



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

Tema: Estudio para la implementación de variadores de velocidad en accionamientos de bombeo del área de Contactos de la planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Autor: Jorge Hairon Figueredo Mauri

Tutores: Dr. Luis Delfín Rojas Purón

Msc. Wilber Acuña Rodríguez

Ing. Nersy Fonseca Almira

Grupo Desarrollo Taller Eléctrico

Empresa Cmdte.ECG. Moa.

Curso: 2010 - 2011

“Año 53 de la Revolución”



AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a toda mi familia, a mis suegros Elcidia y Magdaleno, a mi cuñada Glenda, por su confianza e incondicional apoyo.

A Jesús Antonio Blanco Moreno, quien significa para mí mucho más que un amigo.

A Danilo Charchabal, por brindarme su desinteresada amistad.

A mis tutores, por sus oportunas orientaciones y recomendaciones.

Agradezco a aquellos que sin ser parte del claustro de profesores, en su momento, jugaron un papel importantísimo en mi formación como estudiante y como persona, en especial:

A Yolanda y toda el área de Inversiones, economía, la vicerrectoría de aseguramientos, a Inalbis, a Irene, a Bernardo.

A mis profesores, por formar parte de mi preparación para el trabajo y para la vida.

A mis hermanos del aula, que siempre estuvieron ahí, en las buenas y las malas.

A mis amigos, por compartir juntos gratos momentos, en especial a Yudel.

A todos los que me dedicaron su tiempo y apoyo hasta la completa realización del trabajo.

A todos: muchísimas GRACIAS



DEDICATORIA

Este trabajo de diploma está dedicado en primer lugar,

A la memoria de mi queridísimo abuelo Emilio Rafael Mauri Hernández,

Que confió en mí, me aconsejó siempre y me transmitió toda su sabiduría para transitar por el duro camino de la vida.

A mis insustituibles madre y hermano,

Que han estado a mi lado en los más difíciles momentos y sus regaños han hecho de mí una mejor persona.

A Magda Eliza Guilarte Matos,

Por su madurez, su inagotable amor y apoyo incondicional desde el día en que la conocí.



PENSAMIENTO

“La teoría que resulte dará indefectiblemente preeminencia a los 2 pilares de la construcción: la formación del hombre nuevo y el desarrollo de la técnica. En ambos aspectos nos falta mucho por hacer, pero es menos excusable el atraso en cuanto a la concepción de la técnica como base fundamental, ya que aquí no se trata de avanzar a ciegas sino de seguir durante un buen tramo el camino abierto por los países más adelantados del mundo. Por ello Fidel machaca con tanta insistencia sobre la necesidad de la formación tecnológica y científica de todo nuestro pueblo y, más aún, de su vanguardia”

Ernesto Che Guevara

El socialismo y el hombre en Cuba. 1998



Resumen

La eficiencia energética constituye hoy día una prioridad para el desarrollo de la industria, sobre todo, cuando se requiere una óptima explotación de un determinado equipo o área. Este trabajo se ha realizado con el objetivo de lograr un mayor aprovechamiento de los motores asíncronos instalados en el área de los Tanques de Contacto de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Se fundamenta en la realización de un análisis para demostrar la factibilidad de la implementación de variadores de velocidad en los accionamientos de bombas centrífugas instalados en el área. El mismo se divide en tres capítulos en los que se evalúa, fundamentalmente las condiciones del área, así como su función dentro de la planta, se describe brevemente el estado técnico del funcionamiento actual, se evalúa la efectividad del sistema de supervisión del nivel de los tanques de contactos. Se hace una pequeña propuesta para el control de la velocidad de la bomba. Se evalúan las características fundamentales de los variadores de velocidad, así como su principio de funcionamiento, las funciones de cada una de sus partes o etapas y finalmente se realiza un análisis de los resultados luego de la instalación de los mismos.



Summary

The energy efficiency constitutes a priority nowadays for the development of the industry, mainly, when it is required a good exploitation of a certain team or area. This work has been carried out with the objective of achieving a bigger use of the asynchronous motors installed in the area of the Tanks of Contact of the Company Major Ernesto Che Guevara and to fulfill this last one, it is based in the realization of an analysis to demonstrate the feasibility of the implementation of variadores of speed in the workings of centrifugal pumps installed in the area. The same one is divided fundamentally in three chapters in those that is evaluated, the conditions of the area, as well as its function inside the plant, is described the technical state of the current operation shortly, the effectiveness of the system of supervision of the level of the tanks of contacts is evaluated. A small proposal is made for the control of the speed of the bomb. The fundamental characteristics of the variadores of speed like their operation principle are evaluated, the functions of each one on their behalves or stages and finally he/she is carried out an analysis of the results after the installation of the same ones.



ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Portada..... | 1 |
| Agradecimientos..... | 2 |
| Dedicatoria..... | 3 |
| Pensamiento..... | 4 |
| Resumen en español..... | 5 |
| Resumen en Inglés..... | 6 |
| Índice..... | 7 |
| Introducción General..... | 9 |
| Situación problemática..... | 10 |
| Problema..... | 10 |
| Hipótesis..... | 10 |
| Objetivo..... | 10 |
| Objetivos específicos..... | 10 |
| Objeto de estudio..... | 11 |
| Campo de acción..... | 11 |
| Resultados esperados..... | 11 |
| CAPÍTULO 1: Descripción del sistema de accionamientos de bombas centrífugas..... | 12 |
| 1.1 Caracterización general de la Empresa, Planta de Lixiviación y Lavado..... | 13 |
| 1.1.1 Unidad Básica de Producción Lixiviación y Lavado..... | 13 |
| 1.2 Funcionamiento actual del área de tanques de contacto..... | 14 |
| 1.3 Infraestructura para el control..... | 15 |
| 1.4 Naturaleza de la bomba como accionamiento..... | 17 |
| 1.5 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control..... | 20 |
| 1.5.1 Características de operación de los motores de inducción..... | 22 |
| 1.6 Método para variar la velocidad de motores asincrónicos..... | 22 |
| 1.7 Valoración de los sistemas de bombeo a velocidad variable..... | 24 |
| 1.8 Propuesta de esquema para el control de velocidad de la bomba..... | 24 |
| CAPÍTULO 2: Cálculo y selección del variador..... | 26 |
| 2.1 Aspectos técnicos sobre el variador de velocidad..... | 27 |
| 2.1.1 Estructura y componentes..... | 28 |
| 2.1.2 Principio de funcionamiento..... | 30 |
| 2.1.3 Principales funciones de los variadores de velocidad..... | 32 |
| 2.1.4 Aplicaciones de los variadores de velocidad en la industria..... | 34 |
| 2.1.5 Problemas que surgen en el arranque de motores asincrónicos..... | 35 |
| 2.1.6 Factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de regulación de velocidad..... | 35 |
| 2.1.7 Ventajas y desventajas de la utilización del Variador de Velocidad..... | 36 |
| 2.2 Cálculo y selección del variador..... | 37 |
| 2.2.1 Principales cuestiones a considerar a la hora de seleccionar un variador de velocidad..... | 37 |
| 2.2.2 Cálculo del convertidor..... | 38 |
| 2.2.3 Selección de los variadores de velocidad por Power Electronics (SDRIVE 700)..... | 40 |
| 2.2.4 Características técnicas generales del variador de velocidad SDRIVE (SD700) de la marca Power Electronics..... | 41 |
| CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados..... | 44 |
| 3.1 Valoración económica..... | 45 |



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

| | |
|--|----|
| 3.1.1 Cálculo económico..... | 45 |
| 3.1.2 Gasto de salario..... | 46 |
| 3.1.3 Costo total..... | 47 |
| 3.2 Análisis técnico de la explotación de los variadores de velocidad..... | 47 |
| 3.3 Valoración Social..... | 47 |
| 3.4 Valoración Medioambiental..... | 48 |
| Conclusiones..... | 49 |
| Recomendaciones..... | 50 |
| Bibliografía..... | 51 |
| Referencias bibliográficas..... | 53 |
| Anexos..... | 54 |



Introducción general

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas. 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.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos. La máquina de inducción alimentada con corriente alterna, especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico más común en la industria y el que abarca un rango alto de potencias. Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro.

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento 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 asíncrono 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 asíncronos 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 (**variador de velocidad**). Este 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 velocidad, amplían el campo de regulación allí donde las condiciones de caudal fluctúan o donde hay necesidad de controlar la presión, temperatura, nivel. En aplicaciones donde intervienen bombas, tales como estaciones de bombeo, grupos de presión. Es válido comentar que el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones.



Situación problemática

En el área de los tanques de contacto de la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, no existe un sistema de control automático para la regulación del nivel de los mismos, lo cual propicia la pérdida de mineral por derrame, así como la explotación ineficiente de esta parte del proceso.

Problema

Ausencia de regulación de velocidad en los motores de las bombas de contacto que garantice una adecuada correspondencia entre el trasiego de mineral y el nivel en los tanques de contacto.

Hipótesis

Con la identificación de las variables que determinan el funcionamiento eficiente de las bombas centrífugas del área de tanques de contacto en la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Ernesto Che Guevara, es posible implementar variadores de velocidad asociados a los controladores de nivel existentes e implementar un lazo de regulación gobernado desde un Controlador Lógico Programable (PLC).

Objetivo

Lograr un sistema que garantice el trasiego del mineral desde los tanques de contacto hacia el distribuidor 100, manteniendo el nivel requerido en los tanques y el tiempo de retención del mineral en los mismos, encaminado a alcanzar una explotación eficiente de los accionamientos.

Objetivos específicos

- Identificar variables del proceso.
- Evaluar energéticamente el sistema de los motores de las bombas para implementar variadores.



Objeto de estudio

Bombas de contacto en la planta de Lixiviación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Campo de acción

Regulación de velocidad por frecuencia.

Resultados esperados

- ❖ Elaborar la matriz de variables que participan en la explotación del accionamiento de bombas centrífugas en la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa.
- ❖ Describir los eventos más frecuentes que pueden ocurrir durante el trabajo típico de las bombas centrífugas de contacto.
- ❖ Proponer un sistema de regulación a lazo cerrado para regular y controlar la velocidad de las bombas instaladas en los tanques de contacto.
- ❖ Evaluar, desde el punto de vista económico, la factibilidad de la instalación de variadores de velocidad en el área de los tanques de contacto.



CAPÍTULO 1

Descripción del sistema de accionamientos de bombas centrífugas



1.1 Caracterización general de la Empresa, Planta de Lixiviación y Lavado

La Empresa del Níquel Comandante “Ernesto Che Guevara”, (ECG), fue construida a inicios de la década del 70, la ejecución del proyecto comienza a mediados de esa década y no es terminada hasta 1986, año en que es inaugurada. Se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, en la costa norte, a 4 Kilómetros de la ciudad de Moa, provincia de Holguín, Cuba. Desde su puesta en marcha en enero de 1986, su explotación ha sido muy importante para la economía del país, lo que ha favorecido el desarrollo de la zona y el progreso económico y social al generar empleo e inversiones. Su función fundamental se basa en la obtención de Níquel más Cobalto mediante un proceso metalúrgico. El esquema tecnológico esta basado en la lixiviación carbonato-amoniaco de mineral reducido denominado también proceso Caron. La parte productiva está formada por 5 plantas con una pequeña instalación para la separación de cobalto. La fábrica cuenta para la calificación de calidad de su producción con un laboratorio químico con equipos modernos y personal especializado en la rama de la producción del níquel. Completan el sistema productivo varias plantas auxiliares para el suministro de agua, aire, vapor y amoníaco.

