(a velocidad nominal)
f	Rango de frecuencia de salida (RPM)	Hz	0-500
g	Rango de tensión de salida	Vac	0-Vn
h	Capacidad de sobrecarga		
h.1	Para un máximo 1 minuto	%	150
h.2	Para un máximo 3 segundos	%	200
7.9	Entrada analógica/ Salida		
a	Velocidad de referencia a través de una entrada 4-20 mA		Si
b	Dos salidas programables 4-20 mA para ofrecer cualquiera de las siguientes funciones como mínimo:		Si

N°	Descripción	Unidad	Requerido
b.1	Velocidad del motor		Si
b.2	Corriente del motor		Si
b.3	Potencia de salida		Si
b.4	Frecuencia de salida		Si
7.10	Entrada digital / Salida		
a	Control de dos hilos para Encendido/Apagado		Si
b	Dos salidas digitales programables de forma C para ofrecer cualquiera de las siguientes funciones como mínimo:		
b.1	Giro del motor		Si
b.2	Falla eléctrica		Si
b.3	Equipo listo		Si
7.11	Funciones de protección		
a	Sobrecarga del motor		Clase 10
b	Pérdida de potencia		Si
c	Mínima tensión		Si
d	Sobretensión		Si
e	Falla fase a fase		Si
f	Falla tierra		Si
g	Sobre calentamiento		Si
h	Reintentos máximos		Si
7.12	Medida		
a	Corriente de salida en Amperios		Si
b	Tensión de salida en Volts		Si
c	Potencia de salida en kW		Si
d	Potencia en MWh transcurridos		Si
e	DC Tensión en barra		Si
f	Frecuencia de salida		Si
g	Disipador de calor		Si
h	Últimas (8) fallas		Si
i	Tiempo de operación transcurrido		Si
7.13	Módulo de interface		Requerido
a	Número de parte		Indicar
b	Capacidad para gráficos		Indicar
c	Control del sistema de interface		Indicar

N°	Descripción	Unidad	Requerido
7.14	Comunicación		Ethernet (principal), Profibus DP, Modbus TCP/IP, Modbus RTU, Devicenet.
7.15	Opciones de comunicación		
7.16	Reactor de carga		Si
a	Fabricante		Indicar
b	Modelo		Indicar
c	Cerramiento		IEC 23 (IP 54)
d	Pintura		RAL 7035 (Light Gray)
e	Impedancia		Indicar
f	Rango de corriente		Indicar
g	Rango de tensión		Indicar
h	dV/dt Protección (volts/microsegundos)		Indicar
i	Clase de sistema de aislamiento		Indicar

CAPÍTULO IV ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE MEDIA TENSIÓN

4.1 Variadores para motores de media tensión (AFM)

Los variadores de velocidad de media tensión se utilizan para el control de velocidad y par en motores de inducción estándar de media tensión.

En el mercado existe variadores de media tensión hasta 7,2 kV. Las marcas comunes ABB, Siemens, Eaton, Rocwell tienen variadores de media tensión en 4,16 kV.

Los variadores de media tensión tiene muchas aplicaciones en el campo de la industria, a continuación se lista algunas de las principales aplicaciones.

- Correas transportadoras
- Chancadoras
- Molinos
- Ventiladores
- Bombas
- Compresores
- Mezcladores
- Sopladores

Para motores mayores a 300 Hp la tensión de salida será mayor a 2300 V.

Los variadores de frecuencia para motores de media tensión son instalados dentro de como un equipo independiente fuera de los centro de control de motores.

Según la marca y tecnología tenemos una gran variedad de variadores en media tensión según la potencia del motor, para motores de 300 a 2500 Hp con tensiones de 2400 V, para motores de 300 a 4000 Hp con tensiones de alimentación 3300 V y para motores de 300 a 6000 Hp con tensiones de alimentación 4160 V.

Dependiendo del tipo de tecnología los variadores en media tensión pueden ser equipados con rectificador de diodos de 12, 18 o 24 pulsos que cumplen los rigurosos requerimientos de distorsión de armónicos de corriente y voltaje de acuerdo a lo definido por la IEEE, IEC y EN. Esto elimina la necesidad de costosos análisis de armónicos o instalaciones de redes de filtros al instalar un nuevo variador [5].

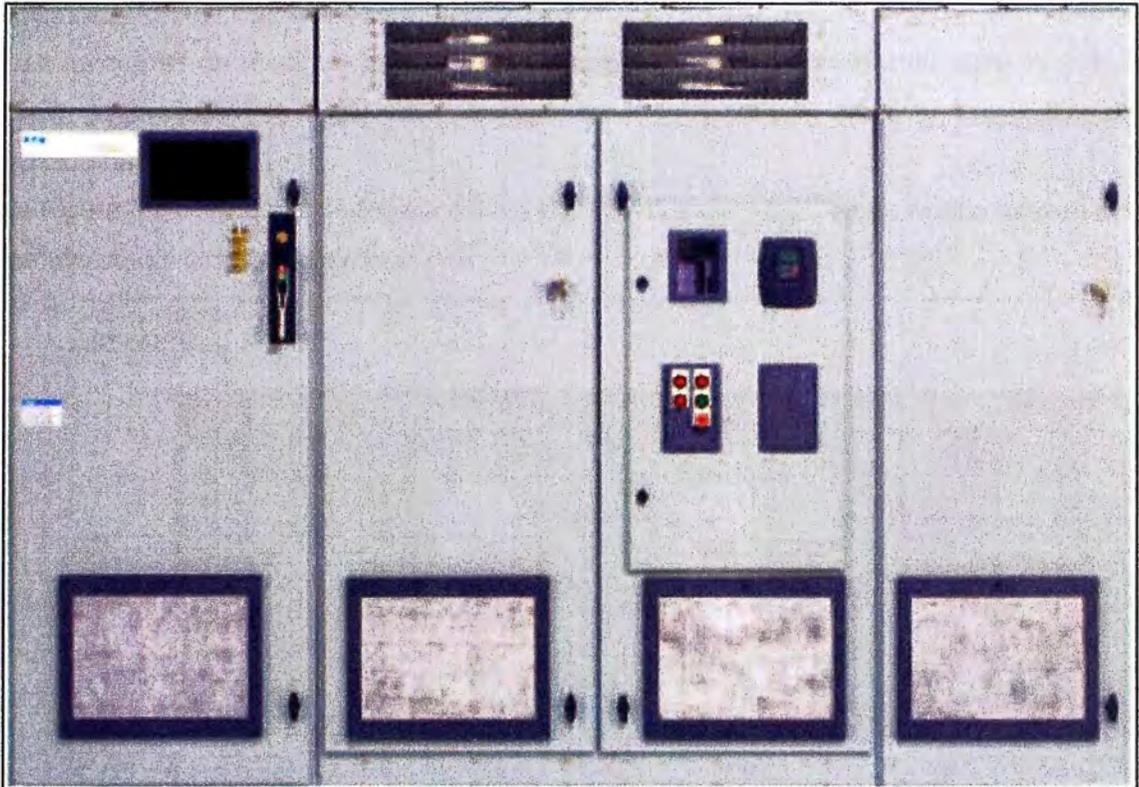


Fig. 4.1 Variador media tensión Ampgard SC 9000 Eaton

La consideración importante al momento de la selección de un variador de media tensión es el porcentaje de distorsión de la corriente mencionado en la norma IEEE 519.

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69 000 V)

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

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

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

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

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Fig. 4.2 Límites de distorsión según norma IEEE 519.

4.1.1 Principales componentes

Los variadores de media tensión esta compuestos principalmente por un semi conductor IGCP, capacitores de larga vida, sistema de control para el motor y protección por pérdida de potencia.

La Figura 4.3 muestra el esquema básico del variador de velocidad en media tensión con transformador incorporado [5].

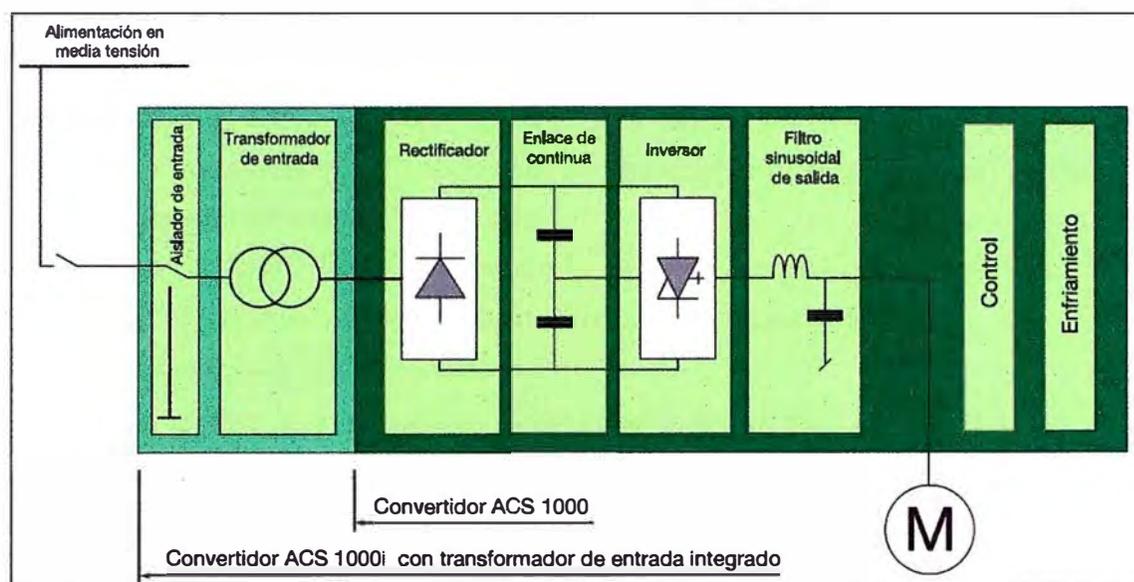


Fig. 4.3 Esquema básico del variador de media tensión ACS 1000 ABB

4.1.2 Características

Los variadores de velocidad para motores de media tensión deberán contar como mínimo de las siguientes características

a. General

El Variador de frecuencia de Media Tensión estará compuesto por:

- Seccionador fusible
- Factor de corrección de potencia / unidad de filtro de armónicos (si es necesario).
- Rectificador de entrada deberá ser como mínimo de 12 pulsos.
- Inversor de salida.
- Sección de lógica de control.
- Bypass de arranque de velocidad constante (si es necesario).

El Variador de frecuencia de media tensión deberá cumplir con todos los requerimientos conforme a la última edición de IEEE 519 para la distorsión total de los armónicos de tensión y corriente. Las operaciones individuales o simultáneas de los variadores no deberán sumar más que 3% de distorsión total de armónicos de tensión.

La máxima distorsión total permisible de armónicos de corriente para cada variador de

frecuencia de media tensión no deberá exceder el 5% calculado y medido en la conexión primaria de cada seccionador del variador de frecuencia de media tensión.

El variador de media tensión deberá de contar un filtro de armónicos para cumplir con estos requerimientos de la norma IEEE 519 y deberá tener un factor de potencia real mínimo de 0.97 a partir de un 30% hasta 100% de velocidad.

Se deberá corregir el equipo por altitud y disipación de calor, de acuerdo a las normas nacionales e internacionales.

b. Características Básicas

El variador de frecuencia de media tensión será capaz de producir un ajuste de tensión/frecuencia de salida para proporcionar un funcionamiento continuo en el rango de velocidad normal del sistema de 30% a 100%.

El teclado local de cada variador de frecuencia de media tensión deberá incluir por lo menos las siguientes funciones para el modo de operación manual o prueba:

- Indicación de Energizado (POWER ON)
- Indicación del variador de frecuencia de media tensión, funcionando (AFM RUM).
- Indicación de falla del variador de frecuencia de media tensión (FALLO AFM).
- Pulsador manual de parada.
- Pulsador manual de arranque.
- Selector manual Local/Remoto (tecla de funcionamiento)
- Botón de reconocimiento de falla (RESET).
- Aumentar/reducir pulsadores.

Además, el teclado deberá incluir las siguientes características:

- Pantalla digital debe presentar todos los mensajes de diagnóstico y los valores de los parámetros en unidades de la ingeniería.
- El módulo del teclado deberá contener un programa de “auto-prueba” del software que se puede activar para verificar el funcionamiento adecuado del teclado.

En el teclado, las indicaciones mínimas a ser provistas será:

- Velocidad de la demanda en porcentaje.
- Entrada de corriente en amperios.
- Salida de corriente en amperios.
- Frecuencia de salida en hz.
- Tensión de entrada
- Tensión de salida
- Potencia total Trifásico en kW
- Medición de kilovatio-hora

c. Encerramiento

- Todos los componentes del variador de frecuencia de media tensión incluyendo el seccionador de entrada, el transformador y el cableado deberá tener:
- Las secciones de diseño de conversión de potencia y de equipos auxiliares deben ser diseño como NEMA-1.
- Todos los conductores (barra o cable) deben ser aislados.
- El microprocesador y tablero de control de lógica y sus fuentes de alimentación se colocaran en una misma sección no-ventilada NEMA-1, seguramente accesible sin la exposición a altas tensiones y sin parar la unidad.
- Todo el cableado será ubicado internamente dentro del encerramiento del variador de frecuencia de media tensión.
- Se debe de suministrar 2 ventiladores de enfriamiento redundantes, cada uno dimensionado para el 100% de capacidad de enfriamiento, con conmutación automática en el caso de una falla del ventilador.
- La separación máxima de giro de la puerta no excederá de 914 mm (36”).

d. Circuitos de protección

El variador de frecuencia de media tensión deberá tener las siguientes características mínimas de protección:

- Corto circuito en la salida de variador.
- Sobre corriente instantánea.
- Sobrecarga del motor.
- Mínima tensión en la entrada AC.
- Sobretensión en la entrada de AC.
- Pérdida de fase en la entrada AC.
- Sobre temperatura en el variador.
- Falla de ventilación.
- Mínima tensión en los IGBTs.
- Mínima tensión de control.
- Pérdida de fase a la salida del variador.
- Sobretensión a la salida del variador.
- Falla a tierra.
- Baja carga.
- Sobre temperatura del transformador.
- Falla en el CPU del controlador.
- Sobretensión de la barra DC.

- Mínima tensión de la barra DC.
- Sobre velocidad del motor.
- Falla en módulo de potencia.
- Un monitor de ocho canales RTD para la supervisión de la temperatura de los cojinetes del motor y la temperatura del devanado (RTD) del estator, para ser montado y cableado en el variador de frecuencia de media tensión.

El variador de frecuencia de media tensión debe ser capaz de soportar las condiciones de falla sin daño a los componentes del circuito de potencia:

- Falla por cortocircuito monofásica o trifásico en los terminales de salida del variador de frecuencia de media tensión.
- La falla de conmutar el tiristor del inversor debido a sobrecarga severa o a otras condiciones.
- Pérdida de potencia de entrada debido a la apertura del dispositivo de desconexión de la entrada del variador de frecuencia de media tensión o falla de energía durante el funcionamiento del variador de frecuencia de media tensión.
- Pérdida de una (1) fase de la potencia de entrada.
- Regeneración del motor debido al giro inverso o a la pérdida de energía de entrada del variador de frecuencia de media tensión.
- Circuito abierto en la salida del variador de frecuencia de media tensión durante el funcionamiento.

El variador de frecuencia de media tensión tendrá la capacidad de auto frecuencia roll-back durante la sobrecarga o sobre temperatura y las condiciones para el disparo.

e. Arrancador constante de Bypass de velocidad (si es requerido)

El variador de frecuencia de media tensión deberá tener la capacidad de operar el motor a través de un bypass en el caso de mal funcionamiento del variador de frecuencia de media tensión. La opción de bypass consistirá en un arrancador con fusible a pleno voltaje, un contactor de aislamiento y el relé de sobrecarga del motor. El contactor en el variador de frecuencia debe abrir y cerrar eléctricamente.

f. Interface del Sistema de Control

Todos los variadores de velocidad deberán contar con un protocolo de comunicación Ethernet (principal), Profibus DP, Modbus TCP/IP, Modbus RTU o Devicenet.

La selección del punto de ajuste será realizada desde el sistema de control remoto y desde el teclado en modo LOCAL.

El variador de frecuencia de media tensión debe proporcionar, por lo menos, dos (2) salidas análogas de 4-20 mA, destinadas a la indicación remota de la corriente real RMS

de las líneas y de la velocidad RPM del motor. Estas señales serán aisladas eléctricamente (600 V a tierra y entre fase).

El AFD deberá suministrar una entrada digital para control remoto:

- Piloto run.
- Pulsador4 Job.
- Pulsador para da de emergencia.

Esta entrada digital deberá ser para 120 V, 60 hz.

