

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Variadores de frecuencia para bombas de jugo
mezclado en la Empresa Azucarera Carlos Baliño**

Autor: Roberto González Lemus

Tutor: Msc.Lesyani León Viltre

Santa Clara

2014

"Año 56 de la revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Variadores de frecuencia para bombas de jugo
mezclado en la Empresa Azucarera Carlos Baliño**

Autor: Roberto González Lemus

Tutor: Msc.Lesyani León Viltre

Profesora Auxiliar Dpto. Electroenergética UCLV

lesyani@uclv.edu.cu

Santa Clara

2014

"Año 56 de la revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Eléctrica, autorizo a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

***LA OBRA HUMANA MÁS BELLA ES LA DE SER ÚTIL
AL PRÓJIMO.....
SÓCRATES***

DEDICATORIA

EL FRUTO DE ESTOS LARGOS AÑOS DE ESTUDIOS QUIERO DEDICÁRSELOS A:

A MI FAMILIA QUE SIEMPRE ESTÁ A MI LADO, A MIS AMIGOS DE ANTES Y DESPUÉS DE COMENZAR MIS ESTUDIOS UNIVERSITARIOS, A TODO AQUEL QUE CONFIÓ EN MÍ Y TAMBIÉN A MUCHAS PERSONAS QUE PENSARON QUE NO LLEGARÍA AL FINAL DE ESTE LARGO CAMINO.

AGRADECIMIENTOS

QUIERO AGRADECER ESTE GRANDIOSO RESULTADO A:

- MI FAMILIA.

- A LOS AMIGOS Y AMIGAS QUE DEMOSTRARON QUE ME QUIEREN DE VERDAD.

- A MI TUTORA QUE SE ESFORZÓ JUNTO A MÍ, PARA LOGRAR UN RESULTADO SATISFACTORIO.

- Y A TODO AQUEL QUE DE UNA FORMA U OTRA APORTÓ SU GRANO DE ARENA EN ESTA OBRA.

TAREA TÉCNICA

- 1) El estudio de los principales aspectos teóricos relacionados con los variadores de frecuencia y los motores asíncronos.
- 2) El estudio de las principales características del variador de frecuencia Mitsubishi serie FR-F700.
- 3) Diseño e implementación de los circuitos de fuerza y control para el accionamiento de bombas de jugo.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el central azucarero Carlos Baliño, en Santo Domingo, Villa Clara, las bombas de jugo mezclado para extraer el guarapo de la caña no contaban con un accionamiento que posibilitara la variación de la velocidad de las máquinas, por lo que se hacía mecánicamente estrangulando las válvulas de salida.

En el presente trabajo se propone un variador de frecuencia Mitsubishi serie FR-F700 para variar la velocidad de las bombas de jugo lo que posibilita un ahorro energético de un 25 por ciento. Se diseñan además, los circuitos de fuerza y control de este accionamiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ASPECTOS TEÓRICOS RELACIONADOS CON LAS BOMBAS, TIPOS DE ARRANQUES Y VARIADORES DE FRECUENCIA	5
1.1 Generalidades de las bombas.....	5
1.1.1 Bombas centrifugas	5
1.1.2 Pérdidas en las bombas.....	8
1.2 Arranque de motores asincrónicos.....	12
1.2.1 Arranque directo	13
1.2.2 Arranque con resistencia en serie con estator	15
1.2.3 Arranque con reactancias en el estator.....	16
1.2.4 Arranque con autotransformador.....	16
1.2.5 Arranque estrella-delta	17
1.2.6 Arranque con resistencias en el rotor	20
1.2.7 Arranque electrónico.....	21
1.3 Concepto y definiciones básicas de los variadores de frecuencia	21
1.4 Consideraciones finales del capítulo	28
CAPÍTULO 2. Diseño del arranque de las bombas de jugo con variadores	27
2.1 Análisis del arranque de las bombas que existían anteriormente utilizando autotransformadores.....	28
2.2 Diseño del arranque de las bombas de jugo con variadores de frecuencia Mitsubishi serie 700	29
2.3 Explicación del circuito de control, fuerza y panel para las bombas con el variador de frecuencia Mitsubishi serie 700	31