1.1.1 Unidad Básica de Producción, Lixiviación y Lavado

La pulpa del mineral reducido, desde los tanques de contacto pasa por dos sistemas paralelos de cuatro etapas de lixiviación a contracorriente. La lixiviación se realiza con el licor carbonato-amoniaco en los espesadores por medio de aeración de la pulpa con el aire. Después de la cuarta etapa de lixiviación, la pulpa de mineral se dirige a dos sistemas paralelos de lavado. El lavado también se realiza con el licor de carbonato amoniaco por el método de contracorriente en los espesadores.

El licor enriquecido en níquel y cobalto, se envía a la Planta de Recuperación de Amoníaco para filtrarlo en los filtros de placas, y así limpiarlo de hierro y la pulpa de desecho se suministra a la planta de recuperación de amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el amoníaco. El licor de la primera y la segunda etapa de lixiviación se enfría en los intercambiadores de calor con el agua y se dirige a la Planta de Hornos de Reducción de mineral para mezclarse con el mineral reducido.



1.2 Funcionamiento actual del área de Tanques de contacto

Esta área tiene como objetivo recibir el mineral reducido de la Unidad Básica de Producción de Hornos de Reducción descargado por los enfriadores rotatorios de mineral a una temperatura menor de 260 °C, y mezclarlo en las canales de contacto con licor frío procedente de los enfriadores de licor con temperatura de (25 - 33) °C, formándose de esta forma una pulpa con relación líquido-sólido de 6,3/1, y temperatura ≤ 40 °C, llegando por gravedad a los tanques de agitación, donde se alcanza una densidad de (1130 a 1140) g/L, de estos tanques de agitación la pulpa es succionada por bombas centrífugas e impulsada para la primera etapa de turboaeradores.

Para realizar estas funciones el área cuenta con 3 series de contacto (A, B y C), que reciben el mineral de 4 enfriadores rotatorios por cada serie de contacto, y cada serie cuenta con 2 canales de contacto, 2 tanques de agitación mecánica de 70 m³ de capacidad, con un diámetro de 4,80 m y una altura de 3,86 metros y 4 bombas centrífugas por serie, que son las encargadas de trasegar la pulpa formada, una parte al Distribuidor General, el cual ramifica el flujo de pulpa a 4 series de turboaeradores de 6 series que cuenta la primera etapa de Turboaeradores y la otra parte a las restantes dos series, las cuales reciben la pulpa a través de dos bombas, una para cada serie en cuestión.

En esta área se opera generalmente con 2 bombas, una canal y un tanque de agitación por serie, el resto de las instalaciones se mantienen de reserva. El nivel promedio al que deben trabajar los tanques es de 2 metros de altura con respecto a su base, debido a que las bombas no deben operar en vacío. En esta área aparece también el sello hidráulico para los gases amoniacales, así como un soporte para medir el nivel de los tanques y una abertura circular para el mecanismo de accionamiento y el agitador. La velocidad de rotación del agitador llega a 55 r.p.m. y en régimen permanente, su corriente está entre 30 y 40 A. (Ver Fig. 1.1)

Licor: Líquido que está compuesto por carbonato de amonio, hidróxido de amoníaco y agua, pudiendo tener o no disuelto cantidades determinadas de níquel y cobalto entre otros compuestos.

Pulpa: Mezcla formada por licor y mineral reducido en cualquier parte del circuito.



Tanques de Contactos

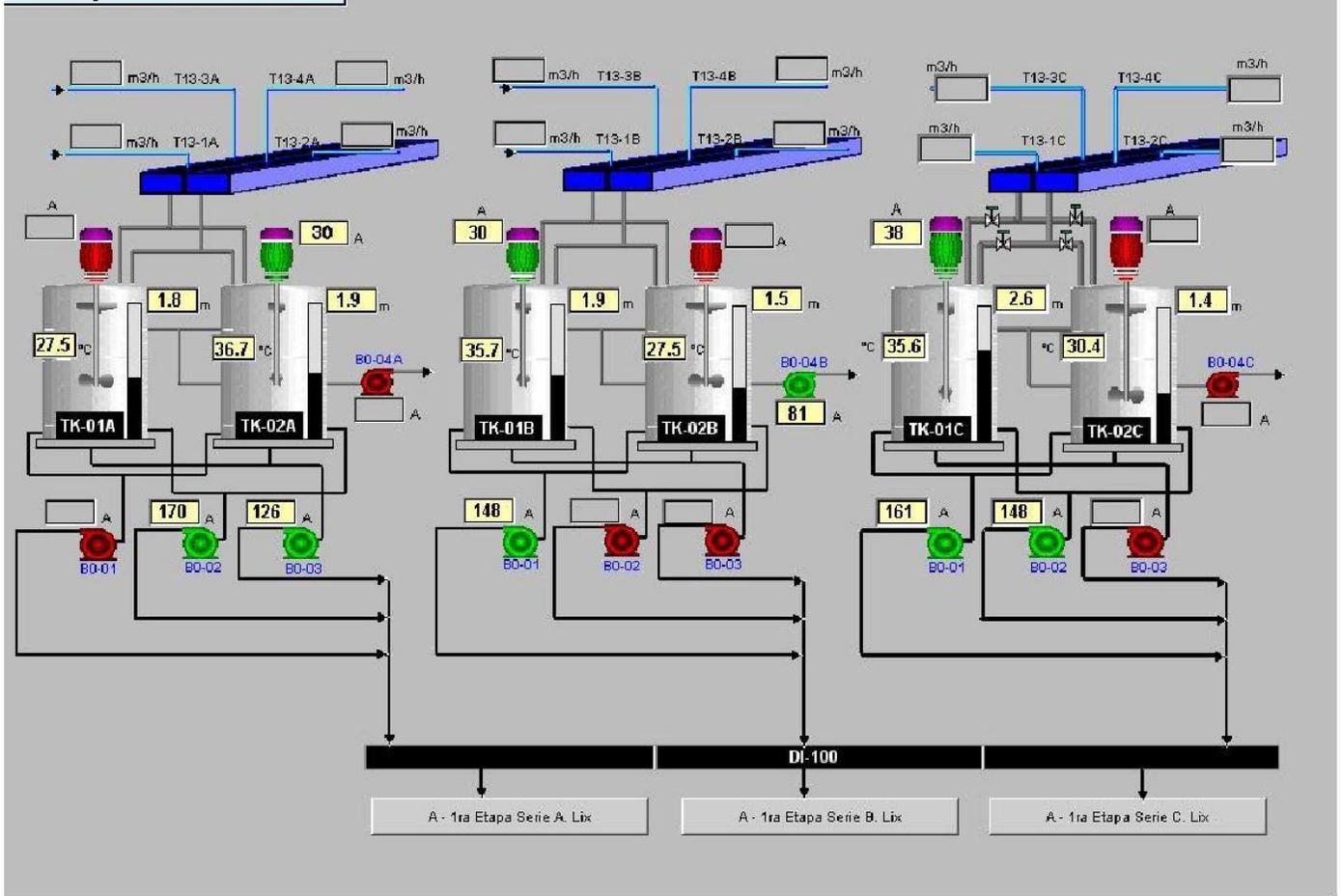


Fig. 1.1: Supervisión en CITECT de los tanques de contacto de la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

1.3 Infraestructura para el control

Es necesario, además de evaluar las características de los motores, o del flujo tecnológico del área en la que se realiza el estudio, analizar las características técnicas de los medidores de nivel que estén instalados en los tanques de contacto, debido a que estos desempeñan un importantísimo papel a la hora de establecer el lazo de regulación, además, porque estos son los que enviarán la señal al variador de velocidad que controlará las bombas de cola instaladas a la salida de los tanques. (Ver Fig. 1.2) El medidor de nivel instalado en los tanques de contacto es el BM 70 A; este sirve exclusivamente para la medición del nivel, del volumen y para la medición por



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

reflexión de líquidos, pastas y lodos. A continuación se muestran algunas de sus características técnicas. (Ver Tabla 1.1)

Tabla 1.1 Características técnicas del medidor de nivel BM 70 A

| | | |
|--|--|---|
| Fabricante | Krohne | |
| Altura del tanque (área de medición) | 0,5 hasta 40 m | |
| Exactitud de medición (distancia) | Estándar: desde 1 m: ± 1 cm / desde 3.3 m: $\pm 0.3\%$ Precisión: desde 1 m: ± 5 mm / desde 5 m: $\pm 0.1\%$ | |
| División del valor de medición | 1 mm | |
| Modificación del nivel de llenado | Máx. 10 m/min | |
| Bridas de unión (antena de bocina) | DIN 2501 DN 50 hasta DN 200 / PN6 hasta PN 64; | |
| Sobrepresión máx. de servicio admitida | -1 bar (vacío) hasta máx. 64 bar | |
| Energía de alimentación | 170–254 VAC (45–66 Hz) | |
| Microondas | Principio de medición: FMCW Radar Gama de frecuencias: Banda X 8.5-9.9 GHz | |
| Salida de corriente | Corriente: 4–20 mA | Exactitud y linealidad: 0.05 % |
| Ex-e HART®(activa) | Carga: ≤ 500 Ohm | Comunicación digital: HART® (pto a pto) |
| Salida de relé (pasiva) | Clase de contacto: 1 contacto de cierre (electrónico) Carga de contacto: máx. 30 V DC / 30 V AC ; 100 mA | |
| Entrada digital | Tensión externa: 5 hasta 28 V DC Resistencia interna: ≥ 1 kOhm | |
| Conexión eléctrica | Entradas de cables: 3 x M25 x 1,5 Bornes de conexión: Sección transversal de conducto 0.5–2.5 mm ² (de un alambre: máx. 4 mm ²) | |