El AFD deberá proporcionar salidas digitales para indicación de los siguientes estados:

- Variador de velocidad listo
- Variador de velocidad en funcionamiento
- Variador de velocidad fallado
- Advertencia de variador de velocidad

El variador de frecuencia de media tensión deberá ser completamente accesible a los protocolos de comunicación mencionados de tal forma que se centralicen las funciones remotas pudiéndose realizar:

- Monitoreo remoto.
- Control remoto.
- Ajuste remoto de parámetros del variador.
- Medición a distancia.
- Registro de eventos.
- Configuración remota.

g. Cableado

La sección mínima del conductor de control será 14 AWG (2.5 mm²).

Todas las conexiones externas de los transformadores de corriente serán cableadas a los bloques de terminales. Dichos bloques serán de tipo cortocircuito

Todas las conexiones salientes serán conectadas a los bloques de terminales. Se proporcionara terminales de reserva en la cantidad del 20% de los terminales ocupada para uso futuro. Cada punto terminal será la adecuada para aceptar dos conductores de campo 12 AWG (4 mm²).

Se suministrará marcadores de conductores en ambos extremos para todo el cableado de control y de instrumentos.

Números de cables y caja de borneras deberán coincidir a lo indicado en los planos de interconexión del Fabricante. Todos los bloques de terminales y terminales deberán estar claramente marcados. Todos los cables serán identificados mediante mangas (plástica) termo-contráible en cada extremo. Todos los cables procedentes del mismo nodo o punto

eléctrico deberá llevar el mismo número del cable.

h. Pintura y acabado

La capa del acabado exterior deberá ser ANSI 61 gris claro y el interior será un color claro a menos que se especifique otro color.

La Tabla N° 4.1 muestra la hoja de datos para un variador de baja tensión.

TABLA N° 4.1 Hoja de datos variador de media tensión [s/n]

N°	Descripción	Unidad	Requerido
1.0	General		
1.1	Proveedor		Indicar
1.2	Fabricante		Indicar
1.3	Ubicación del proyecto		Indicar
1.4	Norma de fabricación		
a	IEC		
b	ANSI/NEMA		Nema
2.0	Condiciones del sitio		
2.1	Temperatura (min/máx.)	°C	6.3
2.2	Altitud	msnm	4250
2.3	Humedad relativa	%	67.3
2.4	Tipo de atmosfera: (Salino/ polvo / Acido)		Indicar
2.5	Área Clasificación: Clase / Grupo / División		Indicar
2.6	Tipo de servicio: (Normal / Severo)		Indicar
2.7	Zona sísmica		NTE E.030
3.0	Sistema de alimentación		
3.1	Rango de tensión	Vac	4160
3.2	N° de fases		3 fases
3.3	Frecuencia	Hz	60
3.4	Capacidad de corto circuito	kA	40
3.5	Tipo de conexión a tierra		Solido
4.0	Sistema de control		
4.1	Rango de tensión	Vac	120
4.2	N° de fases / Frecuencia	ph / Hz	1 ph / 60
5.0	Características mecánicas		
5.1	Equipo a accionar		Motor inducción
5.2	Rango de velocidad continua	%	60 - 110
5.3	Tipo de servicio		Continuo
5.4	Tipo de torque		Variable
6.0	Información del motor		
6.1	Potencia de salida a la altura de	HP	500

N°	Descripción	Unidad	Requerido
	operación		
6.2	Rango de tensión	Vac	4160
6.3	N° de fases		Trifásico
6.4	Frecuencia	Hz	60
6.5	Factor de servicio a la altura de operación		1
6.6	Norma de fabricación (Nema)		B
6.7	Clase de aislamiento		F
6.8	Aumento de temperatura		Clase B (80°C)
6.9	Corriente a plena carga	A	Indicar
6.10	Distancia motor/VFD (m)	m	50 Aprox.
6.11	Velocidad de salida del motor (RPM)	%	60 al 110
7.0	Requerimiento del accionamiento		
7.1	Modelo		Indicar
7.2	Numero de catálogo		Indicar
7.3	Encerramiento		IP 21
7.4	Tipo de rectificador		12 pulses
7.5	Tipo de inversor		Indicar
7.6	Dimensiones generales	(WxDxH) mm	Indicar
7.7	Peso	kg.	Indicar
7.8	Clasificación		
a	Potencia nominal de salida del VFD a la altura de operación	Hp	Indicar
b	Corriente nominal de salida del VFD a la altura de operación	Amp.	Indicar
c	Temperatura límite a la altura de operación	°C	Indicar
d	Eficiencia a plena carga y velocidad	%	98(a plena carga)
e	Rango de factor de potencia (para todo el rango de velocidad)		0.98(a velocidad nominal)
f	Rango de frecuencia de salida (RPM)	Hz	0-500
g	Rango de tensión de salida	Vac	0-Vn
h	Capacidad de sobrecarga		
h.1	Para un máximo 1 minuto	%	150
h.2	Para un máximo 3 segundos	%	200
7.9	Entrada analógica/ Salida		
a	Velocidad de referencia a través de una entrada 4-20 mA		Si

N°	Descripción	Unidad	Requerido
b	Dos salidas programables 4-20 mA para ofrecer cualquiera de las siguientes funciones como mínimo:		Si
b.1	Velocidad del motor		Si
b.2	Corriente del motor		Si
b.3	Potencia de salida		Si
b.4	Frecuencia de salida		Si
7.10	Entrada digital / Salida		
a	Control de dos hilos para Encendido/Apagado		Si
b	Dos salidas digitales programables de forma C para ofrecer cualquiera de las siguientes funciones como mínimo:		
b.1	Giro del motor		Si
b.2	Falla eléctrica		Si
b.3	Equipo listo		Si
7.11	Funciones de protección		
a	Sobrecarga del motor		Clase 10
b	Pérdida de potencia		Si
c	Mínima tensión		Si
d	Sobretensión		Si
e	Falla fase a fase		Si
f	Falla tierra		Si
g	Sobre calentamiento		Si
h	Reintentos máximos		Si
7.12	Medida		
a	Corriente de salida en Amperios		Si
b	Tensión de salida en Volts		Si
c	Potencia de salida en kW		Si
d	Potencia en MWh transcurridos		Si
e	DC Tensión en barra		Si
f	Frecuencia de salida		Si
g	Disipador de calor		Si
h	Últimas (8) fallas		Si
i	Tiempo de operación transcurrido		Si
7.13	Módulo de interface		Requerido
a	Número de parte		Indicar
b	Capacidad para gráficos		Indicar
c	Control del sistema de interface		

N°	Descripción	Unidad	Requerido
7.14	Comunicación		Ethernet (principal), Profibus DP, Modbus TCP/IP, Modbus RTU, Devicenet.
7.15	Opciones de comunicación		
7.16	Reactor de carga		Si
a	Fabricante		Indicar
b	Modelo		Indicar
c	Cerramiento		IEC 23 (IP 54)
d	Pintura		RAL 7035 (Light Gray)
e	Impedancia		Indicar
f	Rango de corriente		Indicar
g	Rango de tensión		Indicar
h	dV/dt Protección (volts/microsegundos)		Indicar
i	Clase de sistema de aislamiento		Indicar

CAPÍTULO V ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN AMPLIACIÓN A 18000 TPD MINERA BROCAL

5.1 Antecedentes

La sociedad minera El Brocal ha realizado la ampliación de su planta de procesos a través del proyecto "AMPLIACIÓN DE OPERACIONES A 18000 TPD. El proyecto tiene como ubicación la provincia de Cerro de Pasco, departamento de Pasco, donde se encuentra el centro de operaciones de la sociedad minera El Brocal.

5.2 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de la sociedad minera El Brocal, se interconecta al SEIN a través de la línea Paragsha 2 – S.E Principal Huaraucaca en 138 kV y de la línea Carhuamayo – S.E Principal Huaraucaca en 138kV. A través de la cual se deriva el suministro para las plantas concentradoras, mina subterránea, tajo abierto y servicios propios.

La sociedad minera El Brocal cuenta con dos grupos de generación hidráulica (C.H. Rio Blanco y la C.H. Jupayagra), que se conectan a la barra de 10.50 kV de la S.E. Principal, con despachos de potencia que oscilan entre 1.5 MW y 1.1 MW en los escenarios de avenida y estiaje respectivamente, mostrado en la Figura 5.1.

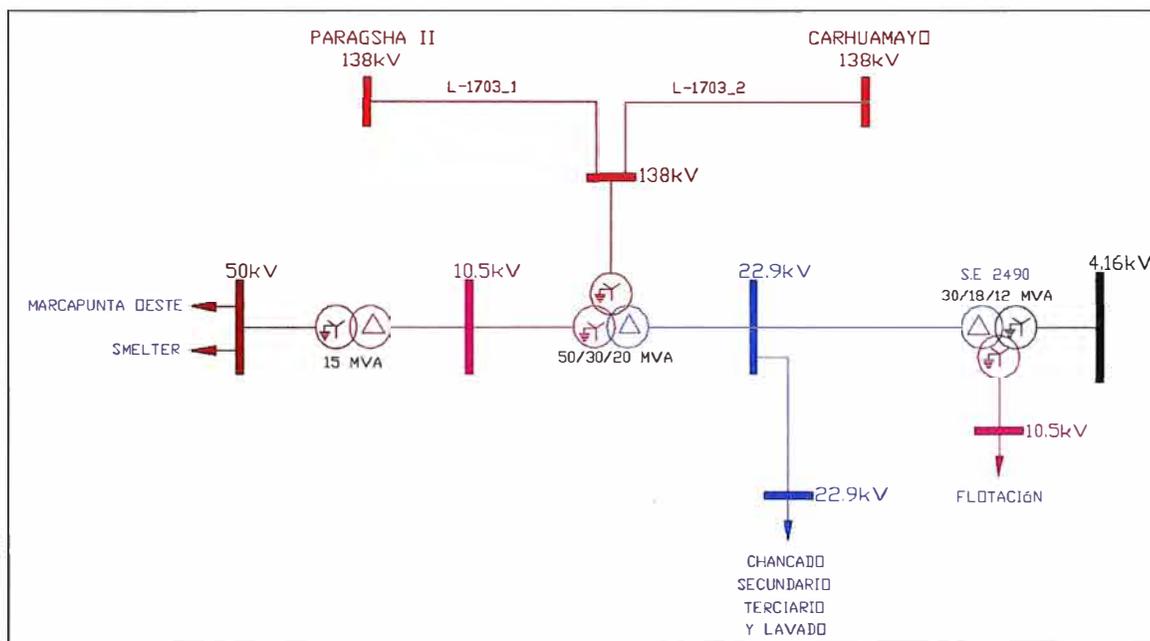


Fig. 5.1 Alimentación del sistema eléctrico sociedad minera El Brocal

5.2.1 Parámetros principales de los motores eléctricos

Las curvas de carga de los motores fueron seleccionados del Libro: Industrial Power Engineering and Applications Handbook, K.C. Agra Wal, Newnws, pag 2/41 y 2/42, como referencia, al no contar con las curvas de carga.

El arranque de motores con variador (D1) se limita la corriente de arranque a $1.05 - 1.10 \cdot I_n$, el arranque con resistencias liquidas (LRS) a $1.5 - 2.0 \cdot I_n$, el arranque con Softstarter (C1) a $4.0 \cdot I_n$ y el arranque directo (A1) a $6 - 8.0 \cdot I_n$ de acuerdo a hoja de datos técnicos de los motores.

5.2.2 Área de análisis con variadores en media tensión

Según el análisis del sistema eléctrico de la compañía Minera El Brocal, el área de molienda y flotación cuentan con motores en media tensión para la cual se requiere variadores de velocidad. En la Figura 5.2 muestra parte del sistema de molienda y flotación para el análisis del accionamiento de motores en media tensión por variadores de velocidad. El análisis del flujo de carga se realizó con el software Etap 7.5 y anexo A.

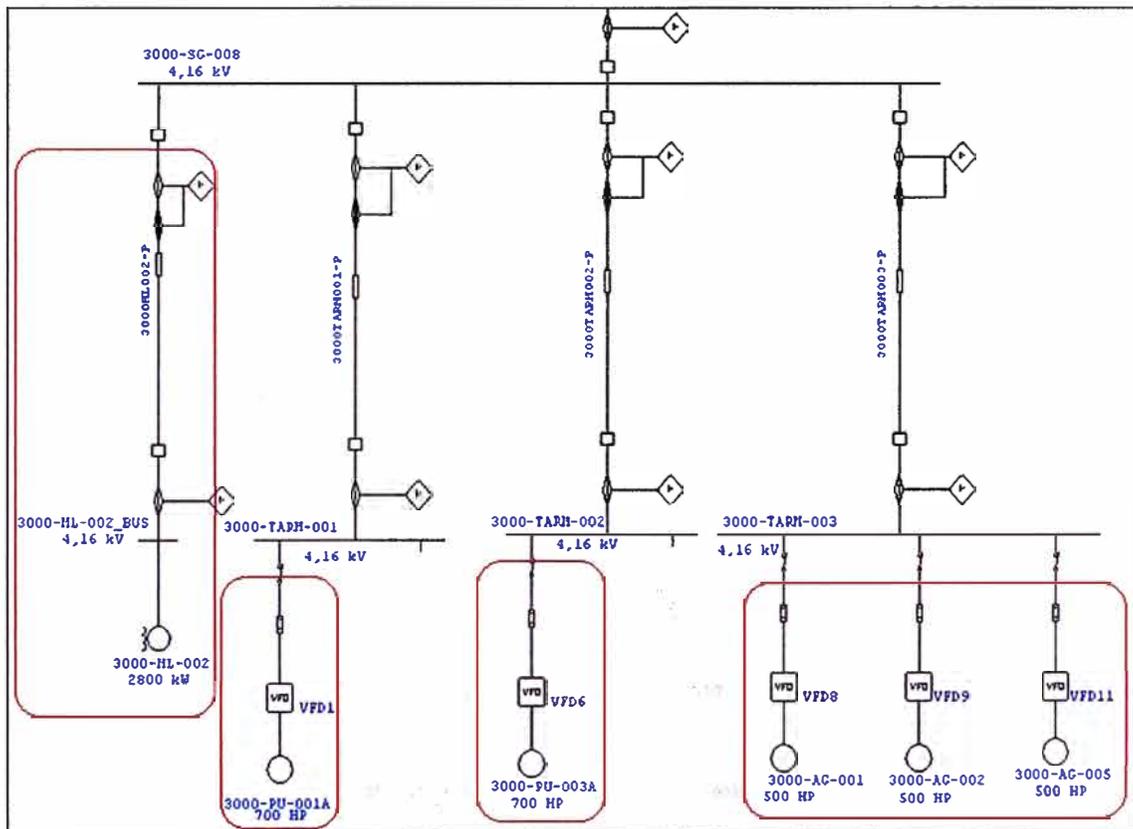


Fig. 5.2 Sistema eléctrico de molienda de la sociedad minera El Brocal

La Tabla N° 5.1, muestra los parámetros principales de los motores en estudio de los cuales todos usan variadores de velocidad a excepción del molino de bolas que tiene un accionamiento con resistencias liquidas.

TABLA N° 5.1 Principales motores del sistema de molienda [s/n]

Descripción	Área	Código motor	(kW)	(kV)	% PF
Molino de Bolas	Molienda	3000-ML-002	280	4.16	84
Bomba de Pulpa	Molienda	3000-PU-001A	522.2	4.16	87
Bomba de Pulpa	Molienda	3000-PU-003A	522.2	4.16	87
Tanque Acondicionador	Flotación	3000-AG-001	373	4.16	80
Tanque Acondicionador	Flotación	3000-AG-002	373	4.16	80
Tanque Acondicionador	Flotación	3000-AG-003	373	4.16	80

5.2.3 Análisis del flujo de carga

En estado estacionario a plena carga los parámetros del flujo de carga se muestran en la Figura 5.3.