2.4	Consideraciones finales del capítulo.....	34
CAPÍTULO 3. Resultados y discusión		35
3.1	Conexión eléctrica automática- convertidor de frecuencia.....	36
3.1.1	Comunicación serie	36
3.1.2	Bus 485	37
3.1.3	Supervisión	37
3.1.4	Lista de parámetros.....	37
3.2	Valoraciones económicas	38
3.3	Consideraciones finales del capítulo.....	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		41
Conclusiones		41
Recomendaciones		41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		42
Anexos		44
Anexo I		44
Anexo II		45
Anexo III.....		46
Anexo IV.....		47
Anexo V		48
Anexo VI.....		49
Anexo VII		50
Anexo VIII.....		51

INTRODUCCIÓN

La automatización agroindustrial juega un papel fundamental en los procesos productivos y para los cuales el país realiza grandes inversiones, de ahí que el empleo de los variadores de frecuencia se realiza con el fin de mejorar tecnológicamente e incrementar el ahorro energético para ello se han instalado en los paneles de los equipos de bombeo de jugo mezclado que intervienen en el proceso de fabricación del azúcar en determinados centrales azucareros, lo cual ha tenido resultados satisfactorios para las empresas.

Inicialmente, de forma general, los variadores de frecuencia se utilizaban para mejorar los lazos de regulación automático de alimentación de bagazo de las calderas contribuyendo a una mejor combustión de las mismas y sustituyendo además la tecnología obsoleta.

En la industria azucarera existen motores eléctricos sobredimensionados a las potencias necesarias que por su costo son imposibles de sustituir y con el uso de esta tecnología se ahorra energía eléctrica lográndose mayor eficiencia.

Con objetivo de reducir la energía consumida en elevar cada unidad de volumen de agua, se adapta la altura de elevación a la que demanda la red mediante la modificación de las velocidades de giro de la bomba. La regulación de la velocidad de giro la realizan los convertidores de frecuencia. Estos últimos, en caso de contar con la señal de un transductor de presión, pueden regular automáticamente la altura de elevación. Asimismo, en caso de que todas las bombas dispongan de convertidor de frecuencia, se busca que éstas trabajen con mejor rendimiento que si no

dispusiesen de él. En este caso la introducción del rendimiento de los convertidores de frecuencia actúa en sentido contrario al perseguido.

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren bombas y que haciendo uso de los controles de frecuencia (variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía. Los sistemas de velocidad variables se pueden aplicar en aquellos sistemas en donde se requiere regular el flujo a diferentes cargas. Los organismos operadores de agua potable tienen un gran potencial de ahorro de energía mediante la aplicación de velocidad variable a sus sistemas de bombeo directo a la línea, ya que éste es el caso donde la carga es variable.

En muchas ocasiones es preciso trabajar durante mucho tiempo en condiciones de caudal inferiores al nominal. En esta situación se pueden realizar planteamientos que permitan ahorros energéticos considerables, implantando el sistema de regulación de caudal más apropiado.

A partir de esta situación que se describe anteriormente se define el siguiente **problema científico**:

¿Cómo modernizar el sistema de control de las bombas de jugo mezclado en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Central Azucarero Carlos Baliño, para lograr mayor ahorro energético, aumentar la calidad del azúcar y reducir las cuantiosas fallas del proceso existentes en la actualidad?

Para dar solución al problema científico, se ha planteado como **objetivo general** de esta tesis: Modernizar el sistema de control de las bombas de jugo en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Central Azucarero Carlos Baliño, empleando variadores de frecuencia, para aumentar el rendimiento del proceso.

Como **objetivos específicos** se tienen:

- ❖ Profundizar en la teoría relacionada con los variadores de frecuencia y los diferentes tipos de arrancadores de motores.

- ❖ Realizar un estudio sobre las características del variador de frecuencia Mitsubishi serie FR-F700.
- ❖ Implementar el circuito de fuerza y control para el accionamiento de las bombas de jugo.

Con la aplicación del presente trabajo, se pretenden como resultados: aumentar el rendimiento del sistema de bombeo para la obtención de azúcar y mieles. Con la propuesta que se presenta para el sistema de control del motor, basados en experiencias de trabajos similares, se reducen las paradas del proceso por las cuantiosas fallas existentes y al existir una variación de velocidad, se logra un mayor ahorro energético. En tanto, los resultados de este trabajo poseen una aplicabilidad práctica y una influencia positiva en la economía cubana, al ser posible su implementación en centrales de todo el país. La viabilidad de la investigación es apreciable porque se dispone del equipamiento adecuado y conocimientos técnicos por parte de personal calificado para la total ejecución del proyecto.