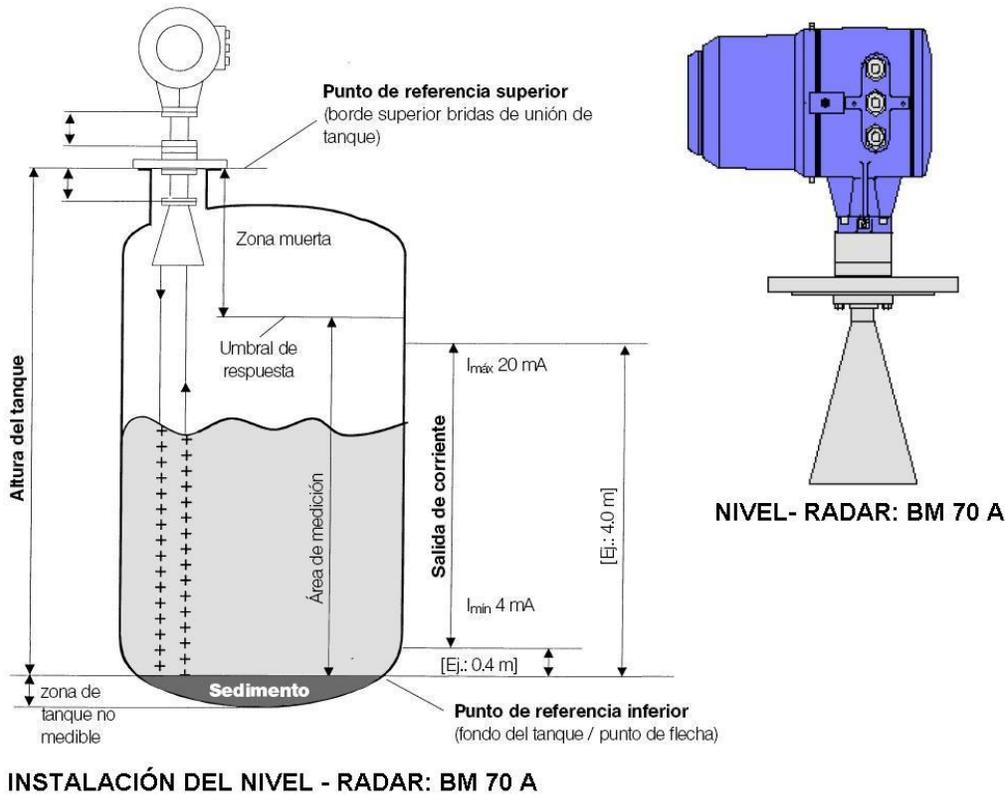


Fig. 1.2: Instalación del medidor de nivel BM 70 A

1.4 Naturaleza de la bomba como accionamiento

Los accionamientos eléctricos con bombas centrífugas están presentes en diversas secciones del proceso tecnológico que sufre el mineral en las plantas de procesamiento de níquel. Una de estas plantas, es la de Lixiviación y Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Una idea, con la apreciación que se tiene en términos de rendimiento en un accionamiento de bombas centrífugas, se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3. Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas



Como se conoce, los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [8]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan, reduciendo considerablemente la eficiencia [47].

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo el rendimiento del motor. Uno de los aportes desde el punto de vista práctico, alcanzado por los investigadores anteriores, es la obtención experimental en los motores de inducción de la curva U/f que permite aproximarse a los estados de carga del accionamiento. Esto parte de la idea de que en muchos complejos industriales los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f , la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts-Hertz (U/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga logrando el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva U/f , lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento.

La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba centrífuga, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas [45]; propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial [32]; utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f [81]; obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles U/f ; otros autores han atacado el problema de manera analítica [47]; calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina [73]; consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias [34]; estimando adicionalmente las pérdidas en el núcleo. La mayoría de los algoritmos heurísticos fueron



validados en bancos de prueba de laboratorio; estos algoritmos resultan relativamente complejos para su aplicación en un accionamiento industrial comercial con control U/f. A pesar de presentarse un resultado que permite calcular una curva óptima U/f que mejora el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas centrífugas o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad [65] y además se aplica la condición de flujo óptimo [73] adaptado a bombas y ventiladores con resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle; no se tiene en cuenta, las fluctuaciones de carga mecánica debido por ejemplo a posibles vibraciones provocadas por la cavitación en la bomba centrífuga. La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas, las cuales están usualmente comprendidas dentro de cinco componentes: las pérdidas del cobre del estator, las pérdidas del cobre del rotor, las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales. El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y del hierro de la máquina manteniendo constante el flujo. En esto se ha llegado a establecer una estrategia de control de pérdidas en base a un analizador óptimo de energía que opera mediante el manejo escalar del accionamiento [1]. Parece más completo llevar a cabo este propósito con un enfoque vectorial del algoritmo, y que atienda de manera combinada el modelo de pérdidas. Resultan meritorios los trabajos aportados [74], en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer standars de rendimientos. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo (ver la tabla 1.2) la diferencia puede llegar a ser de hasta un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la máquina, y el rendimiento con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida.

Tabla 1.2 Rendimientos con carga nominal de cuatro motores del mismo diseño.

| Carga parcial | Motor A | Motor B | Motor C | Motor D | Promedio |
|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| 50 | 91.95 | 92.07 | 91.75 | 91.77 | 91.88 |
| 75 | 92.98 | 92.86 | 92.53 | 93.00 | 92.84 |
| 100 | 93.75 | 93.39 | 93.11 | 93.84 | 93.53 |



| | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 125 | 93.88 | 93.22 | 93.19 | 93.62 | 93.48 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|

Fuente: Artículo, Induction motor efficiency: a number with many meanings, [Van Roy, Slaets y Belmans, 2000].

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos [39], en 1998 ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema; pero estos autores no tienen en cuenta las especificidades de carga del mecanismo industrial.

1.5 Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control

El rendimiento de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor, tal como lo reflejan las publicaciones de diferentes autores [39] y [74].

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de tensión / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño, ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de rendimiento mucho menores.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- a) Control del deslizamiento del motor
- b) Control de la tensión o corriente mediante una fuente inversora
- c) Control combinado de tensión y frecuencia
- d) Control vectorial
- e) Control de la perturbación de la velocidad del rotor



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

Por otra parte se ha avanzado en el estudio de la eficiencia de los accionamientos por la vía de efectuar la dirección del motor de inducción por variación del flujo magnético, en aras de un menor consumo de corriente del estator con poca distorsión, muy rápida respuesta del flujo y el torque a los cambios repentinos en los procesos transitorios. Este aspecto va ser utilizado en nuestro algoritmo de control, teniendo en cuenta las especificidades de cambios que ocasiona la carga mecánica del proceso. Por otra parte, durante el trabajo de la máquina de inducción se aprecia como rasgo característico su comportamiento oscilatorio, aspecto motivado por las variaciones de voltajes desde la red, o por los efectos de la energía reactiva de intercambio entre el motor de inducción y la fuente o convertidor de frecuencia. Pero hasta la fecha no se reflejan en los modelos de pérdidas las incidencias que ocasionan los cambios de magnitudes de los parámetros del mecanismo y que de forma casi cíclica exigen al motor, es decir, se separa o se excluye en los modelos la sección de carga mecánica rotacional del mecanismo de producción, que una vez puesto en marcha el accionamiento, rige de forma permanente el comportamiento de todo el sistema. En tal sentido, los últimos estudios se han centrado en el grupo Convertidor – Motor de Inducción [62] [37] [1] [96], que aunque se han establecido límites en su manipulación, el problema de mantener elevados rendimientos en la transferencia de energía del accionamiento para diferentes niveles y regímenes, todavía no está suficientemente resuelto como para estar satisfecho en base a estos enfoques. Nuestro análisis sigue el comportamiento del accionamiento, a partir de la incidencia de las variables en la transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional, observando los cambios u oscilaciones de la carga por causas de origen electromagnéticas y mecánicas.

El Motor de Inducción es capaz de reponerse a gran parte de estas oscilaciones, y si son de origen electromagnético y de aceptable intensidad casi siempre las absorbe y las comparte con la red, y este aspecto está contemplado en la fase de diseño de la máquina; pero cuando éstas son más intensas y vienen desde el eje mecánico, por mucho estado inercial que tenga el sistema, al motor le resulta más difícil reponerse a los cambios, y es aquí donde aspiramos profundizar para ampliar la capacidad de respuesta del accionamiento en base a trabajar en zonas de mejores rendimientos. Estos trabajos se enfocan en la determinación de las pérdidas en estado estático del motor de inducción, dentro de las cuales se sitúan restricciones. Todos ellos están enmarcados bajo las condiciones de una máquina de inducción ordinaria operando con frecuencias ordenadas (50 ó 60 Hz).



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

Las bombas trabajan con eficiencias más bajas que los motores de inducción, determinadas una parte por las limitaciones que le impone el diseñador y otra por las restricciones que le ofrece la red hidráulica donde va operar. Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, todavía no son suficientes las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia correlacionar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el Motor hasta el mecanismo.

Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de la máquinas de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen los mecanismos de transporte.

1.5.1 Características de operación de los motores de inducción

Son los de mayor uso en la industria. Cuando aplicamos una corriente alterna al estator, se produce un campo magnético giratorio, este campo de acuerdo a las leyes de inducción electromagnéticas, induce corriente en las bobinas del rotor y estas producen otro campo magnético opuesto según la Ley de Lenz y que por lo mismo tiende a seguirlo en su rotación de tal forma que el rotor empieza a girar con tendencia a igualar la velocidad del campo magnético giratorio, sin que ello llegue a producirse. Si sucediera, dejaría de producirse la variación de flujo indispensable para la inducción de corriente en la bobina del inducido. A medida que vaya haciéndose mayor la diferencia entre la velocidad de giro del campo y la del rotor, las corrientes inducidas en él y por lo tanto su propio campo irán en aumento, gracias a la composición de ambos campos se consigue una velocidad estacionaria. En los motores asincrónicos nunca se alcanza la velocidad del sincronismo, los bobinados del rotor cortan siempre el flujo giratorio del campo inductor.

1.6 Método para variar la velocidad de motores asincrónicos

La velocidad de un motor asincrónico se determina mediante el número de pares de polos (p) del motor, la frecuencia de red (f) y el deslizamiento del motor (S). De aquí se derivan las posibilidades



diversas de control de la velocidad de un motor.

$$n = \left(\frac{1-s}{p} \right) \cdot f_1$$

En la fórmula se observan las diferentes variables que se pueden manipular para hacer que la velocidad varíe.

Existen diversos métodos para variar la velocidad de un motor asíncrono, como es variando la tensión, en el cual bajo condiciones de arranque y de marcha, el par del motor de inducción varía con el cuadrado del voltaje aplicado al primario del estator.

Existen dos métodos importantes para cambiar el número de polos en un motor de inducción: el método de polos consecuentes y el de devanados de estator múltiples; los cuales tienen como inconveniente la complejidad y volumen del motor. Otro de los métodos consiste en variar la resistencia del secundario el cual permite la inserción de una resistencia rotórica suplementaria que produce un incremento en el deslizamiento del rotor.

Variación de la frecuencia

Es uno de los métodos de control de velocidad de mejores características, se encarga de generar una tensión de frecuencia y amplitud variables a partir de la red de alimentación.

En el método de control de velocidad por variación de frecuencia, tanto las propiedades del motor como el par de inversión y la velocidad de deslizamiento deben ser independientes de la frecuencia de alimentación con el motor bajo carga, la curva característica del par del motor debe tener siempre la misma forma dado que el par generado por el motor es proporcional al flujo magnético.

La preferencia actual por la regulación a frecuencia variable se debe a la posibilidad de utilizar el sencillo y robusto motor de jaula de ardilla; cuyo mantenimiento es mucho más fácil que el de un motor de contactos deslizantes, lo que resulta muy importante en máquinas que operan bajo condiciones ambientales difíciles. Además, este tipo de motor eléctrico resulta más económico y compacto que los restantes. Este método permite transformar fácilmente un equipo de velocidad fija en un accionamiento de velocidad variable sin realizar grandes modificaciones.

Si bien pueden utilizarse distintos tipos de convertidores de frecuencia rotativos, en la actualidad la modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes.