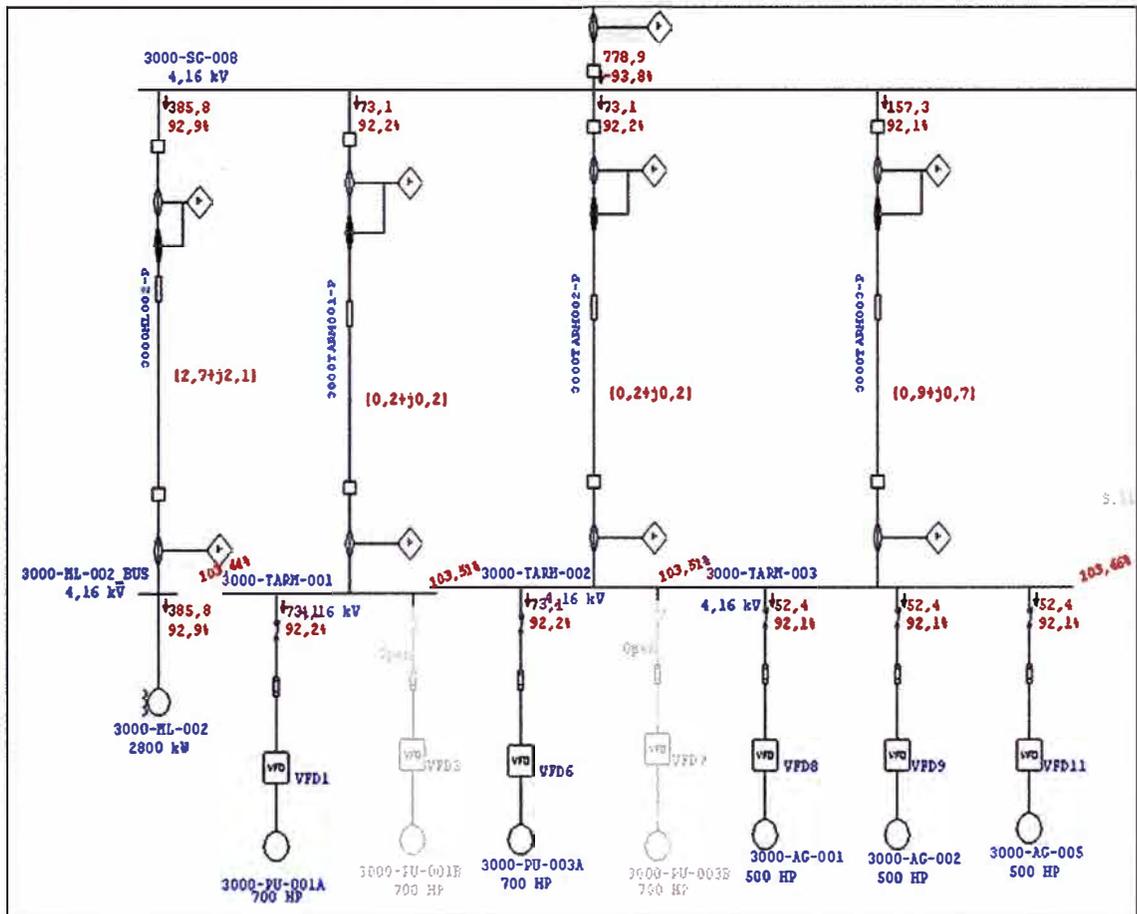


Fig. 5.3 Flujo de carga sistema de molienda de la sociedad minera El Brocal

Los valores de corriente resultado del flujo de carga para cada uno de los motores se muestran en la Tabla N° 5.2.

TABLA N° 5.2 Corriente estado estacionario para motores del sistema de molienda [s/n]

Descripción	Código motor	(kW)	(kV)	(A)	% PF
Molino de Bolas	3000-ML-002	280	4.16	385	84
Bomba de Pulpa	3000-PU-001A	522.2	4.16	73,1	87
Bomba de Pulpa	3000-PU-003A	522.2	4.16	73,1	87
Tanque Acondicionador	3000-AG-001	373	4.16	52,4	80
Tanque Acondicionador	3000-AG-002	373	4.16	52,4	80
Tanque Acondicionador	3000-AG-003	373	4.16	52,4	80

Los valores de tensión en barra 3000-TARM-001 que alimenta al motor 3000-PU-001A en el instante de arranque $t=1$ segundo y la influencia en los otros motores y se muestran en la Tabla N° 5.3.

TABLA N° 5.3 Resultados de nivel de tensión en barras de los motores [s/n]

Código de equipo	Tensión nominal (kV)	Nivel de Tensión		
		Tensión (%) estado estable	Tensión (%) estado dinámico	Variación (%)
3000-ML-002	4.16	98.67	97.68	0.987
3000-SG-008	4.16	98.83	97.84	0.985
3000-TARM-001	4.16	98.83	97.80	1.023
3000-TARM-002	4.16	98.83	97.84	0.985
3000-TARM-003	4.16	98.72	97.73	0.986

Los valores de tensión en barra 3000-TARM-002 que alimenta al motor 3000-PU-003A en el instante de arranque $t=10$ segundos y la influencia en los otros motores y se muestran en la Tabla N° 5.4.

TABLA N° 5.4 Resultados de nivel de tensión en barras de los motores [s/n]

Código de equipo	Tensión nominal (kV)	Nivel de Tensión		
		Tensión (%) estado estable	Tensión (%) estado dinámico	Variación (%)
3000-ML-002	4.16	98.67	97.30	1.365
3000-SG-008	4.16	98.83	97.46	1.363
3000-TARM-001	4.16	98.83	97.44	1.388
3000-TARM-002	4.16	98.83	97.43	1.400
3000-TARM-003	4.16	98.72	97.36	1.364

El perfil de la potencia kW, variación de la tensión en % Vn y variación de la corriente en % In para los motores 3000-PU-001A y 3000-PU-003^a se muestra en la Figura 5.4, Figura 5.5 y Figura 5.6.

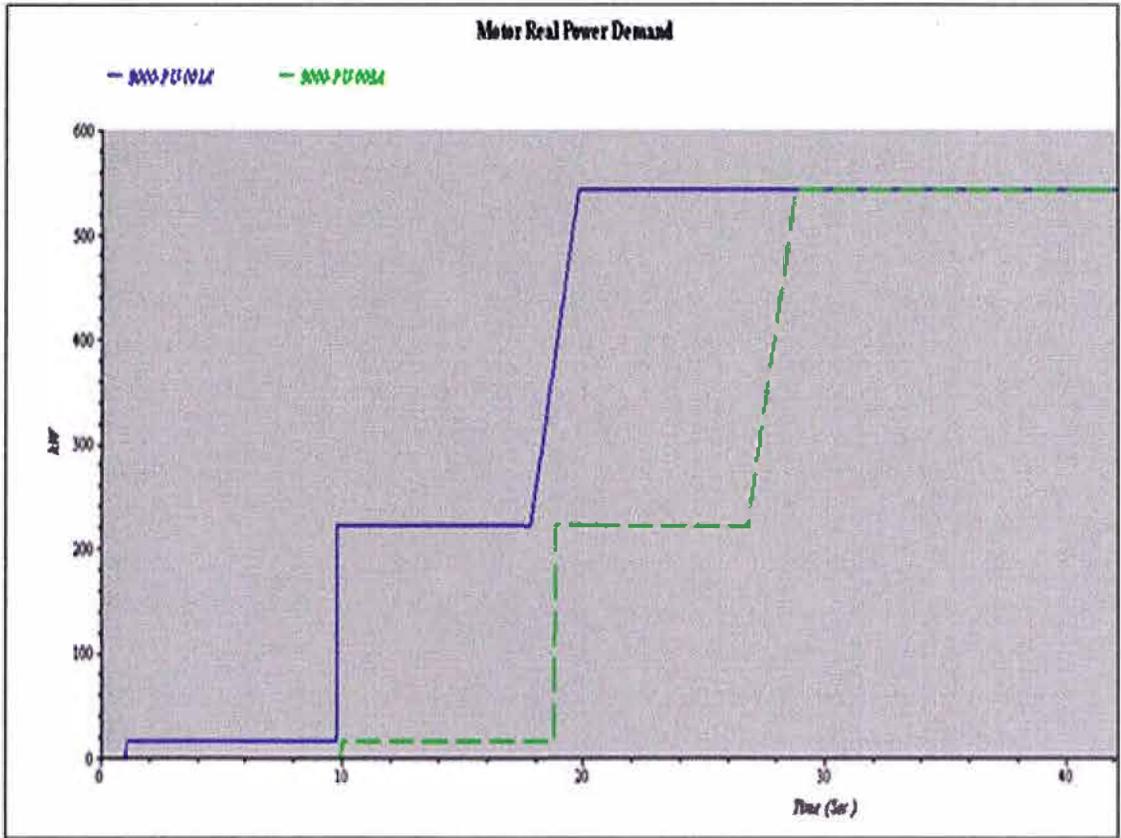


Fig. 5.4 Perfil de potencia en kW

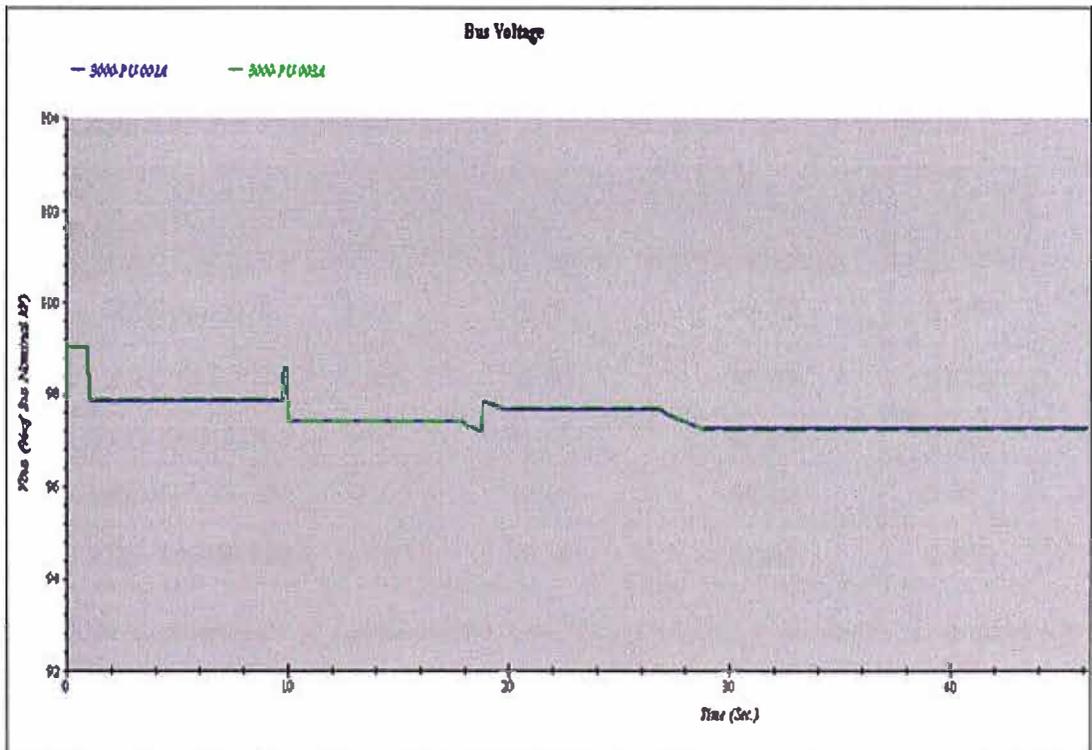


Fig. 5.5 Perfil de la tensión en % Vn

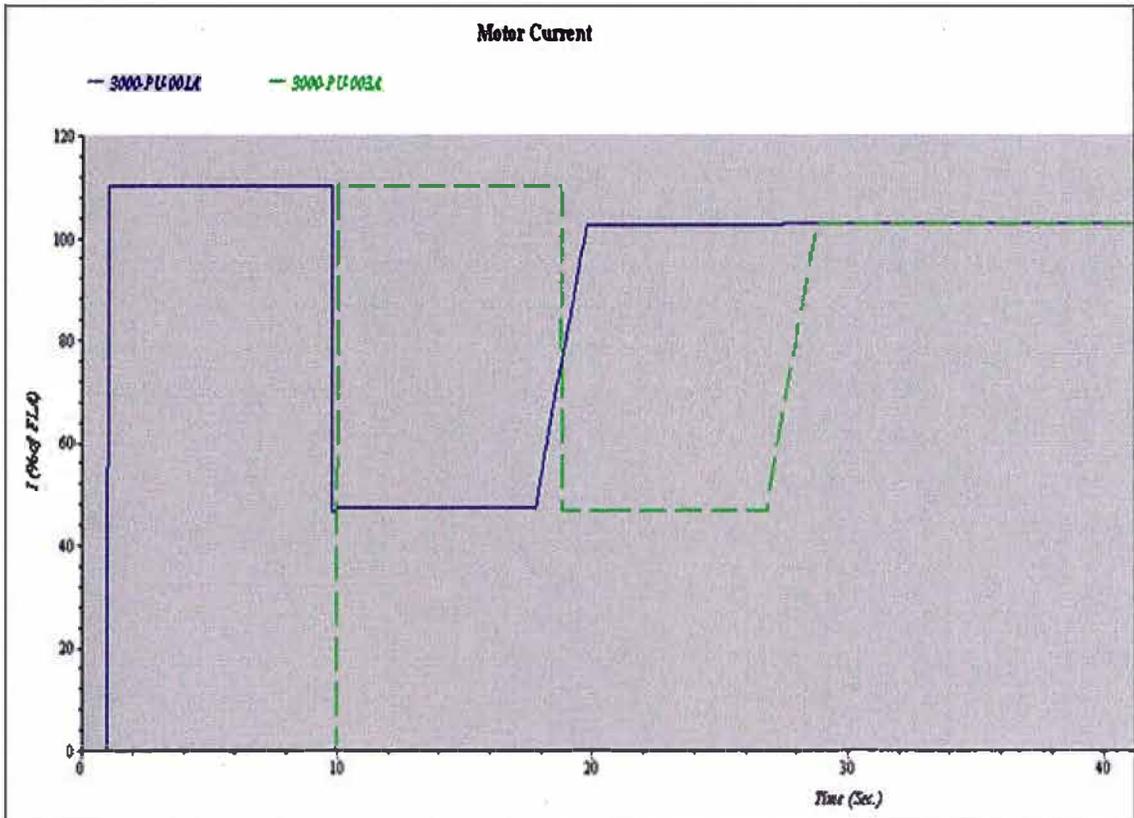


Fig. 5.6 Perfil de la corriente en % In

Los valores de tensión en barra 3000-TARM-003 que alimenta a los motores 3000-AG-001, 3000-AG-002 y 3000-AG-003 en el instante de arranque $t=1$ segundo y la influencia en los otros motores y se muestran en la Tabla N° 5.5.

TABLA N° 5.5 Resultados de nivel de tensión en barras de los motores [s/n]

Código de equipo	Tensión nominal (kV)	Nivel de Tensión		
		Tensión (%) estado estable	Tensión (%) estado dinámico	Variación (%)
3000-ML-002	4.16	99.40	98.72	0.684
3000-SG-008	4.16	99.56	98.87	0.683
3000-TARM-001	4.16	99.51	98.82	0.683
3000-TARM-002	4.16	99.51	98.82	0.683
3000-TARM-003	4.16	99.56	98.85	0.709

El perfil de la potencia kW, variación de la tensión en % Vn y variación de la corriente en % In para los motores 3000-AG-001, 3000-AG-002 y 3000-AG-003 se muestra en la Figura 5.7, Figura 5.8 y Figura 5.9.