Organización del informe

El informe final está estructurado de la siguiente manera: la presente introducción, a la que siguen, en el mismo orden, capitulario, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Los temas abordados en cada uno de los capítulos son:

Capítulo 1: Revisión bibliográfica relacionada con las bombas, tipos de arranque y variadores de frecuencia. Se aborda un primer tema relacionado con las diferentes tipos de bombas, los diferentes tipos de arranques eléctricos existentes, así como su control, conceptos y definiciones básicas de variadores de frecuencia.

Capítulo 2: Diseño del arranque de las bombas de jugo con variadores.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Al final se ofrecen un conjunto de conclusiones y recomendaciones útiles para los interesados en el tema.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS TEÓRICOS RELACIONADOS CON LAS BOMBAS, TIPOS DE ARRANQUES Y VARIADORES DE FRECUENCIA

En este capítulo se abordarán los principales aspectos teóricos relacionados con el funcionamiento de las bombas y los variadores de frecuencia.

1.1 Generalidades de las bombas

Debido a la diversidad de bombas que existen, hay muchas formas de clasificarlas, como por ejemplo: por rangos de volúmenes a manejar, por fluidos a mover, etc. Sin embargo, la clasificación más general es en función de la forma en que las bombas imprimen el movimiento al fluido, separándose en un tipo principal: centrífugas, y en ella concentraremos éste estudio.

La clasificación anterior, nos permite apreciar la gran diversidad de tipos que existen y si a ello agregamos materiales de construcción, tamaños diferentes para manejo de gastos y presiones sumamente variables y los diferentes líquidos a manejar, etc., entenderemos la importancia de este tipo de maquinaria.[1]

1.1.1 Bombas centrífugas

Si tenemos un cubo lleno de agua atado al extremo de una cuerda, y lo ponemos a girar, el agua contenida en el cubo permanecerá ahí, pegándose al extremo del cubo con una fuerza originada por la velocidad rotacional. Esa es la fuerza centrífuga, y es la base del principio de operación de las bombas centrífugas.

Imaginando un impulsor en reposo dentro del agua. Si dicho impulsor se pone a girar, el agua saldrá impulsada por entre los álabes del mismo. A medida que el agua es arrojada fuera de los álabes, más agua llega al centro del impulsor, por ser ésta la zona de menor presión; por ello es ahí donde generalmente se coloca la solución.

Al continuar girando el impulsor, más agua es expulsada y más agua llega al centro del impulsor, manteniéndose así un flujo continuo, sin variaciones de presión; éstas son las características principales de las bombas centrífugas. Si el impulsor se coloca dentro de un envoltorio o carcasa, el flujo es dirigido hacia donde es requerido, para lograr de esta manera el objetivo deseado que puede ser:

- Dobleacción
- Simple vapor
- Doble pistón
- Reciprocantesembolo
- Simple acción simple
- Doble acción - doble potencia
- Triple
- Múltiple
- Desplazamiento positivo
- Diafragma simple operadaporfluido
- Múltipleoperaciónmecánica
- Aspa
- Pistón
- Rotor simple miembro flexible
- Tornillo

El impulsor es el corazón de la bomba centrífuga, pues es el componente que imprime la velocidad al fluido; consiste en un cierto número de aspas o álabes curvados con una forma tal que permite un flujo continuo del fluido a través de ella.

El diseño de los impulsores se hace en función del fluido a bombear, pudiendo ser abiertos, semicerrados y cerrados.

La carcasa de una bomba centrífuga, también con la posibilidad de ser de diferentes diseños, tiene la función de hacer la conversión de energía cinética o de velocidad que se imparte al fluido por el impulsor, en energía de presión o potencial. Existen dos tipos básicos de carcasas: de tipo espiral y de tipo difusor.

En las carcasas de tipo espiral, el impulsor descarga el fluido en un área que se expande gradualmente, disminuyendo así la velocidad para irse convirtiendo en energía de presión.

La carcasa de tipo difusor, se basa en unas guías estacionarias con una trayectoria definida, que va ampliando el área desde el impulsor hacia la propia carcasa, haciendo también la conversión de energía cinética (velocidad) a energía potencial en el flujo (presión). Este tipo de carcasa es más utilizado en bombas de varias etapas.