Los mismos se construyen generalmente con IGBT's gobernados por un microprocesador que utiliza un algoritmo de control vectorial del flujo, y consisten básicamente en un convertidor estático alterna-alterna (ciclo convertidor), alterna-continua-alterna (convertidor de enlace), que permiten la modificación progresiva de la frecuencia aplicada, con la consiguiente modificación de la corriente y el par motor.

1.7 Valoración de los sistemas de bombeo a velocidad variable

Los convertidores de frecuencia también llamados variadores de frecuencia (VDF) o Variadores de Velocidad han logrado resolver el problema de poder usar los motores a velocidades variables sin disminuir la eficiencia.

Estos dispositivos entregan voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto toma la alimentación eléctrica de la red la cual tiene voltaje y frecuencia fija, la transforma en un voltaje continuo y luego lo transforma en uno alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un inversor.

La forma de onda del voltaje de salida no es una senoide perfecta, toda vez que entrega una señal de pulso modulada a partir de la frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos de potencia. Los equipos actuales trabajan a frecuencias de conmutación del orden de los 50 kHz, donde los contenidos de armónicos son bastante bajos por lo que se agregan filtros pasivos.

La relación voltaje - frecuencia es configurada por el usuario según la aplicación, siendo la más usual una relación lineal, la cual produce un torque constante en todo el rango de velocidades, o una relación cuadrática donde el torque disminuye a medida que baja la velocidad.

1.8 Propuesta de esquema para el control de velocidad de la bomba

El sistema propuesto, consta de un variador de velocidad para accionar la electrobomba y tener régimen de velocidad variable que satisfaga los niveles de pulpa en los tanques de contacto,



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

tomando como consigna un nivel determinado de pulpa (2 metros) que está velado por un sensor de nivel (BM70 A) el cual ya existe y permite salidas analógicas de corriente (4-20 mA), señal que va a ser procesada por el PLC y éste a su vez se encargará de controlar al variador de velocidad como se muestra a continuación (ver figura 1.4)

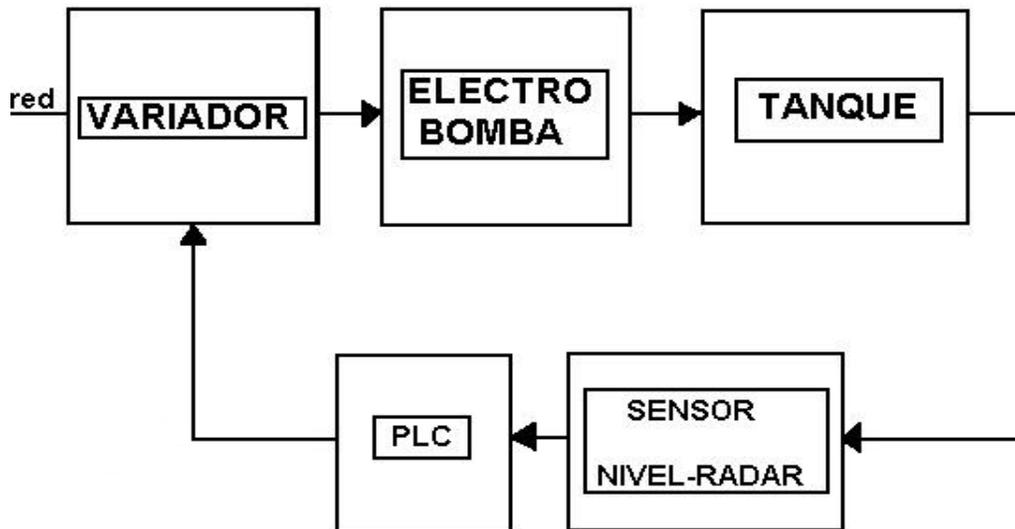


Fig. 1.4: Diagrama en bloques del sistema de control de velocidad de la bomba

El esquema es un sistema de regulación a lazo cerrado, la referencia de comparación del nivel es de 2 metros, el variador deberá garantizar la variación de velocidad para mantener este nivel establecido y a su vez, garantizar una explotación eficiente de esta parte del proceso.



CAPÍTULO 2

Cálculo y selección del variador



2.1 Aspectos técnicos sobre el variador de velocidad

Los variadores de velocidad son dispositivos que permiten variar la velocidad de los motores asincrónicos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables. La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobreintensidad, sobretensión, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra; además de ofrecer procesos de arranque y frenado suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

Podemos mantener un parámetro constante en función de la velocidad de la bomba. No obstante la decisión de usar un Variador de Velocidad en una determinada aplicación debe estar basada en un completo entendimiento del impacto de éste sobre la instalación.

A continuación se muestra una gráfica de variación de velocidad, en función de la altura y la potencia. (Figura 2.1)

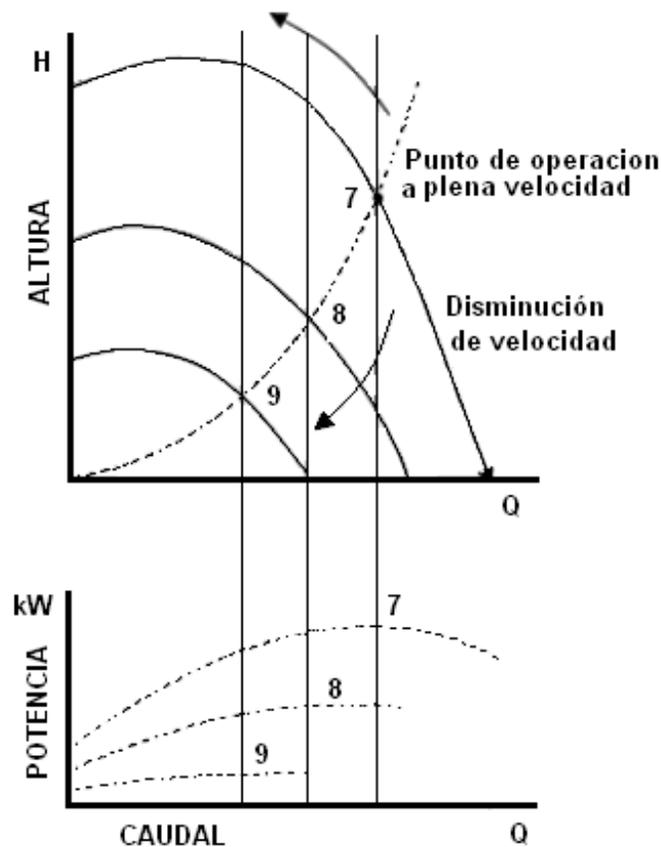


Fig. 2.1: Gráfica de variación de velocidad en función de la altura y la potencia



2.1.1 Estructura y componentes

Los variadores de velocidad, para el estudio de su estructura interna, se pueden dividir en 4 etapas fundamentales:

- **Etapá rectificadora.** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos o tiristores; etapa que puede ser de 6 o 12 pulsos. A continuación se muestra un pequeño esquema en la Figura 2.2

| Diodos | DC Chopper | Tiristores |
|--|---|---|
| | | |
| Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No | Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No | Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí |

Fig.2.2: Esquemas de rectificadores

- **Etapá intermedia.** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.
- **Inversor.** Convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables mediante la generación de pulsos. Los IGBT's envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor. La frecuencia portadora de los IGBT's se encuentra entre 2 a 16 kHz. Los filtros a la salida reducen la capacidad de los cables del motor y bajan el dV/dt , lo que permite aumentar las distancias de cable entre variador y motor. Minimiza el estrés en los cables de variador a motor y en los bobinados de éste. Reduce la emisión radiada y conducida de Interferencias por Radio Frecuencia (RFI).

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia) están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

- **Etapá de control.** Controla los IGBT's para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia y los parámetros externos en general. Los variadores más empleados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia.

A continuación, se muestra un pequeño diagrama en bloques de cómo se distribuyen estas etapas fundamentales (Figura 2.3)

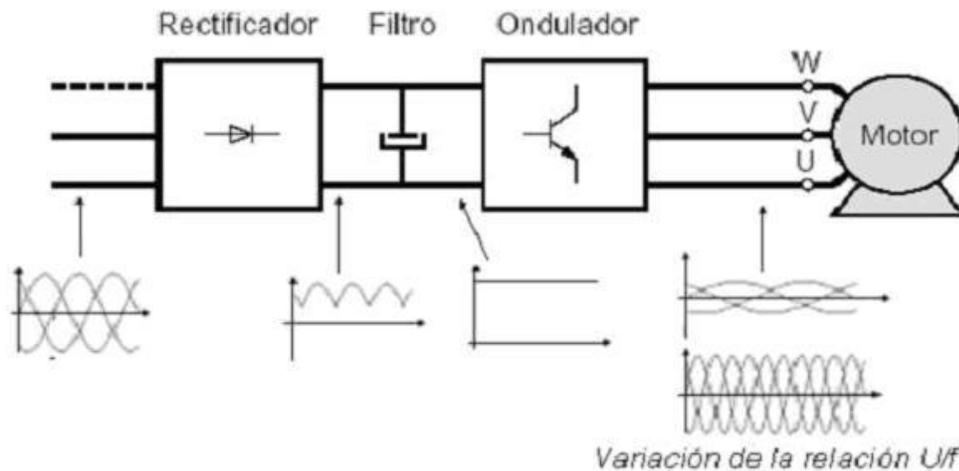


Fig. 2.3: Diagrama en bloques y forma de onda en un variador de velocidad

Por otra parte, se puede decir que se componen de dos módulos generalmente montados en una misma envolvente.

- un módulo de control, que controla el funcionamiento del aparato,
- un módulo de potencia, que alimenta el motor con energía eléctrica.

El módulo de control

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad y la corriente.

Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina arrastrada. A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y desaceleración, el control de la velocidad



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC.

Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado...) pueden proporcionarse desde interfases de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC.

Los parámetros de funcionamiento, las informaciones de alarma y los defectos pueden verse mediante displays, diodos LED, visualizadores de segmentos o de cristal líquido, o pueden enviarse hacia la supervisión mediante un bus de terreno.

Los relés, frecuentemente programables, proporcionan información de:

- fallos (de red, térmicos, de producto, de secuencia, de sobrecarga),
- vigilancia (umbral de velocidad, prealarma, final de arranque).

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

El módulo de potencia

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...)
- interfases de medida de las tensiones y/o corrientes
- componentes de un sistema de ventilación

2.1.2 Principio de funcionamiento

La variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua con toda la potencia en el llamado circuito intermedio, y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con frecuencia y tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna.

A esta segunda etapa también se le suele llamar Ondulador. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de Inversor.



Respecto a la velocidad los convertidores suelen permitir dos tipos de control:

Control manual de velocidad. La velocidad puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador). Posibilidad de variación en el sentido de giro.