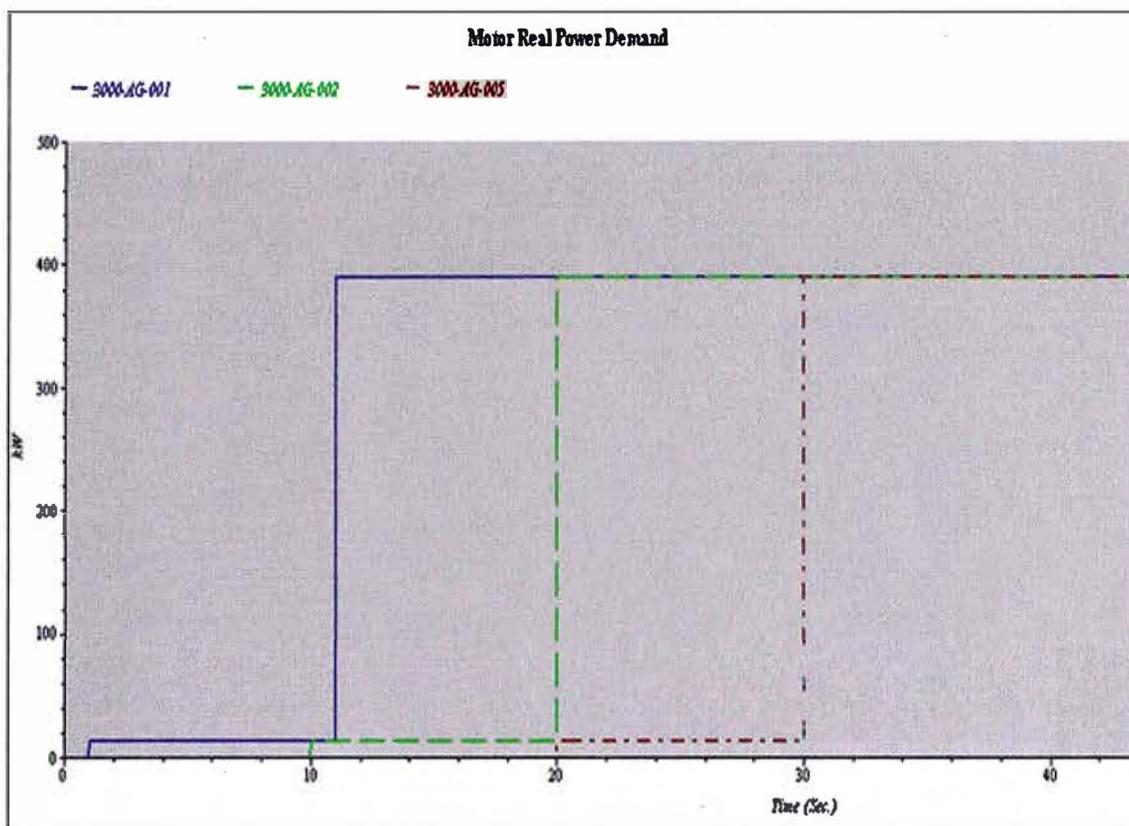


Fig. 5.7 Perfil de potencia en kW

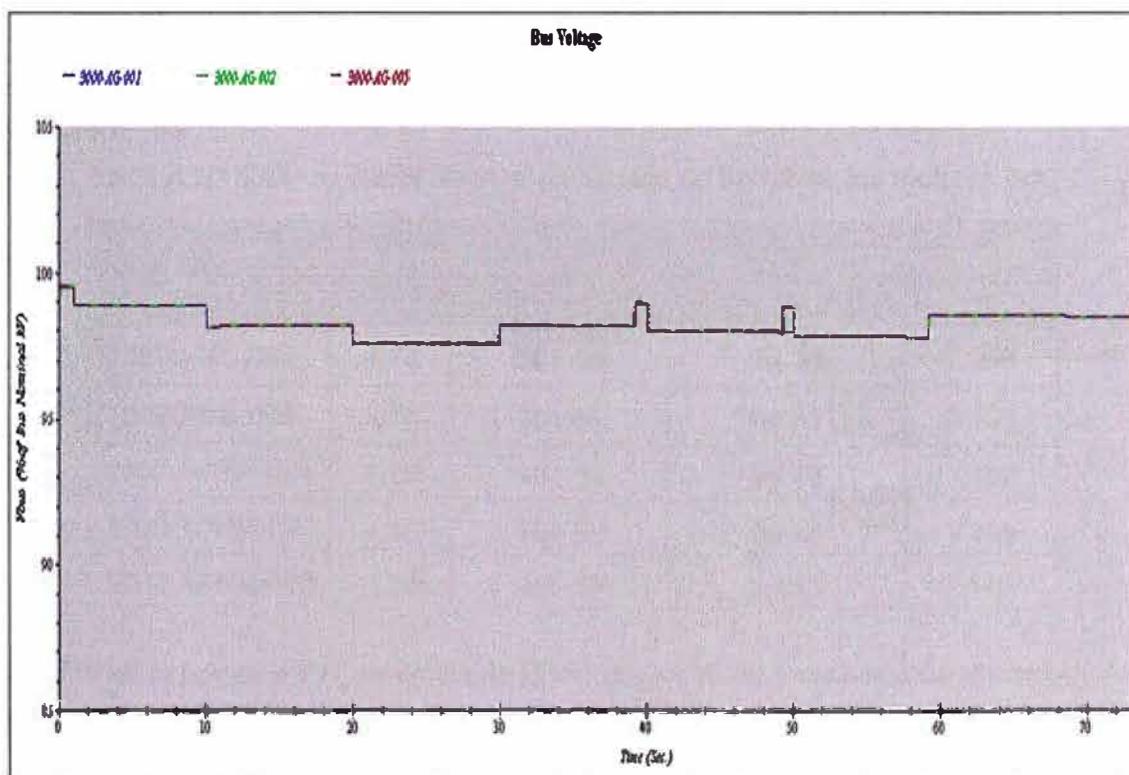


Fig. 5.8 Perfil de la tensión en % Vn

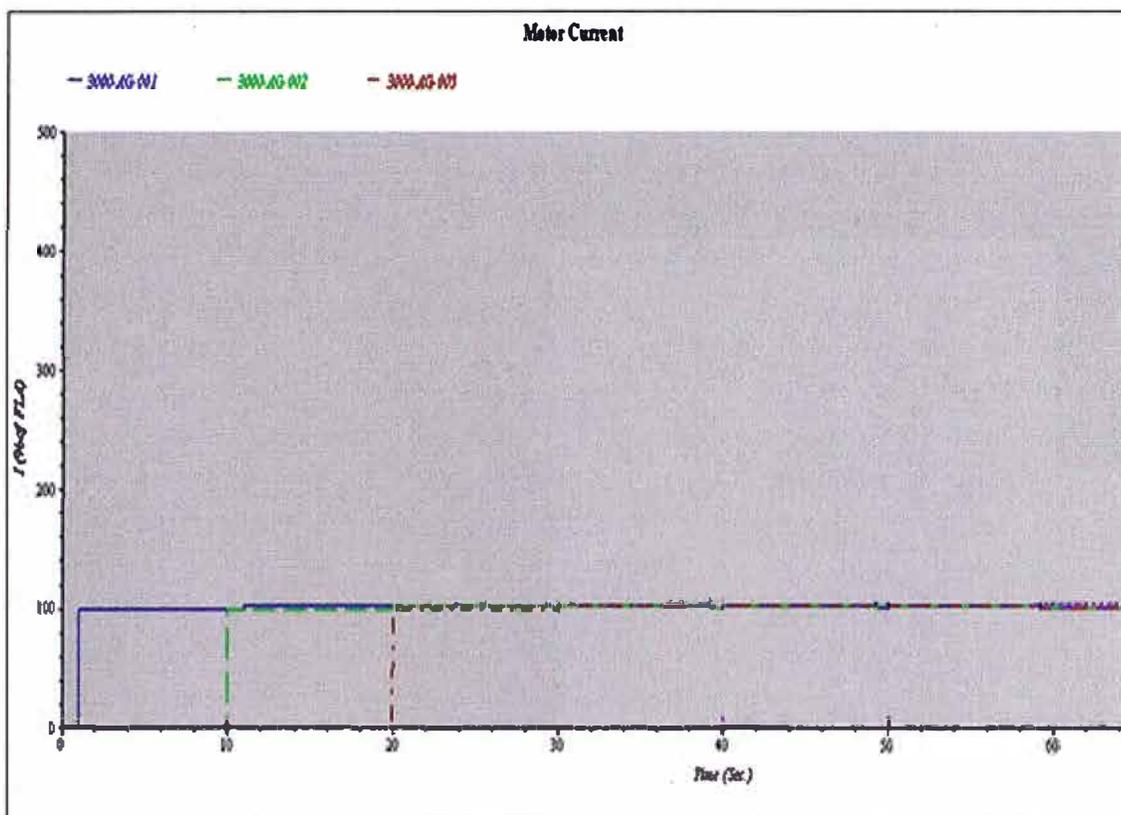


Fig. 5.9 Perfil de la corriente en % In

Los valores de tensión en barra 3000-ML-002 que alimenta al motor 3000-ML-002, en el instante de arranque $t=15$ segundos y la influencia en los otros motores y se muestran en la Tabla N° 5.6.

TABLA N° 5.6 Resultados de nivel de tensión en barras de los motores [s/n]

Código de equipo	Tensión nominal (kV)	Nivel de Tensión		
		Tensión (%) estado estable	Tensión (%) estado dinámico	Variación (%)
3000-ML-002	4.16	101.64	94.34	7.298
3000-SG-008	4.16	101.64	94.53	7.101
3000-TARM-001	4.16	101.59	94.48	7.104
3000-TARM-002	4.16	101.59	94.48	7.104
3000-TARM-003	4.16	101.53	94.42	7.109

El perfil de la potencia kW, variación de la tensión en % Vn y variación de la corriente en % In para el motor 3000-ML-002 se muestra en la Figura 5.10, Figura 5.11 y Figura 5.12.

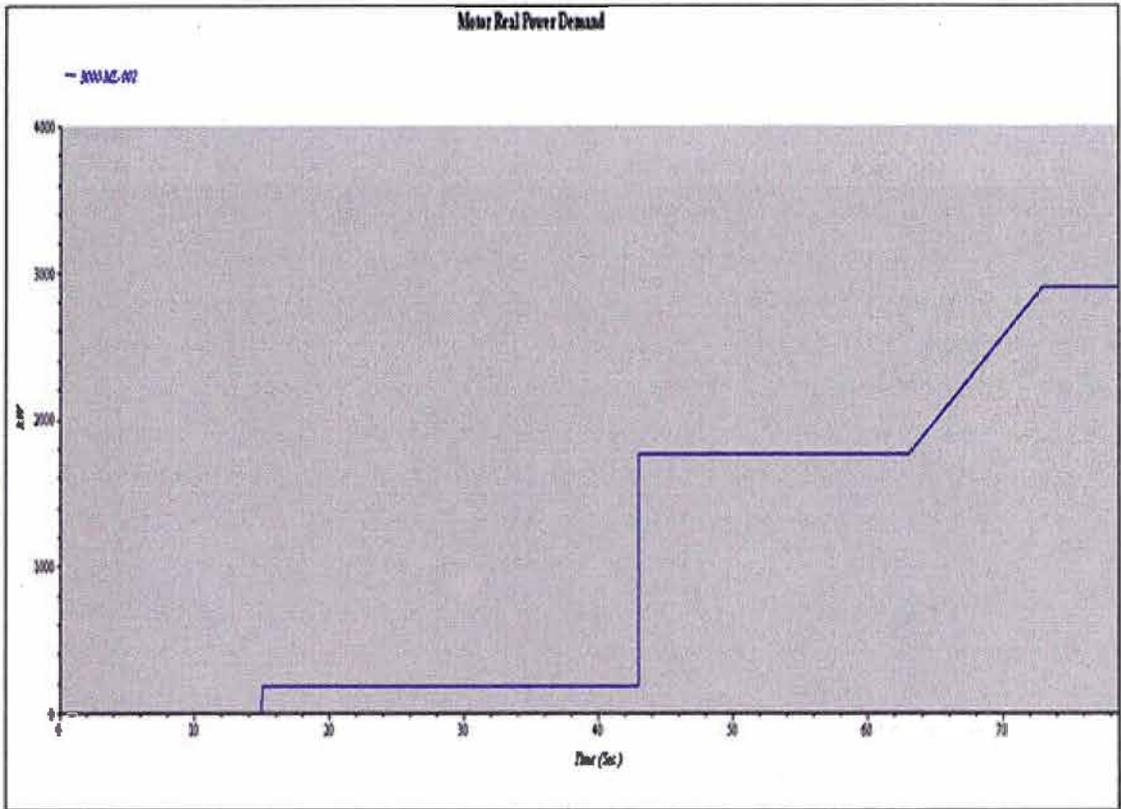


Fig. 5.10 Perfil de potencia en kW

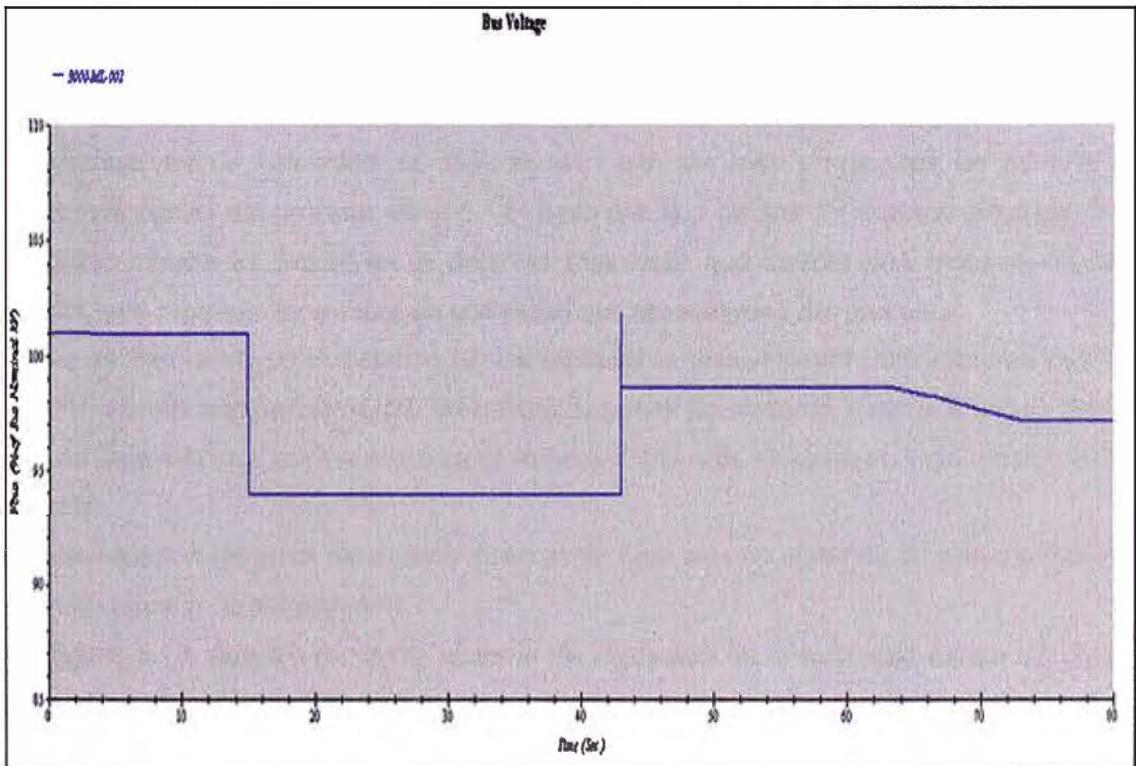


Fig. 5.11 Perfil de la tensión en % Vn

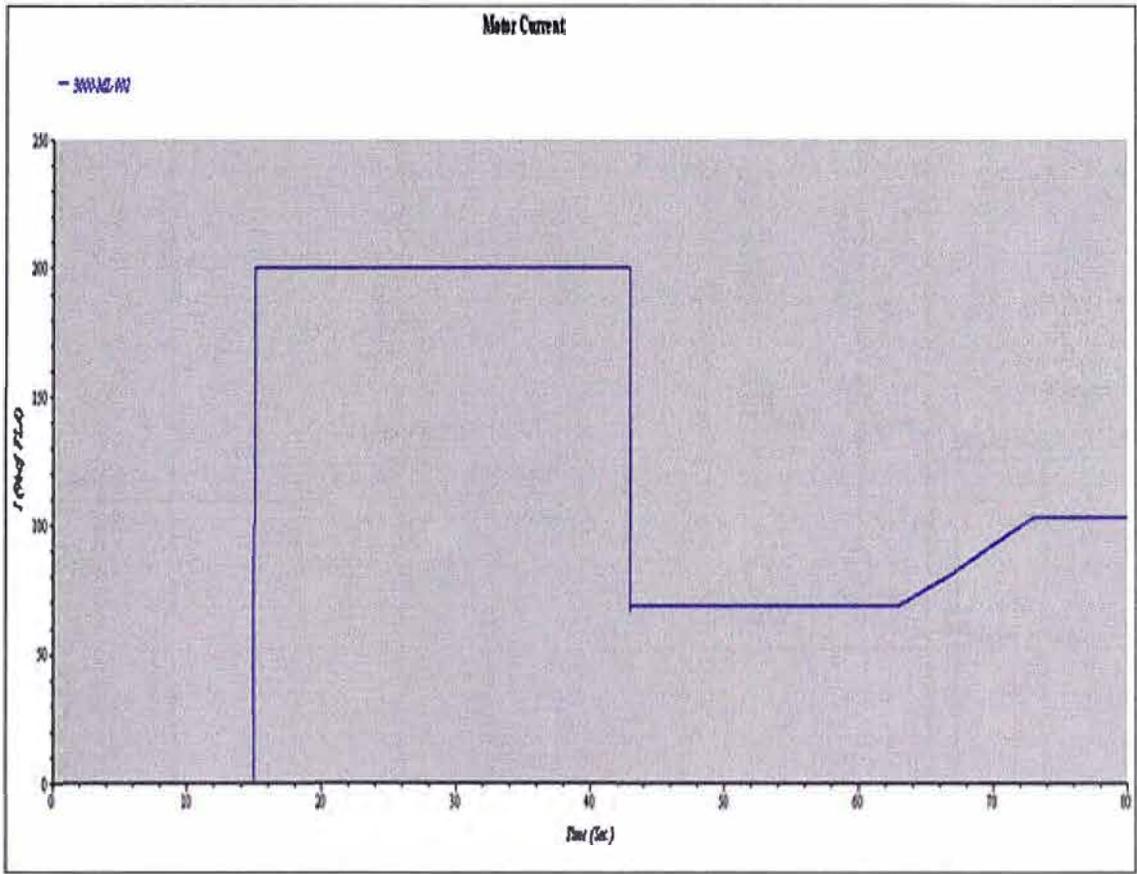


Fig. 5.12 Perfil de la corriente en % In

5.2.4 Área de análisis con variadores en baja tensión

Los variadores de velocidad en baja tensión son los más empleados en minería en diferentes partes del proceso minero. Un caso práctico dentro del sistema eléctrico de la sociedad minera El Brocal es el área de chancado que cuenta con motores en baja tensión que requiere variadores de velocidad por necesidades del proceso.