Si la combinación de carga (presión que se tiene que vencer con la bomba) que se requiere es mayor de la que se puede desarrollar con un solo impulsor, se puede hacer una combinación de ellos, con el flujo en serie donde el primer impulsor descarga a la succión del segundo, y así sucesivamente; en éstos casos el gasto se mantiene constante a lo largo de los distintos impulsores, pero la presión va adicionándose de impulsor en impulsor. Estas bombas se conocen como multi-etapas o de varias etapas.

A diferencia de otros tipos de bombas, las centrífugas, operando a velocidad constante proporcionan un flujo desde cero (0) hasta su valor máximo, en función de la carga, diseño propio y condiciones de succión.

Existen curvas características, típicas, de bombas centrífugas, donde se puede interrelacionar la presión de descarga (carga), capacidad, potencia requerida y eficiencia de operación de la bomba.[1]

La presión requerida del sistema se obtiene de la combinación de la carga estática más la presión diferencial del sistema. La curva de pérdidas de fricción es la suma de las pérdidas producidas en tuberías, conexiones y válvulas. Ya que la carga por fricción varía en proporción cuadrática al flujo, la curva característica es generalmente una parábola. Analizando en forma sobrepuesta las curvas de capacidad - carga de la bomba con la carga del sistema, se obtienen los puntos de capacidad y carga en las cuales la bomba podrá operar para ese sistema en particular.

Algunas de las características de estas bombas son las siguientes:

- Descarga de flujo continuo, sin pulsaciones.
- Puede bombear todo tipo de líquidos, sucios abrasivos, con sólidos, etc.
- Altura de succión máxima del orden de 4.5 metros de columna de agua.
- Rangos de presión de descarga hasta de 150 kg/cm².
- Rangos de volúmenes a manejar hasta de 20,000 m³/hr.

1.1.2 Pérdidas en las bombas

Toda la carga de una bomba centrífuga se genera en el impulsor. El resto de las partes no contribuyen a la creación de presión, sin embargo contribuyen a pérdidas que son inevitables, hidráulicas, mecánicas y fugas. Todas las pérdidas de carga entre los puntos de succión y descarga, constituyen las pérdidas hidráulicas (Eh). [2]

$$Eh = \frac{H}{H_i} = \frac{H_i - \text{pérdidas hidráulicas}}{H_i} \quad (1)$$

H; H_i las pérdidas de carga entre los puntos de succión y descargas.

La capacidad disponible de una bomba de descarga, es menor que el flujo que pasa a través del impulsor, debido a la recirculación interna que ocurre por los claros entre el impulsor y la carcasa. La relación entre los dos es la llamada eficiencia volumétrica.

$$Q/Q_i = Q/(Q + Q_l) = ev \quad (2)$$

QL- recirculación interna, e_v - eficiencia volumétrica.

Las pérdidas mecánicas incluyen en la pérdida de energía en baleros o chumaceras; sellos o estoperos y fricción del impulsor con el fluido. La eficiencia mecánica es la relación que existe entre la potencia entregada al impulsor y convertida a carga de la bomba, con respecto a la potencia entregada en la flecha.

$$E_m = (BHP - \text{pérdidas mecánicas})/BHP \quad (3)$$

La eficiencia Total de la Bomba es:

$$e = e_h \cdot e_v \cdot e_m \quad (4)$$

Las pérdidas en bombas pueden ocurrir en uno o varios de los lugares siguientes:

- Fugas internas entre el impulsor y la carcasa, principalmente en el ojo del impulsor.
- Fugas internas en pasos adyacentes de bombas multi-etapas.
- Fugas por los estoperos.
- Fugas a través de dispositivos internos para balancear empuje axial.
- Fugas a través de bujes de alivio, cuando se usan para reducir la presión en estoperos.
- Fugas a través de álabes del impulsor en impulsores abiertos.
- Fugas a través de chumaceras y estoperos, para efectos de enfriamiento.

Pérdidas por fricción en el disco del impulsor. Es la pérdida mecánica más importante de una bomba centrífuga. Se reduce cuando se utilizan impulsores pulidos, y las paredes de la carcasa con acabado superficial suave.