Control automático de velocidad. Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

Para lograr un óptimo funcionamiento del variador de velocidad, se requiere una correcta instalación de los periféricos que se adhieren a él (figura 2.4):

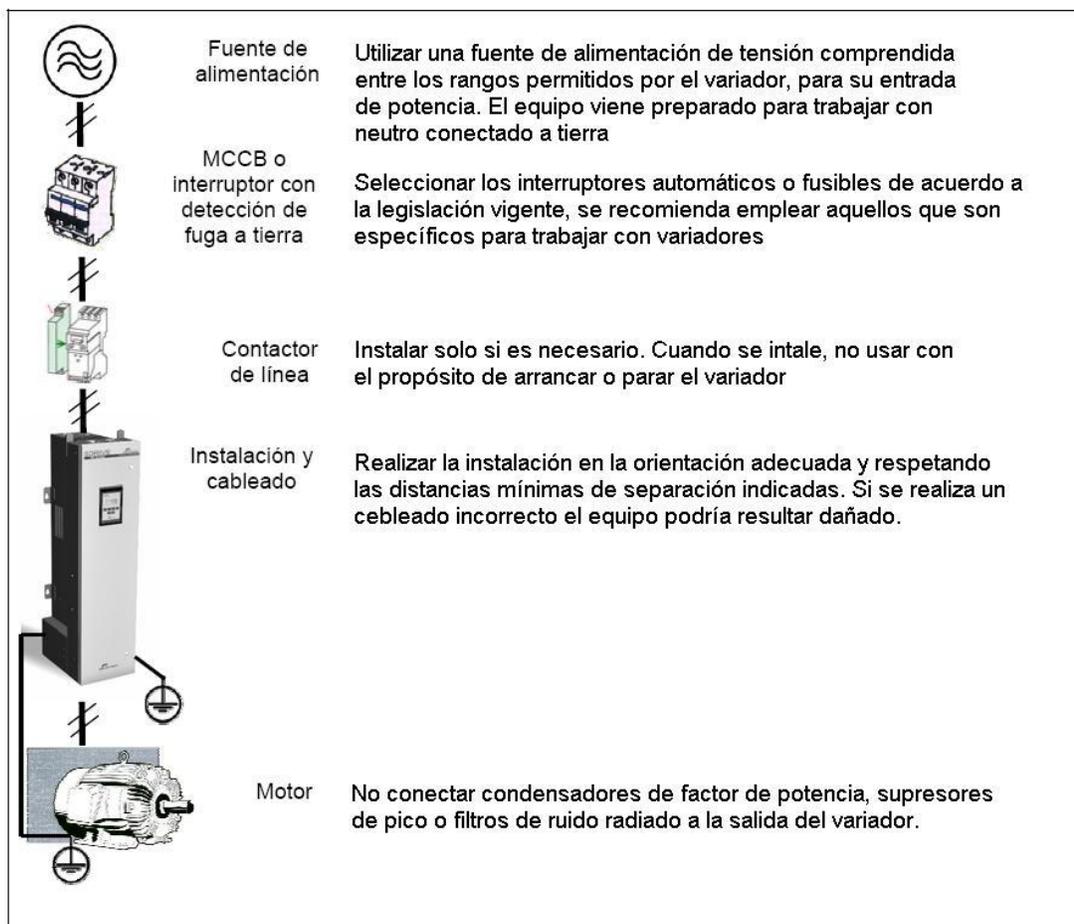


Fig. 2.4: Instalación eléctrica del variador de velocidad

Los elementos periféricos deben ser debidamente seleccionados así como conectados de forma adecuada. Una incorrecta instalación o aplicación del variador puede traducirse en un mal funcionamiento del sistema o en una reducción de la vida del equipo, así como daño en los componentes.



2.1.3 Principales funciones de los variadores de velocidad

Aceleración controlada.

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S». Generalmente, esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

Variación de velocidad.

Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, es un sistema rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama «en bucle abierto». La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga, de la temperatura). El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

Regulación de la velocidad.

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado que posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación (Figura 2.5) La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia. El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor. Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor. Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para llevar la velocidad a su valor inicial. Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones. La precisión de un regulador se expresa generalmente en por ciento (%) del valor nominal de la magnitud a regular.

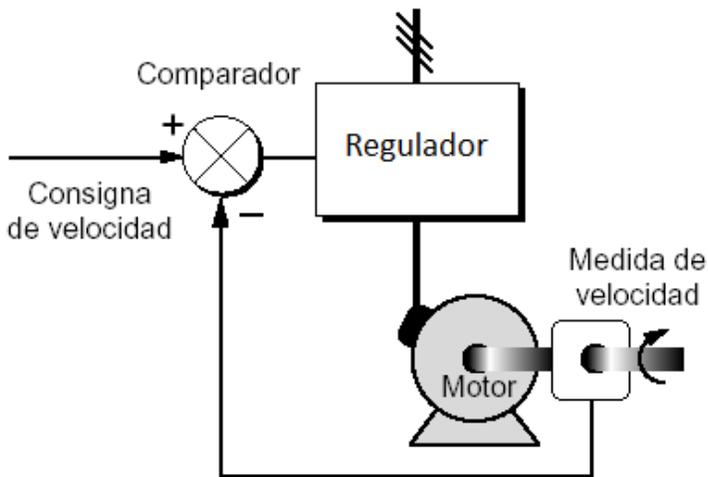


Fig. 2.5: Esquema de un sistema de regulación de velocidad

Desaceleración controlada.

Cuando se desconecta un motor, su desaceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (desaceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la desaceleración mediante una rampa lineal, generalmente independiente de la rampa de aceleración.

Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula:

- Si la desaceleración deseada es más rápida que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina; se habla entonces de frenado eléctrico, que puede efectuarse reenviando energía a la red de alimentación, o disipándola en una resistencia de frenado.
- Si la desaceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par motor superior al par resistente de la máquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

Inversión del sentido de marcha.

La mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función. La inversión de la secuencia de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente, por inversión de la consigna de entrada, por una orden lógica en un borne o por la información transmitida mediante una red.



Frenado.

Consiste en parar un motor sin controlar la rampa de desaceleración. Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asincrónicos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia. Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, el frenado sólo puede ser intermitente. En el caso de un variador para motor de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

Protección integrada.

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación) un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

Además, los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:

- los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra
- las sobretensiones y las caídas de tensión
- los desequilibrios de fases
- el funcionamiento monofásico

2.1.4 Aplicaciones de los variadores de velocidad en la industria

Los variadores de frecuencia tienen mayor aplicación en los siguientes tipos de máquinas:

- **Transportadoras.** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta.
- **Bombas y ventiladores centrífugos.** Controlan el caudal, en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

- **Bombas de desplazamiento positivo.** Control de caudal y dosificación con precisión, regulando la velocidad, por ejemplo: en bombas de tornillo y bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro.
- **Centrífugas.** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.
- **Prensas mecánicas y balancines.** Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.
- **Máquinas textiles.** Para distintos tipos de materiales, incluso para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo random para conseguir telas especiales.
- **Compresores de aire.** Se obtienen arranques suaves con máxima cupla y menor consumo de energía en el arranque.
- **Pozos petrolíferos.** Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.

2.1.5 Problemas que surgen en el arranque de motores asincrónicos

- El pico de corriente en el arranque puede perturbar el funcionamiento de otros equipos conectados a la red.
- Las sacudidas mecánicas que se producen durante los arranques y las paradas pueden ser inaceptables para la máquina así como para la seguridad y comodidad de los usuarios.
- Funcionamiento a velocidad constante.

Los variadores de velocidad eliminan estos inconvenientes. Adecuados para motores de corriente tanto alterna como continua, garantizan la aceleración y desaceleración progresivas y permiten adaptar la velocidad a las condiciones de explotación de forma muy precisa. Según la clase del motor, se emplean variadores de tipo rectificador controlado, convertidor de frecuencia o regulador de tensión.

2.1.6 Factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de regulación de velocidad

- Límites o gama de regulación



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

- Progresividad o flexibilidad de regulación
- Rentabilidad económica
- Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada
- Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal)
- Carga admisible a las diferentes velocidades
- Tipo de carga (par constante, potencia constante,...)
- Condiciones de arranque y frenado
- Condiciones ambientales (temperatura, humedad,...)
- Tipo de motor (potencia, corriente, voltaje,...)
- Rangos de funcionamiento (velocidad máxima, mínima)

2.1.7 Ventajas y desventajas de la utilización del Variador de Velocidad

La implementación de variadores de velocidad, como todo sistema eléctrico acoplado a una determinada maquinaria, ofrece beneficios y perjuicios, a continuación se muestran algunos de estos:

Ventajas

- El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos
- La conexión del cableado es muy sencilla
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos
- Controla la aceleración y el frenado progresivo
- Limita la corriente de arranque
- Permite el control de rampas de aceleración y desaceleración regulables en el tiempo
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funciona parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo (protege al motor)
- Puede controlarse directamente a través de un autómata o microprocesador
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor
- Nos permite visualizar las variables (Tensión, Corriente, Frecuencia, Velocidad)



Desventajas

- Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo
- Requiere estudio de las especificaciones del fabricante
- Requiere un tiempo para realizar la programación
- Requiere un estudio detallado para la factibilidad de su instalación a la máquina

2.2 Cálculo y selección del variador

2.2.1 Principales cuestiones a considerar a la hora de seleccionar un variador de velocidad:

- Verificar la tensión de suministro y las tensiones nominales del convertidor y del motor.
- Seleccionar el convertidor adecuado a la potencia nominal del motor.
- Comprobar que la corriente nominal del convertidor sea igual o mayor que la del motor seleccionado.
- Verificar el tipo de característica de momento de la carga.
- Prestar atención a los casos especiales en cuanto a altos requerimientos de momento de arranque o de momento máximo.
- Comprobar el intervalo de velocidad requerido y el que puede proporcionar el convertidor.
- La velocidad máxima permisible del motor no se puede exceder.
- Comprobar el sistema de tierra del motor, del equipo accionado y del tacómetro.
- Verificar técnica y económicamente si un sistema separado de enfriamiento reduce el tamaño del motor y, consecuentemente, el tamaño del convertidor.
- A altas velocidades, prestar especial atención a la construcción de los rodamientos, la lubricación, el ruido del ventilador, el balanceo, las velocidades críticas, los sellos de los ejes y el momento máximo del motor.
- A bajas velocidades, evaluar la lubricación de los rodamientos, la ventilación del motor y el ruido electromagnético.

El procedimiento más sencillo, consiste en, una vez conocida la potencia del motor, buscar en el catálogo, y de acuerdo con dicha potencia, elegir el convertidor que la admita. De esta forma no hay seguridad de que esta selección se haya realizado correctamente y de que el convertidor permita mover al motor.



Por tanto para una correcta selección del convertidor se deben seguir los siguientes pasos.

2.2.2 Cálculo del convertidor

Intensidad nominal del motor:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} * U_N * \cos\varphi * \eta} \quad (2.1)$$

Intensidad del variador:

$$I_V \geq 1,05 * I_N \quad (2.2)$$

Si se trataran de accionar varios motores y estos pudieran entrar estando otros en funcionamiento el cálculo sería el siguiente:

$$I_V \geq \left(1,05 * \sum I_{\max} + 2 \sum I_{arr} \right) * \frac{1}{1,5} \quad (2.3)$$

$\sum I_{arr}$: Sumatoria de las corrientes de los motores que arrancan.

$\sum I_{\max}$: Sumatoria de las corrientes de los motores que están funcionando.

Cálculo del convertidor para el proceso de arranque.

Intensidad que debe circular por el convertidor durante el proceso de arranque.

$$I_{arr} \geq I_N + I_a \geq I_n + 0,7I_N \geq 1,7 * I_N \quad (2.4)$$

Para elegir favorablemente el convertidor, desde el punto de vista del arranque, es importante tener en cuenta la frecuencia de los arranques (debe dar tiempo a enfriarse el motor). También tener en cuenta la velocidad a que se debe arrancar.