Como se mencionó en el capítulo III, los variadores de velocidad para motores de baja tensión vienen equipados dentro de un cetro control de motores y estos a la vez dentro de una sala eléctrica para nuestro caso viene a ser la sala eléctrica en baja tensión 2000-TD-004.

La alimentación eléctrica para estos motores de baja tensión viene de un sistema trifásico con una tensión de servicio 480 V.

La Figura 5.13 muestra parte del sistema de chancado de la sociedad minera El Brocal para el análisis del accionamiento de motores en baja tensión mediante variadores de velocidad.

La distancia de alimentación desde la sala eléctrica es menor a lo especificado en el capítulo III de este informe y no tiene filtro de armónico.

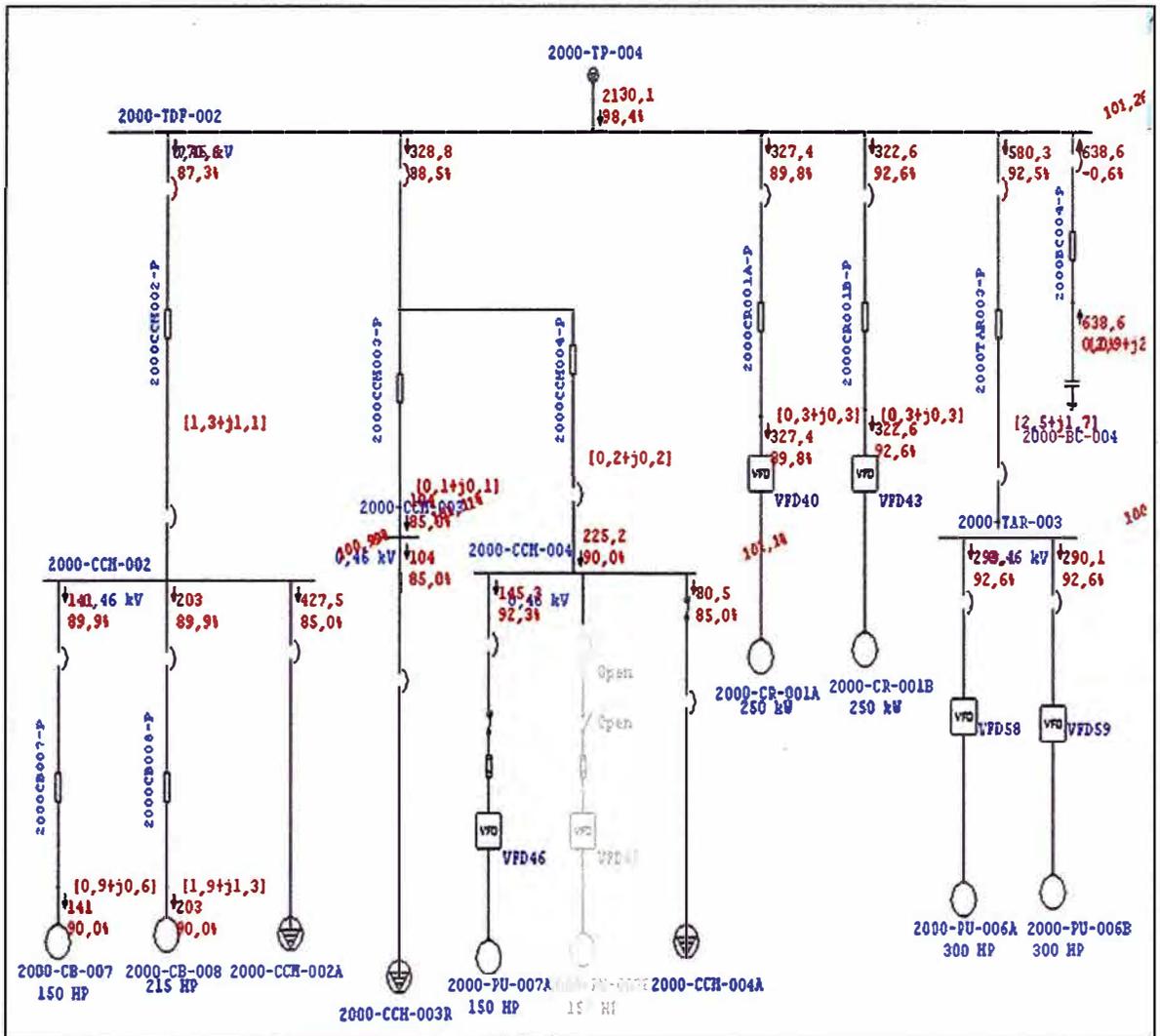


Fig. 5.14 Flujo de carga sistema de chancado de la sociedad minera El Brocal

Los valores de corriente resultado del flujo de carga para cada uno de los motores se muestran en la Tabla N° 5.8.

TABLA N° 5.8 Corriente estado estacionario para motores del sistema de chancado [s/n]

Descripción	Código motor	(kW)	(kV)	(A)	% PF
Triturador de rodillos Roller	2000-CR-001A	250	0,46	327,4	89,8
Triturador de rodillos Terciario	2000-CR-001B	250	0,46	322,6	92,6
Bomba de Pulpa	2000-PU-006A	223,8	0,46	290,1	92,6

Los valores de tensión en barra 2000-TDF-002 que alimenta a los motores 2000-CR-001A, 2000-CR-001B en el instante de arranque $t=1$ segundo y 2000-PU-006A en el instante de arranque $t=30$ segundos y se muestran en la Tabla N° 5.9.

TABLA N° 5.9 Resultados de nivel de tensión en barra [s/n]

Código de equipo	Tensión nominal (kV)	Nivel de Tensión		
		Tensión (%) estado estable	Tensión (%) estado dinámico	Variación (%)
2000-TDF-002	0.46	100.05	93.27	6.780

El perfil de la potencia kW, variación de la tensión en % Vn y variación de la corriente en % In para los motores 2000-CR-001A y 2000-CR-001B se muestra en la Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17.

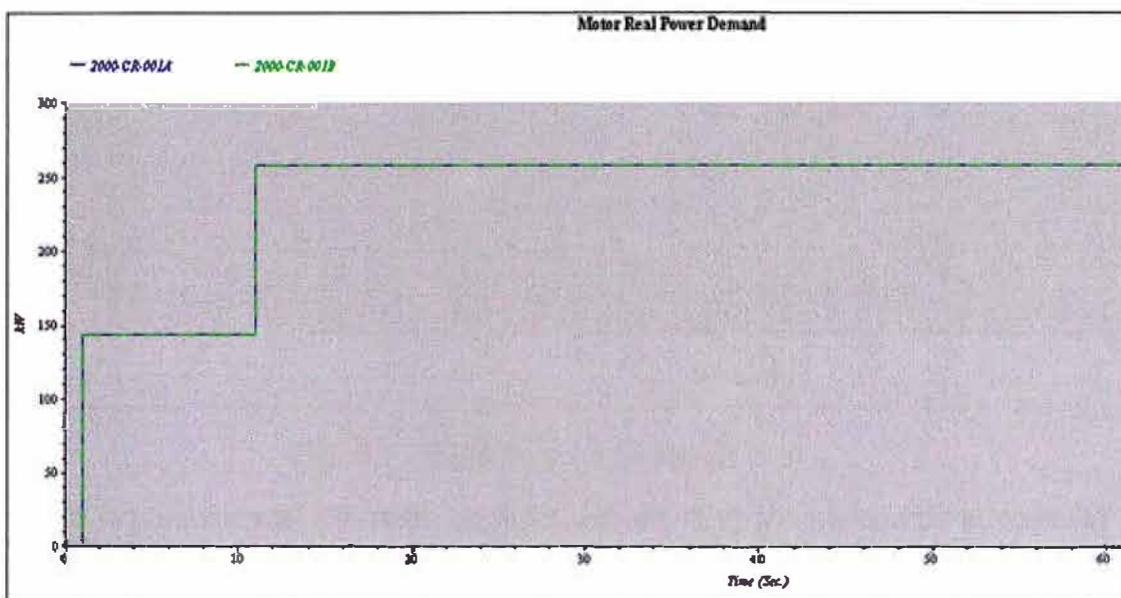


Fig. 5.15. Perfil de potencia en kW

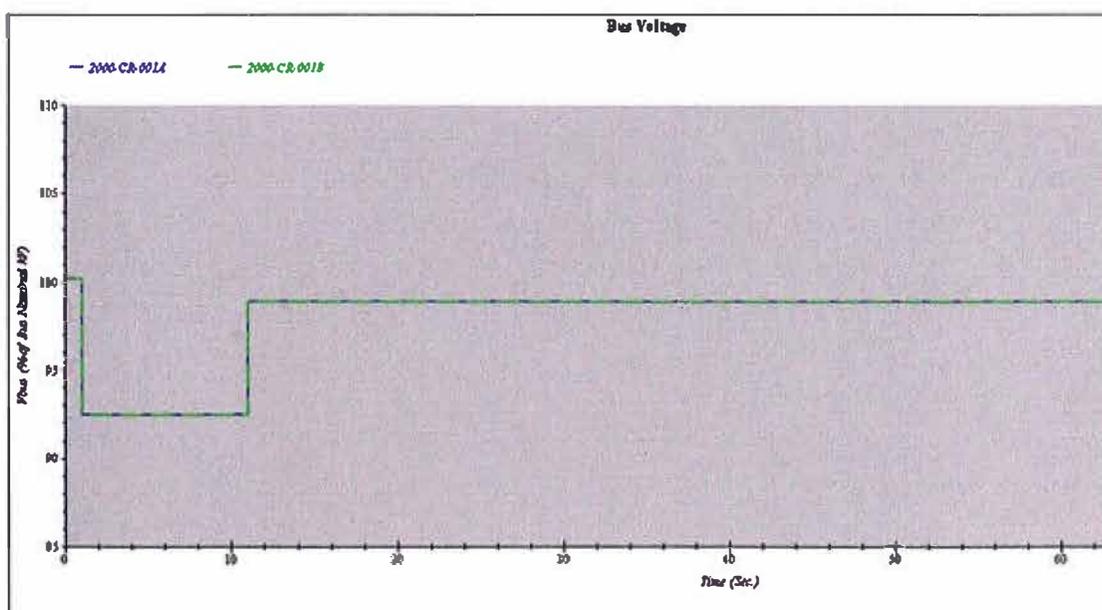


Fig. 5.16. Perfil de la tensión en % Vn

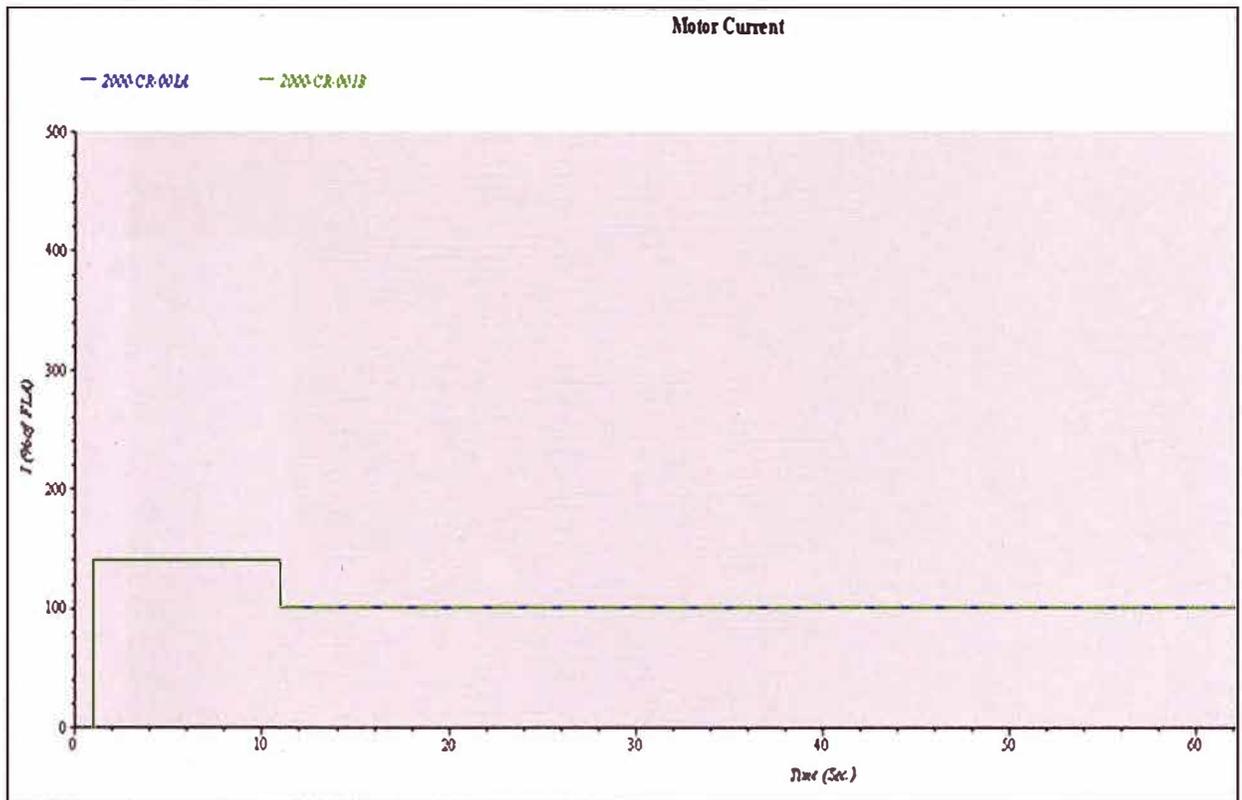


Fig. 5.17 Perfil de la corriente en % In

El perfil de la potencia kW, variación de la tensión en % Vn y variación de la corriente en % In para el motor 2000-PU-006A se muestra en la Figura 5.18, Figura 5.19 y Figura 5.20.

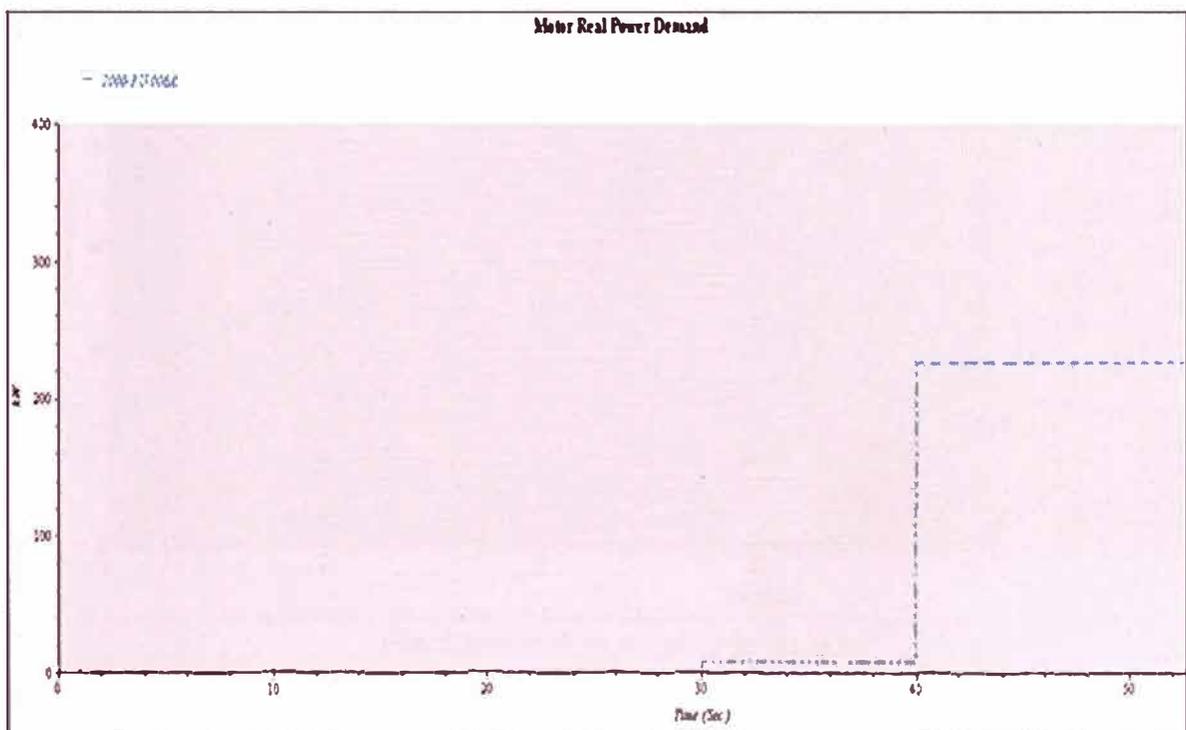


Fig. 5.18 Perfil de potencia en kW

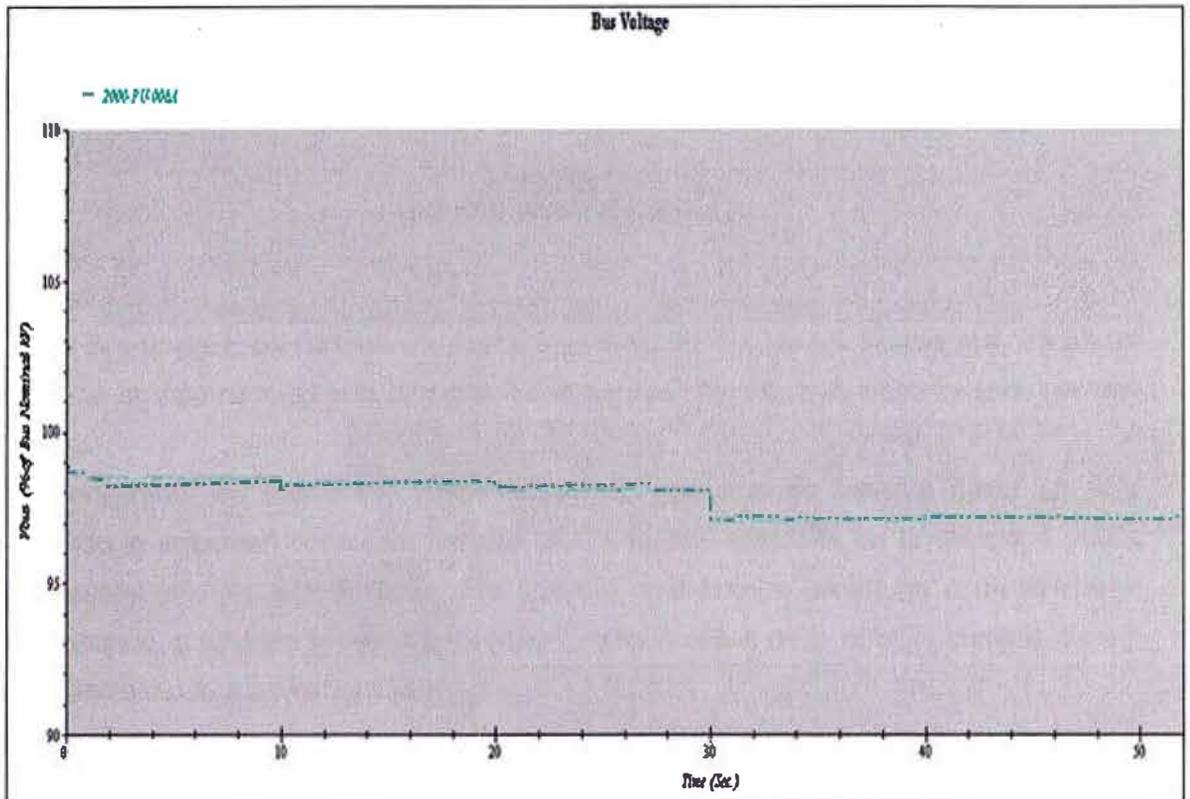


Fig. 5.19 Perfil de la tensión en % Vn

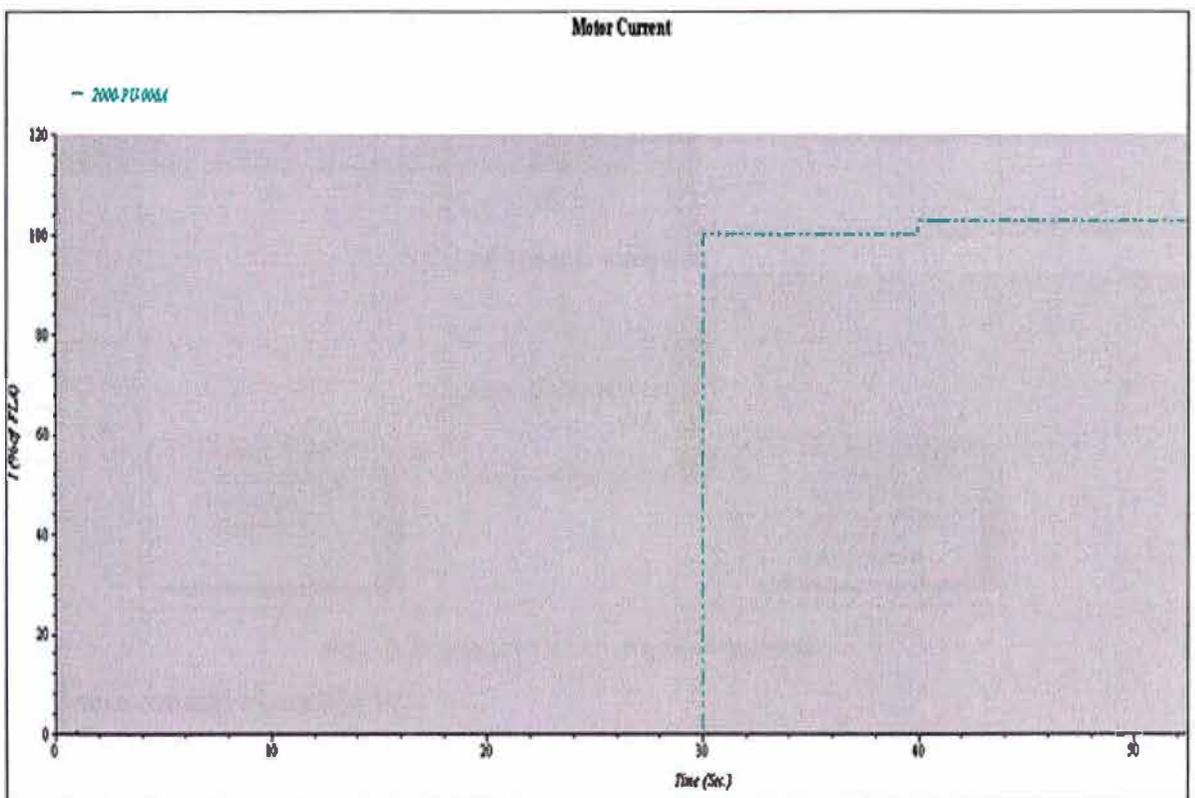


Fig. 5.20 Perfil de la corriente en % In

CAPÍTULO VI ANÁLISIS ECONÓMICO

Variar la velocidad en motores de corriente alterna es una de las formas más eficientes de darle un uso racional a la energía, las industrias mineras han incursionado en este campo.

Un convertidor de frecuencia puede reducir el consumo de energía hasta un 60% variando la velocidad del motor. Incluso una reducción pequeña en la velocidad puede representar ahorros significativos. Por ejemplo, una bomba centrífuga o un ventilador funcionando al 80% de la velocidad consume sólo la mitad de la energía comparado con otro funcionando a plena velocidad.

El ahorro esperado en un proceso se muestra en la Figura 6.1, donde se tienen tres puntos fundamentales:

- Consumo de energía
- Calidad del producto
- Mantenimiento

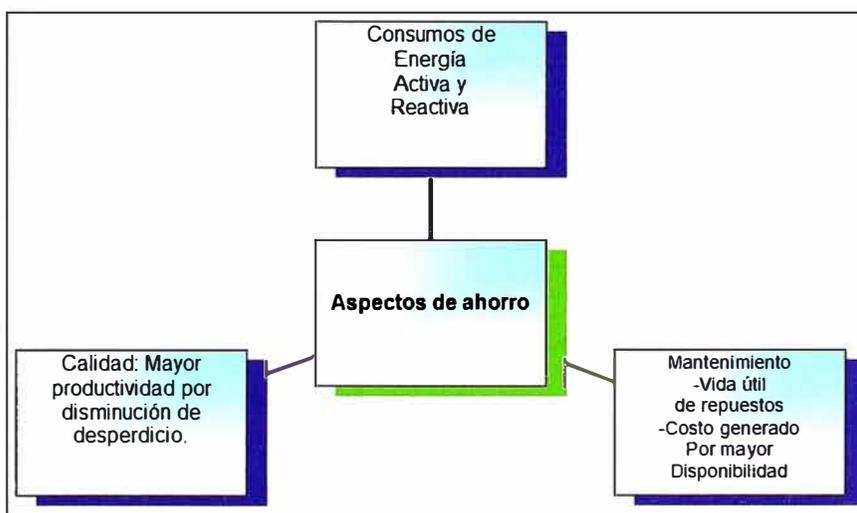


Fig. 6.1: Diagrama de ahorro esperado

6.1 Como rebajar el consumo

Una bomba centrífuga o un ventilador funcionando a media velocidad sólo consumen un octavo de la energía si se compara a su funcionamiento a plena velocidad. Esto es porque el par necesitado para una bomba o un ventilador guardan una relación

cuadrática con el volumen. Por ejemplo, reducir la velocidad de una bomba al 80% solamente requiere el 64% del par ($0.8 * 0.8$). Y esto no es todo: para producir el 64% del par sólo se requiere el 51% de la potencia ($0.64 * 0.8$), debido a que el requerimiento de potencia se reduce en el mismo sentido.

La explicación de todo esto radica en la diferencia de presión en el rodete. Cuando se produce una disminución de la presión, se requiere una disminución de la aceleración del aire o fluido a través del rodete. Es esta reducción simultánea de la aceleración y la presión lo que multiplica el ahorro energético [14].

Los convertidores de frecuencia ABB ajustan automáticamente la tensión correspondiente al valor de frecuencia para lograr una intensidad óptima de alimentación de bombas y ventiladores. Esto minimiza las pérdidas del motor y reduce el ruido del motor [14].

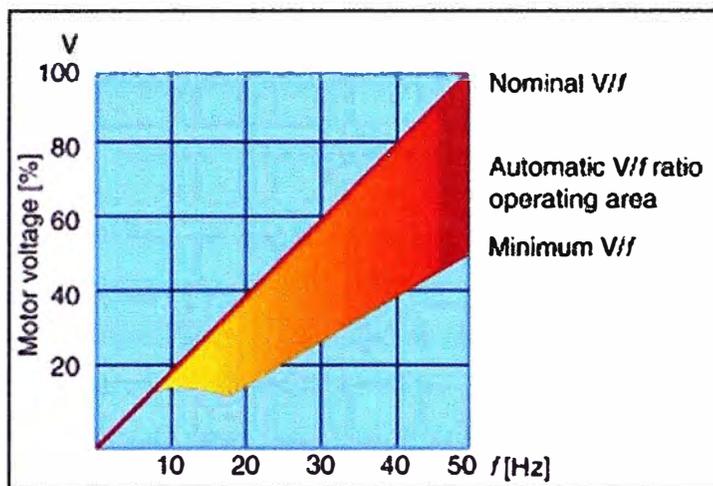


Fig. 6.2: Curva de bajo coste de funcionamiento [14]

6.2 Leyes de afinidad

Para la aplicación de variadores de frecuencia es necesario conocer las leyes de afinidad. Las ecuaciones utilizadas en bombas, ventiladores y compresores centrífugos es la siguiente [16]:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{n_1}{n_2} \right]^3 \quad (6.1)$$

Dónde:

P = Potencia de la bomba

n = Velocidad mecánica (rpm)

6.2 Análisis económico de empleo de variadores de velocidad en minera el brocal

A continuación analizaremos el ahorro de energía empleando variadores de velocidad en el área de molienda, chancado y flotación de la sociedad minera El Brocal.

Para el análisis consideraremos los motores listados en la Tabla N° 6.1 y Tabla N° 6.2.

TABLA N° 6.1 Motores en media tensión para el análisis económico [s/n]

Descripción	Área	Código motor	(kW)	(kV)	Accionamiento
Bomba de pulpa	Molienda	3000-PU-001A	522.2	4.16	Variador de velocidad media tensión
Bomba de pulpa	Molienda	3000-PU-003A	522.2	4.16	Variador de velocidad media tensión
Tanque acondicionador	Flotación	3000-AG-001	373	4.16	Variador de velocidad media tensión
Tanque acondicionador	Flotación	3000-AG-002	373	4.16	Variador de velocidad media tensión
Tanque acondicionador	Flotación	3000-AG-005	373	4.16	Variador de velocidad media tensión

TABLA N° 6.2 Motores en baja tensión para el análisis económico [s/n]

Descripción	Área	Código motor	(kW)	(kV)	Accionamiento
Triturador de rodillos Roller	Chancado	2000-CR-001A	250	0,46	Variador de velocidad baja tensión
Bomba de pulpa	Lavado	2000-PU-006A	223.8	0,46	Variador de velocidad baja tensión

Para el análisis económico se consideró las recomendaciones del documento de referencia [15], donde menciona que al emplear variadores de velocidad ABB en el accionamiento de bombas el ahorro de energía es alrededor del 20 al 50 %. Para nuestro caso se considerara un ahorro de energía de 30 %.

Para el análisis económico no se consideró el ahorro de energía por usar motores de alta eficiencia que corresponde desde 0 a 10 % de ahorro de energía [1].

La Tabla N° 6.3, muestra el cálculo económico del costo del ahorro al emplear variadores de velocidad en un tiempo de un año, se consideró eficiencia del motor 0.96 y el costo de energía se tomó como referencia los costos publicados en el documento de la referencia [17].

TABLA N° 6.3 Análisis económico con variador de velocidad [17]

Descripción	Potencia mecánica [kW]	Potencia eléctrica [kW]	Energía consumida al año [kWh]	Costo de energía kWh [\$]	Costo total de energía al año sin variador [\$]	Costo total de energía al año con variador [\$]	Ahorro al año con variador [\$]
Bomba de pulpa	522.20	543.96	4,699,800	0.06	263,912	184,738	79,174
Bomba de pulpa	522.20	543.96	4,699,800	0.06	263,912	184,738	79,174
Tanque acondicionador	373.00	388.54	3,357,000	0.06	188,508	131,956	56,553

Descripción	Potencia mecánica [kW]	Potencia eléctrica [kW]	Energía consumida al año [kWh]	Costo de energía kWh [\$]	Costo total de energía al año sin variador [\$]	Costo total de energía al año con variador [\$]	Ahorro al año con variador [\$]
Tanque acondicionador	373.00	388.54	3,357,000	0.06	188,508	131,956	56,553
Tanque acondicionador	373.00	388.54	3,357,000	0.06	188,508	131,956	56,553
Triturador de rodillos Roller	250	260.42	2,250,000	0.06	126,346	88,442	37,904
Bomba de pulpa	223.1	232.40	2,007,900	0.06	112,751	78,926	33,825
TOTAL							399,734

Los precios de los variadores de velocidad se tomaron del catálogo siemens [18].

La Tabla N° 6.4, muestra el cálculo del tiempo de retorno de inversión para los variadores de velocidad.

TABLA N° 6.4 Análisis económico con variador de velocidad [18]

Descripción	Potencia eléctrica [kW]	Ahorro al año con variador [\$]	Costo variador [\$]	Costo operación y mantenimiento [\$]	Tiempo de retorno de la inversión payback [años]
Bomba de pulpa	543.96	79,174	150,000	7,500	2.5
Bomba de pulpa	543.96	79,174	150,000	7,500	2.5
Tanque acondicionador	388.54	56,553	105,000	5,250	2.3
Tanque acondicionador	388.54	56,553	105,000	5,250	2.3
Tanque acondicionador	388.54	56,553	105,000	5,250	2.3
Triturador de rodillos Roller	260.42	37,904	68,000	3,400	2.4
Bomba de pulpa	232.4	33,825	60,000	3,000	2.2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se identificó los variadores de velocidad para motores de media y baja tensión.
2. Se determinó que el método más eficaz para controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador de velocidad.
3. Se logró describir las etapas de funcionamiento de los variadores de velocidad para motores de baja y media tensión.
4. Se verificó que con el empleo de variadores de velocidad para el accionamiento de motores de inducción la corriente de arranque disminuye a valores aceptables (aproximados $1,3 I_n$).
5. El ejemplo de accionamiento para motores de baja y media tensión mediante variadores de velocidad para la sociedad minera El Brocal se mostró que en el proceso minero es importante el empleo de variadores de velocidad.
6. El análisis económico demuestra que los variadores de velocidad son una solución rentable para los procesos de la industria moderna, resaltando que el tiempo de retorno de la inversión es aproximadamente 2.5 años.
7. Es importante el empleo de variadores de velocidad para no superar la potencia instalada de la planta minera, evitar multas a OSINERMINING y el ahorro energético.