Los convertidores de frecuencia a frecuencias muy bajas no mantienen el par debido a la influencia excesiva a estas frecuencias de la componente resistiva de la impedancia que no genera par.



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

El límite de frecuencia inferior a que esto ocurre es variable en función de la carga pero se mueve alrededor de los 5 a 7 Hz o incluso más. Por tanto siempre que se deba arrancar a velocidad baja habrá que tener mucho cuidado y probablemente sobredimensionar el convertidor.

Cálculo de la corriente nominal, de la corriente de arranque y de la potencia nominal del variador de velocidad.

Partiendo de las ecuaciones:

$$P_v \geq k * P_n \quad (2.5)$$

$$I_v \geq 1,05 * I_n$$

$$I_{arr} \geq 1,7 * I_n$$

K debe estar entre 1 y 1.2; y el valor más empleado es 1.05 esto se debe a que la corriente de salida del convertidor no es perfectamente sinusoidal, pues presenta unos armónicos que no producen par útil.

Cálculos para la selección del variador de velocidad a implementarse en las bombas de contacto.

Esta área cuenta con 12 motores (4 por serie), de los mismos sólo se deberá implementar variadores de velocidad en 9 (las bombas BO-01; BO-02 y BO-03, de cada serie de contacto), los restantes 3 motores (las bombas BO-04 de cada serie de contacto) ya tienen instalados sus respectivos variadores de velocidad. Los motores instalados (RZ 315M6), son asíncronos, con rotores de jaula de ardilla, con los siguientes datos nominales:

Bomba de cola: BO-01, BO-02 y BO-03 (serie A, B y C)

P_n (kW): 121

U_n (V): 440

I_n (A): 194

F. Pot: 0.86



Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1,05 * 194A$$

$$I_v \geq 203.7A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 121kW$$

$$P_v \geq 127.05kW$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$I_{arr} \geq 1,7 * 194A$$

$$I_{arr} \geq 329.8A$$

2.2.3 Selección de los variadores de velocidad por Power Electronics (SDRIVE 700)

A la hora de seleccionar el variador de velocidad, en función de los resultados obtenidos luego de los cálculos realizados anteriormente, se consulta el catálogo para la selección del modelo en función de los resultados obtenidos. (Anexo 2)

Luego se consulta la tabla que relaciona los modelos en función de las características específicas de cada variador (Anexo 3)

Para los datos requeridos:

$$I_v \geq 203.7 A$$

$$P_v \geq 127.05 kW$$

$$I_{arr} = 329.8 A$$

Se selecciona un variador, **SD70250552** que tiene los siguientes datos nominales.

$$I_v: 250 A$$

$$P_v: 132 kW$$

$$I_{arr}: 375 A$$

Grado de protección: IP54



Tensión de alimentación: 380 - 500 V

Filtro: Filtro de segundo entorno

Número de pulsos: 6 pulsos

A continuación se muestra un esquema eléctrico del variador de velocidad (SD700) (Figura 2.6)

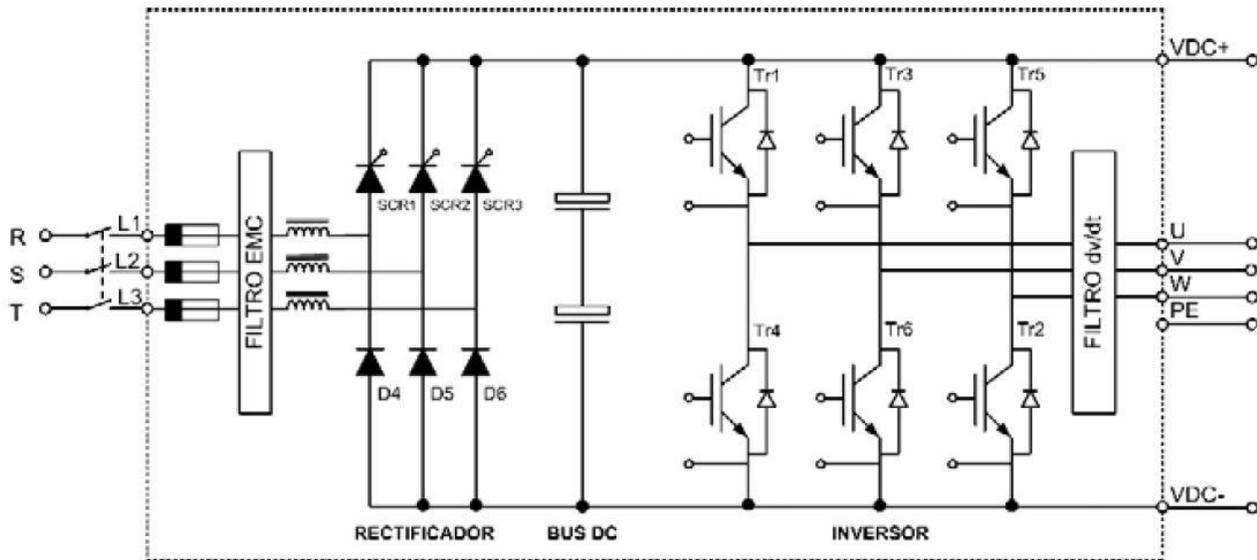


Fig. 2.6: Esquema eléctrico del variador de velocidad (SD700)

2.2.4 Características técnicas generales del variador de velocidad SDRIVE (SD700) de la marca Power Electronics.

Para la selección un variador de velocidad se debe tener en cuenta un grupo de características que justifiquen su superioridad con respecto a otros que pueden realizar las mismas funciones, en el caso particular se muestran las del SD700 (Anexo 4) así como algunos de los accesorios que se pueden adherir a él.

Tarjeta de Fibra Óptica



Tarjeta opcional de Fibra Óptica, con conector de entrada y salida para mejorar la comunicación entre variadores. Perfecta para conectar y sincronizar equipos minimizando el riesgo de interferencias.

La posibilidad de traspasar datos entre todos los equipos conectados, mejora funciones como el seguimiento de velocidad, ayudas al par (extremadamente útiles en aplicaciones como papeleras, industrias textiles...).



Tarjeta de Expansión Entradas y Salidas



Pensando siempre en una mejora constante, el SD700 ofrece la posibilidad de ampliar las entradas y salidas, para ello dispone de una tarjeta de expansión que incluye:

- 4 Entradas digitales optoaisladas y configurables
- 1 Entrada analógica configurable
- 5 Salidas digitales
- 1 Salida analógica configurable

Tarjeta Encoder



La serie SD700 dispone de tarjetas opcionales de Encoder, lo que permite disponer de 2 Encoders diferenciales (uno para el usuario y otro para el control vectorial) trabajando de 5 a 24Vdc, según sea preciso.

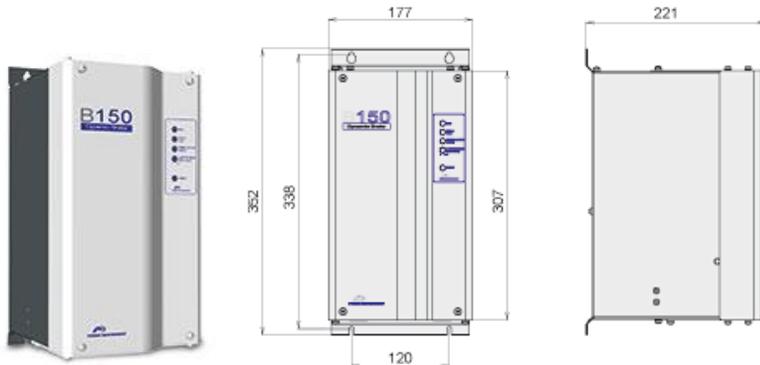
Tarjetas de Comunicaciones



La serie SD700 ofrece una oferta muy completa de interfaces de comunicación, tales como Modbus-RTU, Profibus-DP, Ethernet, DeviceNet, N2 Metasys... Bajo la perspectiva de la simplificación y mejora de las instalaciones, la integración del SD700 en las redes de comunicación, abre aún más las posibilidades de monitorización y gestión tanto del equipo como del sistema.



Módulo de Freno Dinámico B150



La utilización de los frenos dinámicos proporciona a los variadores de velocidad la capacidad de cubrir la regeneración que podría ser experimentada durante la desaceleración de cargas con una elevada inercia (como centrífugas), o bien cargas regenerativas (como la bajada de una grúa de elevación). El sistema de frenado dinámico convierte esta energía regenerativa en calor a través de las resistencias de frenado dinámico, para mantener así el control del motor. El B150 con sus reducidas dimensiones y su gran fiabilidad, es el principal elemento de conmutación de potencia de tales sistemas de frenado dinámico.



CAPÍTULO 3

Análisis de los resultados



3.1 Valoración económica.

La valoración económica de este trabajo se realiza por el método de estimación, que es una de las formas de cálculo económico para estimar los costos. Este es un método bastante utilizado que permite realizar un análisis económico, mostrando la viabilidad o factibilidad económica del trabajo realizado y permitiendo tomar decisiones acerca de la ejecución del proyecto.

3.1.1 Cálculo económico

Se necesita hacer una lista de los componentes y elementos a utilizar para la implementación de los variadores de velocidad (que sería el presupuesto básico) incluyendo en ésta: cantidad, costo por unidad en Euros y equivalente en CUC.

A continuación se muestra una tabla con la lista de los materiales para la implementación de la propuesta (Ver tabla 3.1). Es importante tener en cuenta que los precios en el mercado mundial varían constantemente aunque sean en valores relativamente pequeños.

Nota: para convertir la moneda de Euros (€) a CUC, se multiplica por 1.37; esto se debe a que un Euro equivale a 1.37 CUC.

Tabla 3.1 Listado de componentes a utilizar en la implementación de los variadores de velocidad.

| Elemento | UM | Cant | Costo unitario (€) | Costo total (€) | Costo total (CUC) |
|---|-----|-------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Variador de velocidad (SD70250552) | U | 9 | 35 000.00 | 315 000.00 | 431 550.00 |
| Cable de cobre flexible , aislamiento XLPE, con recubrimiento de PVC, 0.6/1 kV de 4x120 mm ² | Mts | 3 000 | 25.00 | 75 000.00 | 102 750.00 |
| Cable de 19x1,5 mm ² apantallado forro EPR | Mts | 3 000 | 3.00 | 9 000.00 | 12 330.00 |
| Importe total | | | | 399 000.00 | 546 630.00 |

Teniendo en cuenta que para la instalación de los variadores de velocidad se necesita contratar personal calificado y especializado, es necesario hacer la valoración del costo de montaje de los mismos.



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

A continuación se muestra una tabla en la que se relacionan la cantidad de horas a trabajar para realizar el montaje de los variadores de velocidad y las horas totales para el montaje de los mismos, teniendo en cuenta que los variadores a instalar suman 9, se deberán multiplicar por 9 las horas a trabajar en cada una de las labores a realizar (Ver tabla 3.2). Es necesario destacar que estos resultados no son necesariamente oficiales, está en dependencia de la habilidad que tengan los técnicos y de la forma en que se realice el montaje. Vale aclarar que los días de trabajo que se tienen en cuenta están estipulados por 8 horas de trabajo.