Recomendaciones

1. Es importante la implementación de filtros de armónicos para mitigar los armónicos generados por los variadores de velocidad para cumplir los límites permisibles mencionados en la norma IEC 519.
2. Se recomienda el empleo de variadores de velocidad en norma ANSI, por su robustez, confiabilidad y garantía en el proceso,

ANEXOS

ANEXO A
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE CARGAS DE LOS MOTORES

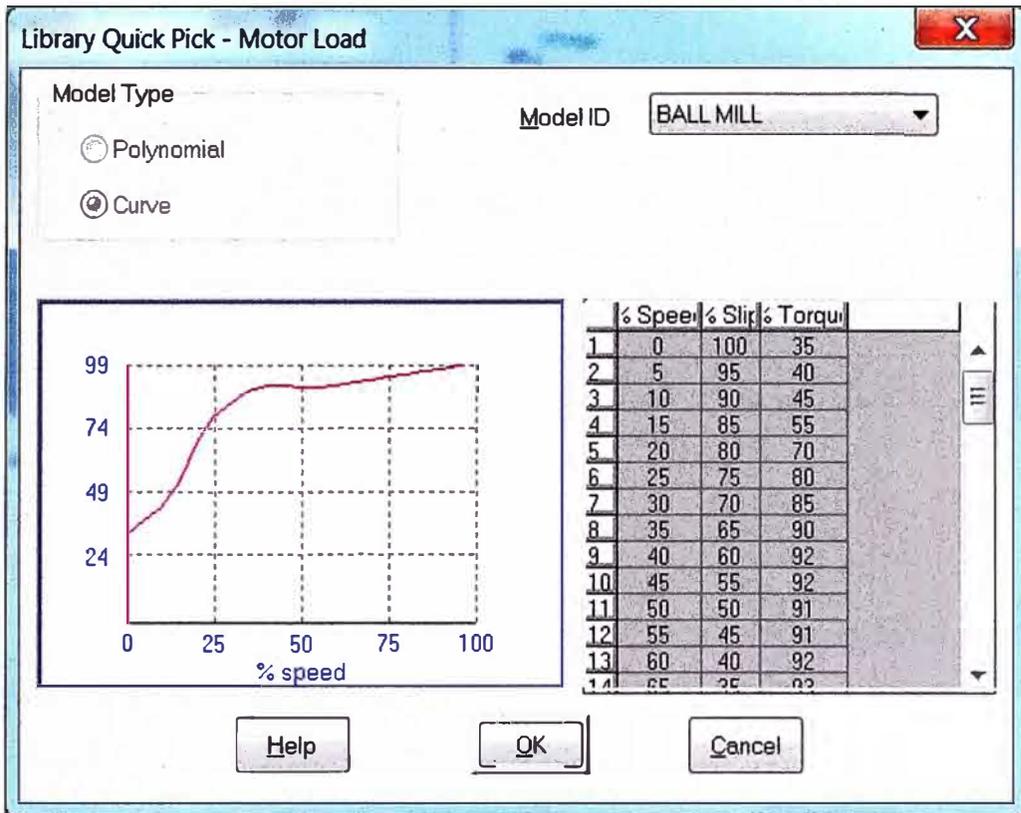


Fig. A.1: Curva característica de carga – Molino de Bolas

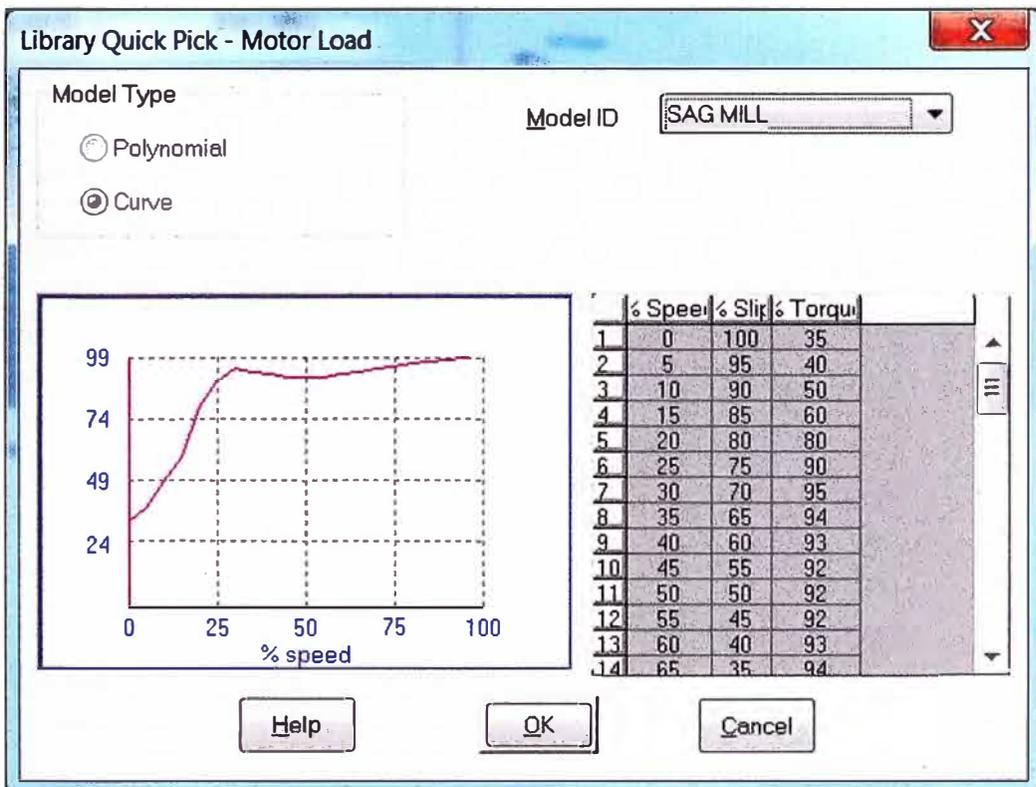


Fig. A.2: Curva característica de carga – Molino SAG

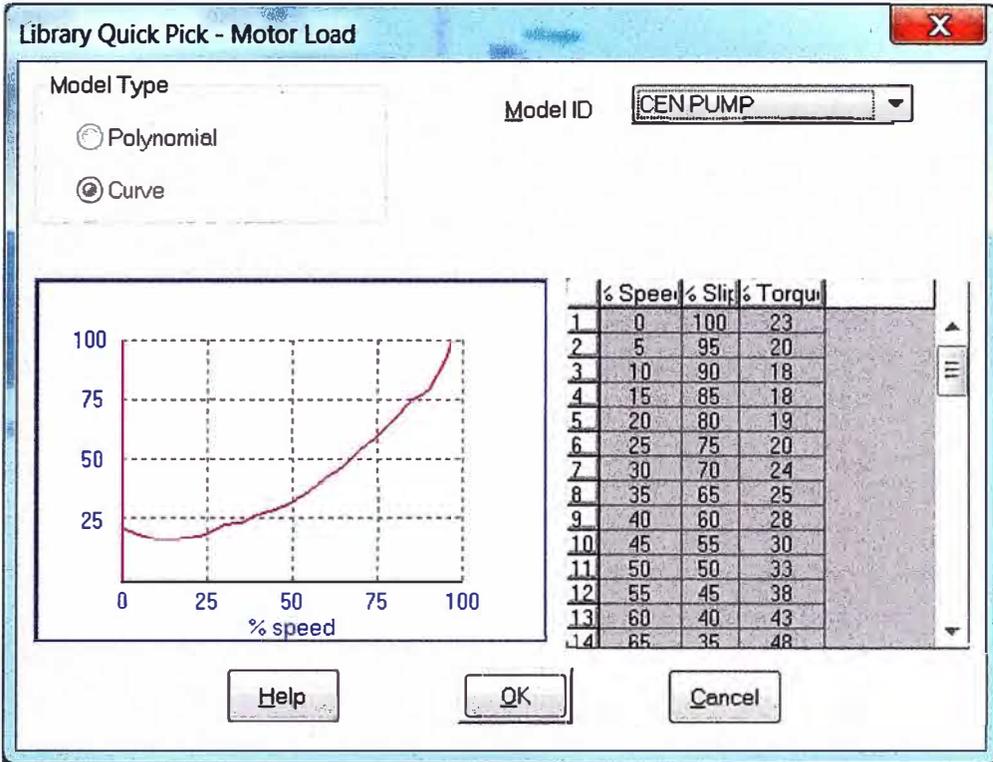


Fig. A.3: Curva característica de carga – Bomba Centrífuga

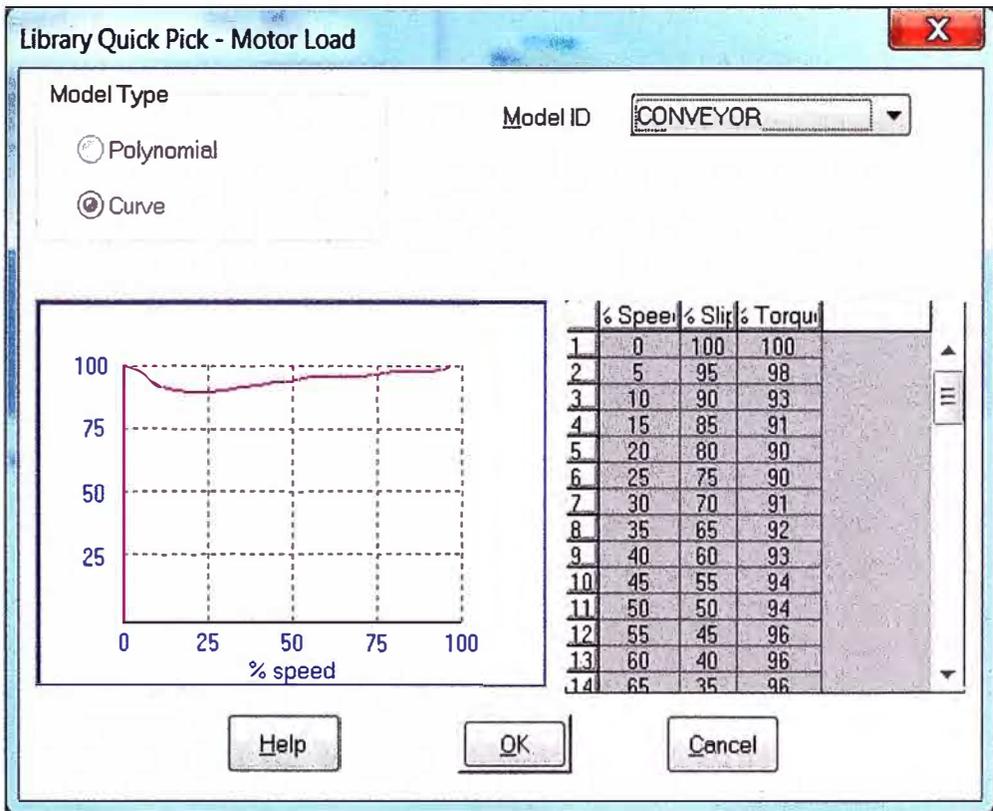


Fig. A.4: Curva característica de carga – Chancadora primaria

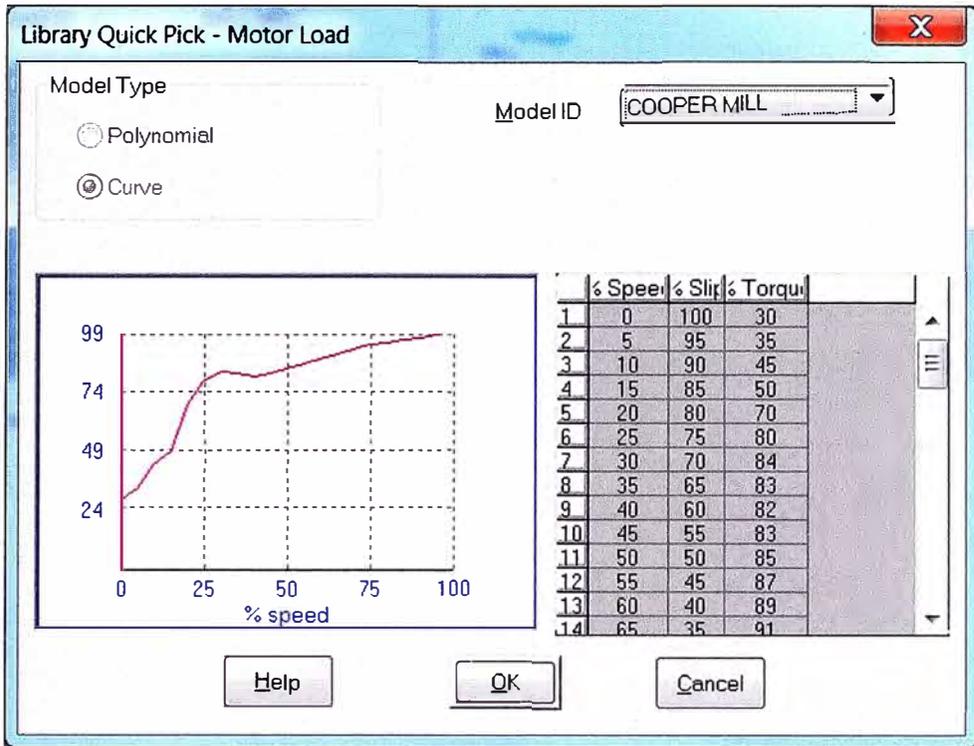


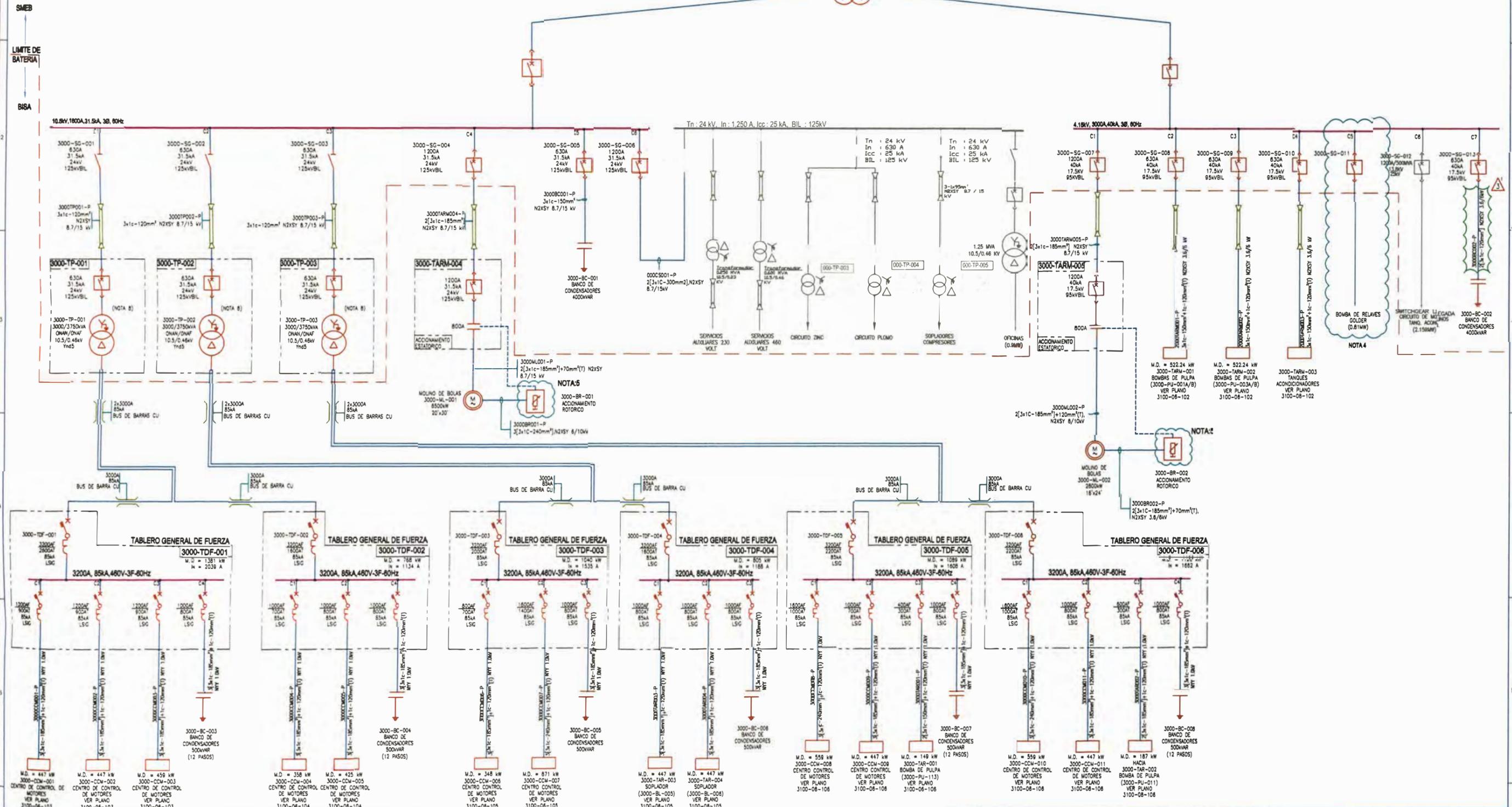
Fig. A.5: Curva característica de carga – Remolienda

ANEXO B
DIAGRAMA UNIFILAR DEL ÁREA DE MOLIENDA, CHANCADO Y FLOTACIÓN

Fig. B.1: Diagrama unifilar general área molienda y flotación

VIENE DE LA SUBESTACION HUARACACA
VER PLANO: 0100-06-101

TRANSFORMADOR
DE POTENCIA
30/18/12 MVA
36/22/14 MVA
22.9/10.5/4.16KV



- EN EL PRESENTE PLANO TODO LO DE COLOR GRIS ES EXISTENTE
- LOS EQUIPOS TALES COMO TABLEROS, CENTRO CONTROL DE MOTORES, TRANSFORMADORES Y DEMAS DEBEN SER IDENTIFICADOS PARA OPERAR A 4300 m.s.n.m.
- DISEÑADO POR OTROS (GOLDER)
- EQUIPO SUMINISTRADO POR EL VENDEDOR DEL MOLINO
- PARA LA COMUNICACION DE RELES DE PROTECCION CONSIDERAR EL ESTANDAR IEC60801, SEGUN LO COORDINADO CON SMEB
- LOS VTD CUMPLIRAN CON LA NORMA IEEE 519
- GRUPO DE CONEXION INDICADO POR SMEB

PLANO N°	PLANOS DE REFERENCIA	N° REV.	FECHA	REVISIONES	POR REV.	APR. CLIENTE

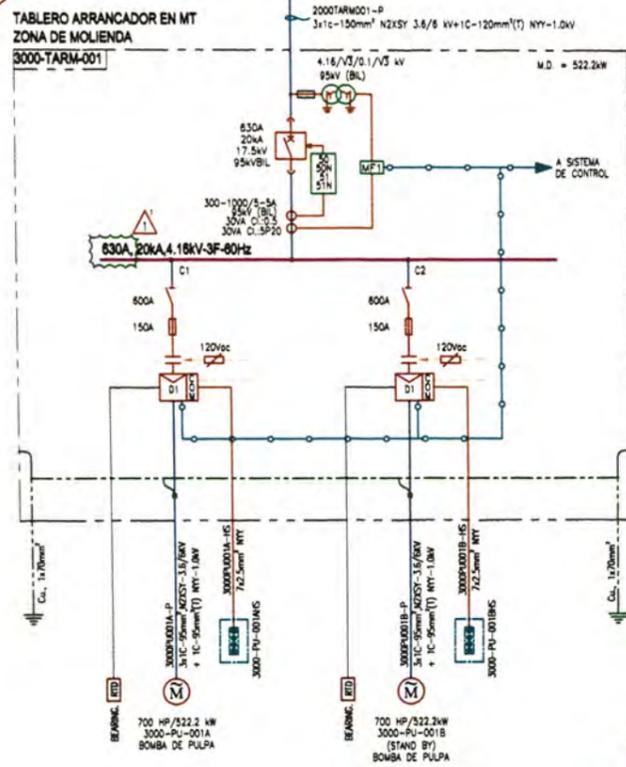
APROBACION	FECHA	FIRMAS	NOMBRES	FECHA	FIRMAS

INGENIERIA PARA AMPLIACION
DE OPERACIONES A 1800 TPD

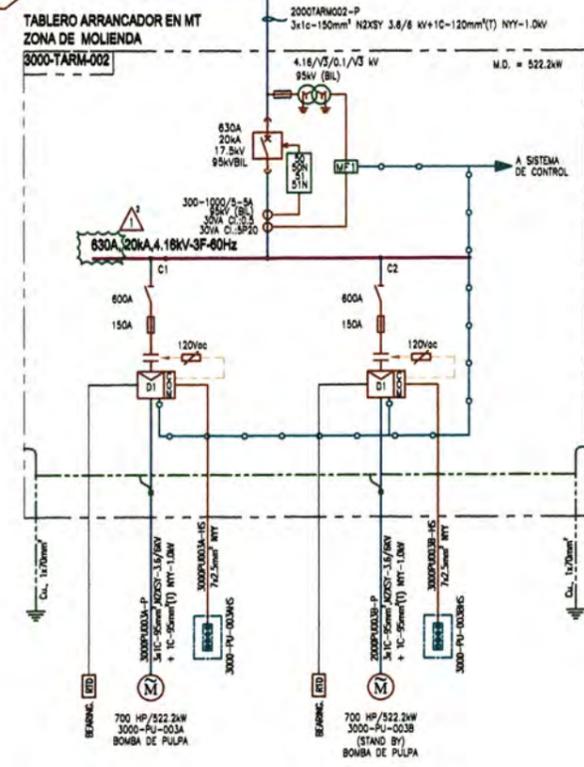
INGENIERIA DE DETALLE
PLANTA DE MOLENDA Y FLOTACION
DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL

Fig. B.2: Diagrama unifilar arrancadores área molienda y flotación

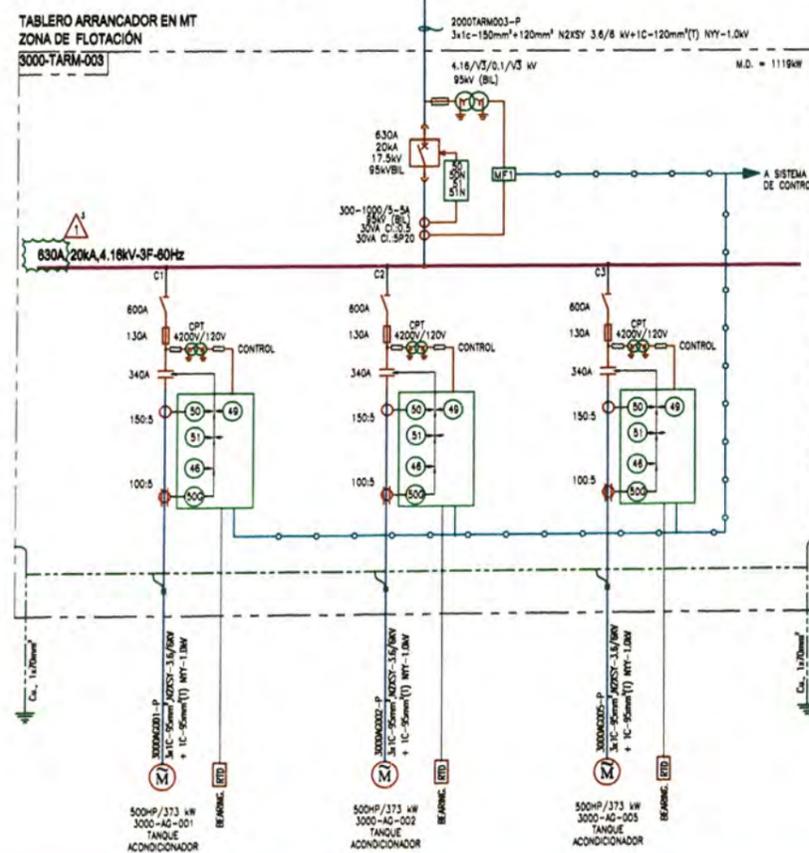
VIENE DE LA CELDA DE MT (3000-SG-008), C2
VER PLANO: 3100-06-101



VIENE DE LA CELDA DE MT (3000-SG-009), C3
VER PLANO: 3100-06-101



VIENE DE LA CELDA DE MT (3000-SG-010), C4
VER PLANO: 3100-06-101



1. LOS EQUIPOS TALES COMO TABLEROS, CENTRO CONTROL, DE MOTORES, TRANSFORMADORES Y DOMAS DEBEN SER DIMENSIONADOS PARA OPERAR A 4300 m.s.n.m.

ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA ES INFORMATIVO. SU USO SIN PREVIA AUTORIZACION ESTA PROHIBIDA. CUALQUIER MODIFICACION O ADAPTACION DE LOS DATOS EN EL PLANO SERA RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DEL USUARIO SIN NINGUNA RESPONSABILIDAD LEGAL DE BISA.

APROBACION			FECHA			FIRMAS		
CLIENTE								
GTE. ING.								
GTE. PROY.								
NOMBRES			FECHA			FIRMAS		
DISEÑADO POR:								
DIBUJADO POR:								
REVISADO POR:								
APROBADO POR:								
GTE. ING.								
COD.PROY.	PLANO N.º	3100-06-102				ESC:		

INGENIERIA PARA AMPLIACION DE OPERACIONES A 1800 TPD	
INGENIERIA DE DETALLE	
PLANTA DE MOliENDA Y FLOTACION	
DIAGRAMA UNIFILAR - ARRANCADORES EN M.T.(4.16kV)	
COD.PROY.CLIENTE	PLANO CLIENTE N.º
	REV. 0

NOTAS

PLANO N.º

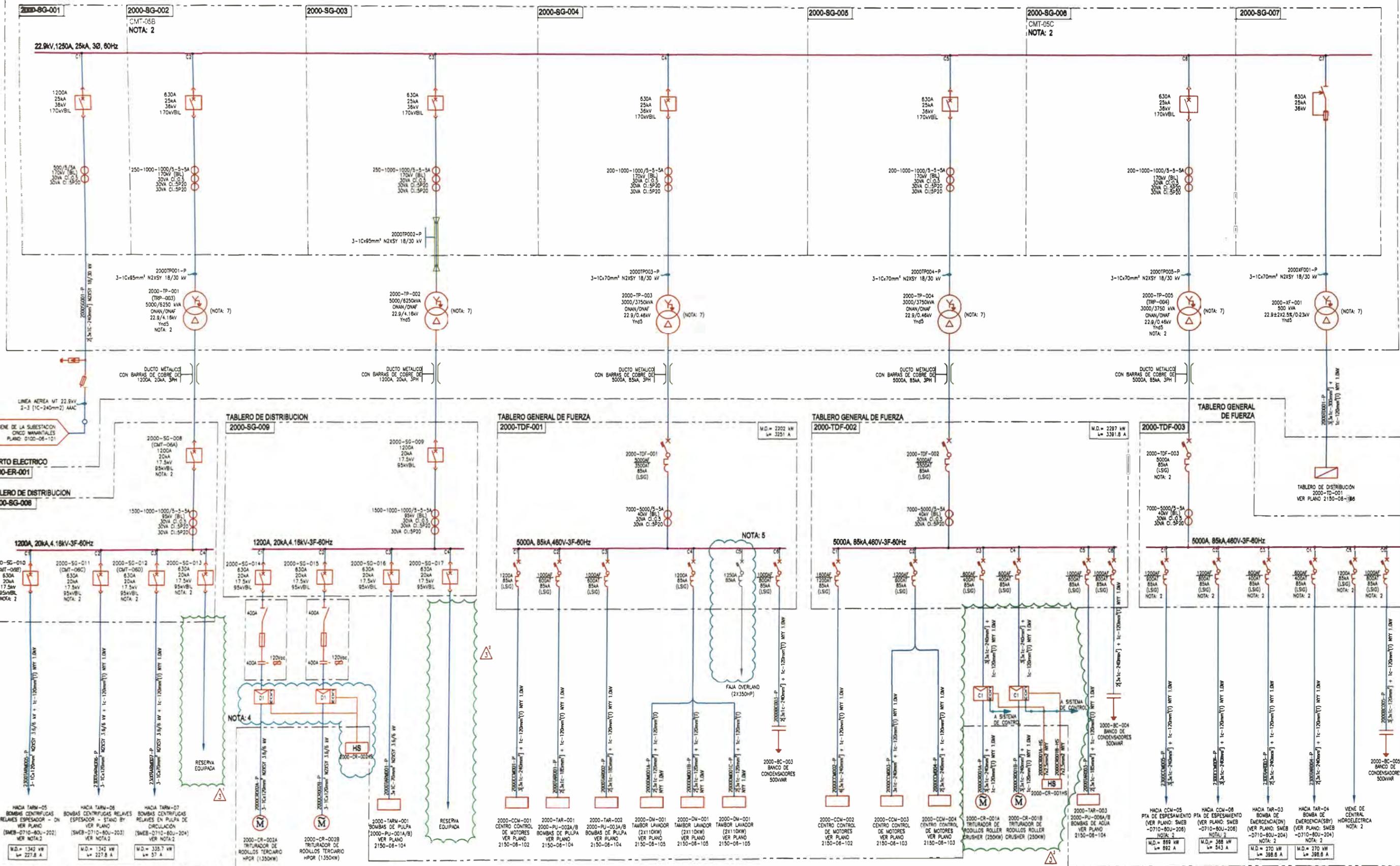
PLANOS DE REFERENCIA

N.º REV. FECHA

REVISIONES

POR REV. APR. CLIENTE

Fig. B.3: Diagrama unifilar general área chancado



- PARA LA COORDINACION DE RELES DE PROTECCION CONSIDERAR EL ESTANDAR IEC1850, SEGUN LO COORDINADO CON SMEB
- EN EL PRESENTE PLANO UNIFILAR SE ESTA INTEGRANDO LA INGENIERIA DE COLDER CON LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE
- PARA LA INTEGRACION SE TOMO EN CUENTA LOS PLANOS UNIFILARES DE LA INGENIERIA DE COLDER (SMEB-0710-800-200/201)
- EL INGENIERO Y EL TABLERO DE CONTROL Y MANDO SERA SUMINISTRADO POR EL PROVEEDOR DEL HPOR. PARA EL CONOCIMIENTO DEL TABLERO DE CONTROL Y MANDO VER PLANOS VENDOR.
- SE ESTA ESTIMANDO RESERVA NO EQUIPADA PARA LOS MOTORES DE LA FAJA OVERLAND. EL EQUIPAMIENTO SERA SUMINISTRADO POR OTROS (STHM).
- LOS EQUIPOS TALES COMO TABLEROS, CENTRO CONTROL DE MOTORES, TRANSFORMADORES Y DEMAS DEBEN SER IDENTIFICADOS PARA OPERAR A 430 m.a.s.n.m.
- EL GRUPO DE CONSERVACION DE LOS TRANSFORMADORES, ES REQUERIMIENTO DEL CLIENTE SEGUN LO COORDINADO CON SMEB

NOTAS

PLANO N°

PLANOS DE REFERENCIA

N° REV. FECHA

REVISIONES

POR REV. APR. CLIENT.

ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA ES INFORMATIVO, SU USO SIN PREVIA AUTORIZACION ESTA PROHIBIDA. CUALQUIER MODIFICACION O ADAPTACION DE LOS DATOS EN EL PLANO SERA RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DEL USUARIO SIN NINGUNA RESPONSABILIDAD LEGAL DE BISA.

APROBACION	FECHA	FIRMAS	NOMBRES	FECHA	FIRMAS
CLIENTE:			DISERADO POR:		
OTE. ING.:			REVISADO POR:		
OTE. PROY.:			APROBADO POR:		
			OTE. ING.:		

COD.PROY. PLANO N° 2150-06-101

INGENIERIA PARA AMPLIACION DE OPERACIONES A 1800 TPD

INGENIERIA DE DETALLE

PLANTA DE CHANCAO SECUNDARIO, TERCARIO Y PLANTA DE LAVADO

DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL

COD.PROY.CLIENTE PLANO CLIENTE N°

REV. 0

APROBACION	FECHA	FIRMAS	NOMBRES	FECHA	FIRMAS
CLIENTE:			DISERADO POR:		
OTE. ING.:			REVISADO POR:		
OTE. PROY.:			APROBADO POR:		
			OTE. ING.:		

COD.PROY. PLANO N° 2150-06-101

Fig. B.4: Diagrama unifilar bombas de pulpa área chancado

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABB, “Motores de media y baja tensión para la industria” edición 2008
- [2] ABB, “Guía técnica N° 4 – Guía de accionamientos de velocidad variable”, edición 2013
- [3] EATON, “Arranque y control de motores trifásicos síncronos”, edición 2012.
- [4] D.P. Kothari & I.J. Nagrath, “Sistemas Eléctricos de Potencia”, tercera edición México: McGraw-Hill Interamericana. 2008
- [5] ABB, “Catálogo de variador de media tensión ACS 1000, ACS 1000I, 315 kW – 5 MVA, 2,3 – 4,16 kV”, edición 2013
- [6] EATON, “Variador de frecuencia ajustable para la industria – Ampgard SC 9000 MV”, edición 2013.
- [7] <http://www.slideshare.net/dante1665/teoria-completa-de-variadores>
- [8] http://www.fglongatt.org/Archivos/Archivos/SP_I/Capitulo6,SP1-2007.pdf
- [9] <http://www.mty.itesm.mx/dcic/deptos/ie/profesores/sacevedo/articulos/torreon98.pdf>
- [10] http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/7000I-um300_-es-p.pdf
- [11] Rockwell - PF7000, B Frame, ForGe Control_User Manual, edición 2013
- [12] ABB, “Manuel de variadores de velocidad para baja tensión”, edición 2010
- [13] http://www.ingenieros.es/files/proyectos/Variadores_de_frecuencia.pdf
- [14] <http://www.abb.com/product/ap/seitp322/b9d1f8fa7327e57f4425776100392f06.aspx>
- [15] [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/98bd6bb8e5eab29ac1257881002d11f0/\\$file/abb_drives_and_motors_energy_efficiency_es_reva.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/98bd6bb8e5eab29ac1257881002d11f0/$file/abb_drives_and_motors_energy_efficiency_es_reva.pdf)
- [16] ABB, Eficiencia Energética Drives&Motors
- [17] <http://www2.osinerg.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegosTarifariosUsuarioFinal.aspx?Id=150000>
- [18] <https://www.industry.siemens.com/home/aan/es/bolivia/Documents/LP%20Digital%20Bolivia%20Abril%202012%20.pdf>