Tabla 3.2: Labores a realizar y horas de trabajo para el montaje de los variadores de velocidad

| Labores a realizar | Horas por variador | Horas totales |
|---|--------------------|----------------|
| Tirar los cables de fuerza desde el motor hasta las pizarras eléctricas | 8 | 72 |
| Tirar los cables de control | 8 | 72 |
| Montar los variadores en el local | 4 | 36 |
| Cablear el control | 4 | 36 |
| Programar el variador | 1 | 9 |
| Total de horas a trabajar | 25 | 225 |
| Días de trabajo equivalentes (aproximados) | 3 días | 28 días |

3.1.2 Gasto de salario

Personal a contratar para realizar el montaje de los variadores de velocidad:

| Personal | Salario básico (CUP) | Salario x día (CUP) | Salario x hora (CUP) |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1 Electricista de mantenimiento A | 283.99 | 11.83 | 1.49 |
| 1 Electricista de mantenimiento B | 259.22 | 10.80 | 1.36 |
| 1 Especialista eléctrico general | 365.00 | 15.21 | 1.92 |



Salario en función de las horas a trabajar para el montaje

Electricista de mantenimiento A: \$ 335.25

Electricista de mantenimiento B: \$ 306.00

Especialista eléctrico general: \$ 432.00

Gasto total de salario: \$ 1 073.25

3.1.3 Costo total

El costo total de la inversión sería la suma del pago salarial de los trabajadores (por horas trabajadas) y el importe total que representa la inversión e instalación de los variadores de velocidad. Para realizar esta operación se deberá convertir la moneda de CUC a CUP y para ello se multiplica por 25 que es su equivalente en CUP.

Importe total de la inversión: 546 630.00 CUC

Equivalente en CUC: 13 665 750.00 CUP

Costo total = Gasto de salario + Costo total de inversión

Costo total = \$ 1 073.25 + \$ 13 665 750.00

Costo total = \$ 13 666 823. 25

3.2 Análisis técnico de la explotación de los variadores de velocidad.

La implementación de los variadores de velocidad en el proceso tecnológico del área de los tanques de contacto de la Planta de Lixiviación y la Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara es de gran utilidad, debido a que sus funciones son capaces de garantizar un aprovechamiento eficaz de los motores instalados, son capaces de regular la velocidad del motor en vísperas de mantener el nivel establecido en los tanques de contacto.

3.3 Valoración Social

Todas las medidas que se tomen para disminuir los agentes contaminantes y optimizar el trabajo del equipamiento repercuten en gran medida en la humanización de las condiciones de trabajo



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

del obrero, alargando la vida útil de los accionamientos y disminuyendo la exposición al ruido, las vibraciones y las emisiones de calor, factores que a corto, mediano o largo plazo pueden afectar la capacidad del trabajo físico y mental del hombre.

3.4 Valoración Medioambiental

La aplicación, implementación, instalación o utilización de los variadores de velocidad está abalada por las normas internacionales de seguridad e higiene del trabajo, pues en su funcionamiento no expide al medio ambiente sustancias químicas, ni tóxicas, que puedan afectar la salud de los seres humanos.

Desde el punto de vista ecológico la influencia que puede tener el variador es la contaminación sónica porque al trabajar en conmutación genera oscilaciones, vibraciones, ruido e inyección armónica, sin embargo el principio de trabajo estático le proporciona un trabajo silencioso prácticamente no audible, independientemente de que el valor de la frecuencia de modulación está en el ancho de banda asequible para los seres humanos.

El nivel de vibración mecánica es admisible si se garantiza un adecuado ajuste de las partes y componentes que componen el sistema.

El problema serio del variador, aunque no se vea, es la inyección armónica que causa a la red en que está conectado, independientemente de los filtros que tiene, estos armónicos son causa de sobrecalentamiento y ruido en las líneas provocando también la deformación del valor eficaz de la tensión a frecuencia fundamental.

El impacto visual que causa la implementación del variador, aunque negativo, no es mucho mayor al efecto que causa el arrancador ni mucho menos capaz de transformar el entorno industrial propio de una base de tanques donde la forma, el tamaño y el color de estos variadores son despreciables con respecto al tamaño de los tanques.



CONCLUSIONES GENERALES

El uso de variadores de velocidad:

- Proporciona ventajas de funcionamiento en el momento del arranque disminuyendo la corriente de arranque, los golpes de ariete y la fatiga por impactos mecánicos producidos en los arranques violentos.
- Disminuyen el costo de energía.
- Disminuyen las averías.

Junto con el variador deben escogerse los dispositivos de maniobra y control, pues de nada sirve tener un excelente equipo en la aplicación, si sus accesorios y elementos asociados no cumplen los mismos niveles de calidad y confiabilidad.

Debe tenerse siempre presente que el variador está encaminado a controlar un motor y un proceso; por tanto, su selección nunca podrá ser aislada.

Todas las informaciones reunidas en este trabajo de diploma deben ayudar a hacer una buena elección, dirigiéndose con toda la precisión técnica a los especialistas para seleccionar el variador que ofrezca mejor relación calidad/precio/prestaciones.



RECOMENDACIONES

- Elaborar un proyecto de detalle para la selección de los accesorios aplicados al variador.
- Implementar la solución propuesta.



BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Leyva, D. *Influencia de los armónicos en la eficiencia de los accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa*. Luis Delfín Rojas Purón (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 114 h.

Aparicio, J. L. *Criterios de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1987.

Ávila Pérez, A.R. *Observador de eficiencia para accionamiento con motor de inducción usando agentes difusos con variador de Velocidad Yaskawa*. Luis Delfín Rojas Purón(tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 104 h.

Cano Postigo, I. *Análisis de anomalías en variadores de velocidad*. [s.a]. 32 h.

Clenet Daniel: Cuaderno Técnico nº 208, Arrancadores y Variadores de Velocidad Electrónicos, Original francés: noviembre 2003, Versión española: septiembre 2004.

Cowie, Charles J. (2001). Adjustable Frequency Drive Application Training. Powerpoint presentation. Excerpts donated to Wikipedia by the author.

Fonseca Alpajón, D. *Interfaz para comunicación de sistema SCADA de accionamientos con variadores de velocidad*. Luis Delfín Rojas Purón (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2009. 97 h.

Guía Rápida Frenic Mega: Variadores Multifunción de Altas prestaciones. Documento: SG_MEGA_ES_1.2

Guías de Arranque de variador Toshiba. Nº Documento: 53853-000



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

Leyva Marrero, G. *Metodología para determinar parámetros eléctricos en Variadores de Velocidad*. Osmani Pérez Aballe (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 84 h.

Manual Técnico de Usuario. Edición: Octubre 2007, SD70MT01DE Rev. D

Muhammad H. Rashid. *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Tomo II.

Phipps, Clarence A. (1997). *Variable Speed Drive Fundamentals*. The Fairmont Press, Inc. ISBN 0-88173-258-3.

Power Electronics, Características Técnicas

Selección y Aplicaciones de variadores de velocidad. Aporte de WEG en la selección y aplicación de sistemas de velocidad variable.

Siskind, Charles S. (1963). *Electrical Control Systems in Industry*. New York: McGraw-Hill, Inc.. ISBN 0-07-057746-3.

Spitzer, David W. (1990). *Variable Speed Drives*. Instrument Society of America. ISBN 1-55617-242-7.

Spitzer, David W. (1990). *Variable Speed Drives*. Instrument Society of America. ISBN 1-55617-242-7.

Variadores de Velocidad/ Arrancadores Estáticos: Aplicaciones y Documentos Técnicos.
Documento N° 4218.021 Rev A

Campbell, Sylvester J. (1987). *Solid-State AC Motor Controls*. New York: Marcel Dekker, Inc.. ISBN 0-8247-7728-X.



REFERENCIAS

- Campbell, Sylvester J. (1987). *Solid-State AC Motor Controls*. New York: Marcel Dekker, Inc.. ISBN 0-8247-7728-X.
- Cowie, Charles J. (2001). *Adjustable Frequency Drive Application Training*. Powerpoint presentation. Excerpts donated to Wikipedia by the author.
- Jaeschke, Ralph L. (1978). *Controlling Power Transmission Systems*. Cleveland, OH: Penton/IPC.
- Phipps, Clarence A. (1997). *Variable Speed Drive Fundamentals*. The Fairmont Press, Inc. ISBN 0-88173-258-3.
- Siskind, Charles S. (1963). *Electrical Control Systems in Industry*. New York: McGraw-Hill, Inc.. ISBN 0-07-057746-3.
- Spitzer, David W. (1990). *Variable Speed Drives*. Instrument Society of America. ISBN 1-55617-242-7.

- [1] Abrahamsen, 2000
- [8] Bodson, 1994
- [32] P. Famouri y otros, 1991
- [34] García y otros, 1992
- [37] Harnerfors, 1997
- [39] Hsu y otros, 1998
- [45] D.S. Kirschen y otros, 1984
- [47] A. Kusko y. D. Galler 1983
- [62] Moreno Eguilaz, 1997
- [65] Ramírez, 1998
- [73] S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit (1992)
- [74] P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans.
- [81] M.H. Park y S.K. Sul, 1984
- [96] Vas, 2001



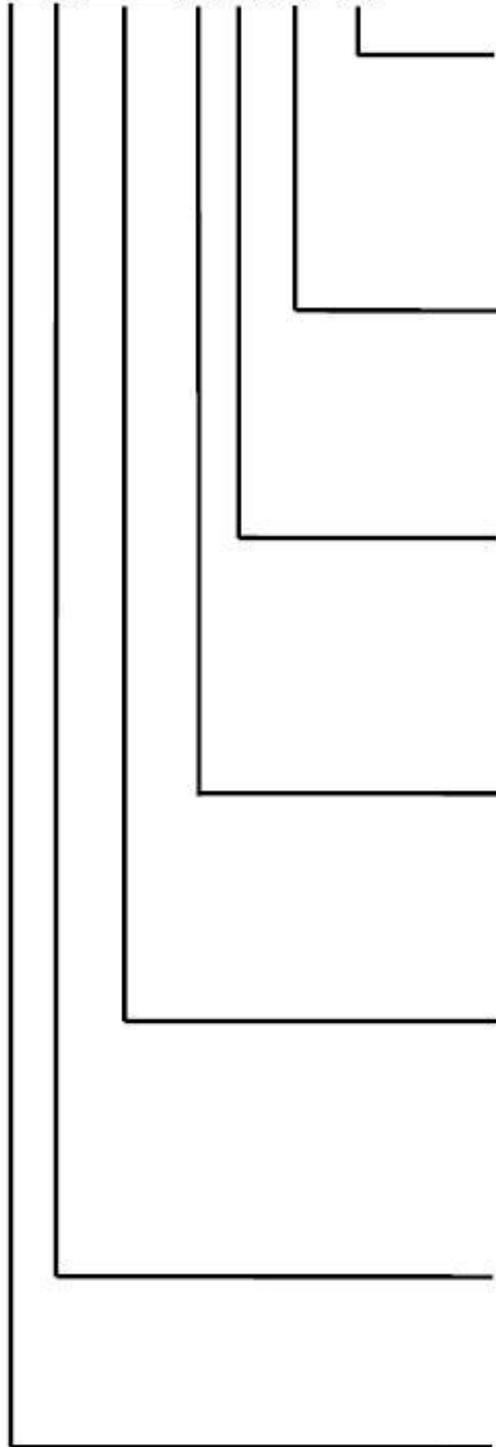
Anexo # 2: Sección del catálogo para la selección del variador de velocidad

| 380Vac to 500Vac (-20% to +10%) | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|--|---------------------------|--------------------|--|---------------------------|--------------------|
| TALLA | CÓDIGO | TEMPERATURA TRABAJO 50°C CARGA PESADA | | | TEMPERATURA TRABAJO 40°C CARGA NORMAL | | |
| | | I(A) Nominal | Power (kW) a 400Vac | 150% Sobrecarga | I(A) Nominal | Power (kW) a 400Vac | 120% Sobrecarga |
| 1 | SD70006 5x x xx | 6 | 2,2 | 9 | 7,5 | 4 | 9 |
| | SD70007 5x x xx | 7,5 | 3 | 11 | 9 | 4 | 11 |
| | SD70009 5x x xx | 9 | 4 | 14 | 11 | 5,5 | 14 |
| | SD70012 5x x xx | 12 | 5,5 | 18 | 15 | 7,5 | 18 |
| | SD70018 5x x xx | 18 | 7,5 | 27 | 23 | 11 | 27 |
| | SD70024 5x x xx | 24 | 11 | 36 | 30 | 15 | 36 |
| 2 | SD70032 5x x xx | 32 | 15 | 48 | 40 | 18,5 | 48 |
| | SD70038 5x x xx | 38 | 18,5 | 57 | 48 | 22 | 57 |
| | SD70048 5x x xx | 48 | 22 | 72 | 60 | 30 | 72 |
| 3 | SD70060 5x x xx | 60 | 30 | 90 | 75 | 37 | 90 |
| | SD70075 5x x xx | 75 | 37 | 113 | 94 | 45 | 113 |
| 4 | SD70090 5x x xx | 90 | 45 | 135 | 113 | 55 | 135 |
| | SD70115 5x x xx | 115 | 55 | 173 | 144 | 75 | 173 |
| | SD70150 5x x xx | 150 | 75 | 225 | 188 | 90 | 225 |
| | SD70170 5x x xx | 170 | 90 | 255 | 213 | 110 | 255 |
| 5 | SD70210 5x x xx | 210 | 110 | 315 | 263 | 132 | 315 |
| | SD70250 5x x xx | 250 | 132 | 375 | 313 | 150 | 375 |
| 6 | SD70330 5x x xx | 330 | 160 | 495 | 413 | 220 | 495 |
| | SD70370 5x x xx | 370 | 200 | 555 | 463 | 250 | 555 |
| | SD70460 5x x xx | 460 | 250 | 690 | 575 | 300 | 690 |



Anexo # 3: Catálogo para la selección del modelo del variador según sus características específicas

SD 7 0115 5 2 1 12



| CÓDIGO | NÚMERO PULSOS |
|--------|---------------|
| - | 6 Pulsos |
| 12 | 12 Pulsos |
| 18 | 18 Pulsos |

| CÓDIGO | FILTRO |
|--------|------------------------|
| 1 | Filtro primer entorno |
| 2 | Filtro segundo entorno |

| CÓDIGO | GRADO PROTECCIÓN |
|--------|-----------------------|
| 0 | Grado protección IP00 |
| 2 | Grado protección IP20 |
| 5 | Grado protección IP54 |

| CÓDIGO | TENSIÓN ALIMENTACIÓN |
|--------|----------------------|
| 5* | 380 – 500Vac |
| 6 | 550 – 690Vac |

| CÓDIGO | INTENSIDAD |
|--------|------------|
| 0115 | 115A |
| 0330 | 330A |
| ... | ...A |

| CÓDIGO | MODELO |
|--------|--------|
| 7 | 700 |

| CÓDIGO | SERIE |
|--------|--------|
| SD | SDRIVE |



Anexo # 4: Características técnicas del variador de velocidad SD700

| ENTRADA | |
|-----------------------------|---|
| Tensión de alimentación | 230Vac ($\pm 20\%$) 380-500Vac (-20% a +10%) Trifásico 525Vac (-20% a + 10%) 690Vac (-15% a +10%) Trifásico |
| Frecuencia de alimentación | de 48 a 62 Hz |
| Intensidad de entrada | \leq Intensidad de salida |
| Factor potencia fundamental | $\geq 0,98$ |
| Factor potencia | $\leq 0,91$ |
| Pérdida de suministro | > 2seg. (depende de la carga) |
| Filtro EMC de Entrada | Segundo entorno límite 3 y 4 Primer entorno límite 1 y 2 opcional integrado |
| Filtro Armónicos | Bobinas de choque 3% impedancia |

| SALIDA | |
|--------------------------------------|--|
| Tensión de salida | 0V a Ventrada - 0.75% @100% carga (Tallas 1 y 2) 0V a Ventrada - 3% @100% carga (Tallas 3 a 11) |
| Frecuencia de salida | 0 a $\pm 250\%$ |
| Intensidad de sobrecarga | 150% durante 60 seg a 50°C |
| Eficiencia a plena carga | >97% |
| Potencia motor (kW) | 50 a 150% del SD700 |
| Tensión del motor | 5 a 500Vac |
| Método de Control | Control Vectorial Sin Encoder (Sensorless, Lazo Abierto) Control Vectorial Lazo Cerrado y V/Hz |
| Frecuencia de modulación | 4 a 8kHz - PEWave |
| Filtro dV/dt de Salida | 500 a 800V/ μ s (según potencias) |
| Longitud Cable Salida ⁽¹⁾ | Hasta 300 metros no apantallado Hasta 150 metros apantallado |
| Unidad de frenado dinámico | Integrado en tallas 1 y 2 |

| CONDICIONES AMBIENTALES | |
|----------------------------|------------------------------------|
| Temperatura ambiente | -30°C a +50°C |
| Altitud | 1.000 m |
| Factor pérdida por altitud | >1.000m, 1% cada 100m; 3.000m máx. |
| Grado de protección | IP00 ⁽²⁾ , IP20 e IP54 |
| Humedad relativa | <95%, sin condensación |
| Protección display | IP54 |

| PROTECCIONES DEL MOTOR | |
|---|--|
| Rotor bloqueado | |
| Sobrecarga motor (modelo térmico) | |
| Desequilibrio de tensión y corriente de fases | |
| Sobrettemperatura motor (PTC, estado normal 85R-2k Ω) | |
| Límite de velocidad | |
| Límite de par | |



| PROTECCIONES DEL VARIADOR | |
|--|--|
| Límite de corriente de salida | |
| Sobrecorriente | |
| Sobrecarga en los IGBTs | |
| Perdida de fase a la entrada | |
| Alta tensión a la entrada | |
| Baja tensión de entrada | |
| Límite de voltaje en el Bus | |
| Baja tensión del Bus | |
| Alta frecuencia de alimentación | |
| Baja frecuencia de alimentación | |
| Temperatura IGBT | |
| Temperatura en el radiador | |
| Fallo de la fuente de alimentación | |
| Modelo térmico equipo | |
| Fallo Software y Hardware | |
| Fallo a tierra | |
| Pérdida de la señal de entrada analógica (pérdida de referencia) | |
| Otras especificaciones ver manual técnico de la Serie SD700 | |

| ENTRADAS DIGITALES | |
|---|--|
| 6 entradas digitales configurables y activas a nivel alto (24Vdc) | |
| 1 entrada para PTC: | "k" = Condiciones correctas La resistencia de la PTC está en un valor comprendido entre $90\Omega \pm 10\%$ y $1K5 \pm 10\%$ "F" = Posible cortocircuito en el cableado. La resistencia de la PTC es inferior a $90\Omega \pm 10\%$, ó la temperatura es excesiva en motor, la resistencia de la PTC es superior a $1K5 \pm 10\%$ |
| 1 entrada digital de programación | (control mediante jumper, provoca un fallo al ser desconectado evitando situaciones peligrosas en la programación) |
| Otras características: | Fuente de alimentación aislada |

| ENTRADAS ANALÓGICAS | |
|---|--|
| 2 entradas analógicas configurables y diferenciales | |
| Rangos de trabajo | Señal de corriente: 0-20mA, 4-20mA Señal de tensión: 0-10Vdc, ± 10 Vdc, diferencial full duplex |

| SALIDAS DIGITALES | |
|---|--|
| 3 relés conmutados configurables multifunción: 250Vac, 8A ó 30Vdc, 8A | |
| Ajuste por defecto | Salida relé 1: Sin fallo Salida relé 2: Fallo equipo Salida relé 3: Marcha (Run) |

| SALIDAS ANALÓGICAS | |
|---|--|
| 2 salidas analógicas configurables en tensión o corriente: 0-20mA, 4-20mA, 0-10Vdc y ± 10 Vdc | |

| COMUNICACIONES | |
|-------------------|--------------|
| Hardware de serie | Puerto USB |
| | Puerto RS232 |
| | Puerto RS485 |
| Hardware Opcional | Fibra óptica |
| | Ethernet |



Trabajo de Diploma: Estudio para implementación de variadores de velocidad

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Protocolos de serie | Modbus-RTU |
| Protocolos Opcionales | Profibus |
| | DeviceNet |
| | Ethernet (Modbus TCP) |
| | Ethernet IP |
| | N2 Metasys |

PANEL DE CONTROL

| | |
|----------------------|---|
| Tipo | Extraíble |
| Distancia | 3 metros ⁽³⁾ |
| Conexión | RJ45 |
| Display alfanumérico | 4 líneas de 16 caracteres cada una |
| Leds de indicación | LED1 ON, el variador recibe alimentación |
| | LED2 RUN, encendido, el motor recibe alimentación |
| | LED3 FAULT, intermitente indica que el equipo está en fallo |
| Teclado membrana | 6 Teclas para control y configuración del equipo, marcha y paro/reset |
| | Memoria independiente |
| Display gráfico | Opción de Display gráfico y táctil de 3,5 pulgadas |
| | Memoria independiente |

VISUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN

| |
|---|
| Intensidad media y de las tres fases del motor |
| Tensión media y de las tres fases del motor |
| Tensión media y de las tres fases de alimentación |
| Velocidad, Par, Potencia, Coseno phi del motor |
| Estado de los relés |
| Estado de las entradas digitales/PTC |
| Estado de la salida de los comparadores |
| Valor de las entradas analógicas y sensores |
| Valor de las salidas analógicas |
| Estado de sobrecarga motor y equipo |
| Temperatura del IGBT |
| Frecuencia de alimentación al motor |
| Histórico de fallos |

OTROS

| |
|---------------------|
| Reloj horario |
| Calendario perpetuo |

CERTIFICACIÓN

| |
|---|
| CE, cTick, UL ⁽⁴⁾ , cUL ⁽⁴⁾ |
|---|

- (1) Posibilidad de incrementarla dependiendo del tipo de cable utilizado
- (2) Consultar disponibilidad con Power Electronics
- (3) Posibilidad de incrementar la longitud. Consultar con Power Electronics
- (4) En proceso