Pérdidas mecánicas por fricción en chumaceras y estoperos. Las pérdidas en estoperos dependen del arreglo, tamaño y lubricación empleada. Las pérdidas en chumaceras dependen del tipo de resistencia al empuje axial usado, así como de la carga axial recibida. En bombas pequeñas estas pérdidas pueden ser del orden de 2 a 3% de la potencia manejada por la bomba; en las bombas multi-etapas de alta velocidad, no exceden de 1%.

Fenómeno de Cavitación

El término cavitación, se refiere a ciertas condiciones dentro de la bomba, cuando debido a una pérdida de presión localizada, el fluido manejado hierve en ese punto, formando burbujas o cavidades llenas de vapor. Esas cavidades desaparecen cuando las burbujas llegan a regiones de la bomba con mayor presión. La cavitación puede ocurrir a lo largo de partes estacionarias de la carcasa o sobre el impulsor. La reducción de la presión absoluta por debajo de la presión del fluido puede ser generalizada en la bomba, o solamente local.[2]

Cuando la reducción es generalizada, puede ser resultado de:

- Un decremento en la presión absoluta del sistema cuando se está bombeando de un recipiente.
- Obstrucciones en la succión que provoca incremento en las pérdidas.
- Un incremento en la temperatura del fluido en la succión.

Cuando la reducción es local:

- Un incremento en la velocidad.
- Al resultado de cambios de velocidad en el flujo, distorsiones en el mismo, cuando hay un cambio repentino en la dirección el flujo.

La cavitación se nota por ruido y vibración, una disminución en la carga y capacidad de la bomba, así como en la eficiencia y produce erosión, en los álabes de los impulsores.

A continuación se muestra un ejemplo del comportamiento de las bombas, con y sin control de velocidad. En la figura 1 (a) y 1 (b) se muestran los resultados correspondientes a una bomba centrífuga. A pesar de que el rendimiento de los convertidores de frecuencia es menor que la unidad, con objeto de distinguir entre la disminución de la energía consumida por el empleo de bombas de velocidad variable y entre el incremento originado por la intervención del convertidor de frecuencia, este último se ha considerado unitario. Además, también se han representado los puntos de cambio de la combinación de bombas óptima.[3]

Han sido determinados con el criterio de energía consumida mínima.

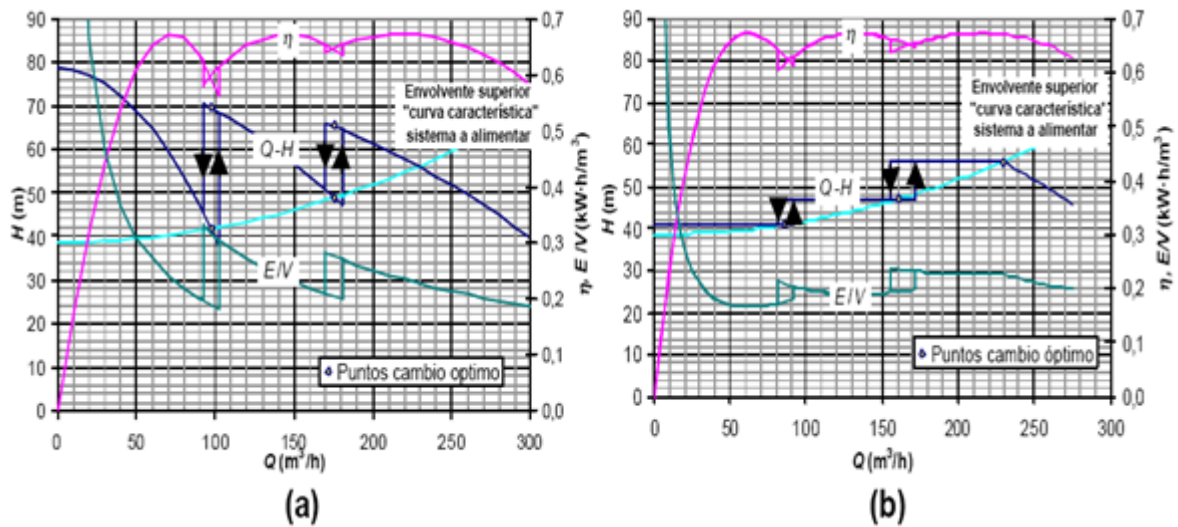


Figura1: Curvas $H(Q)$; $\eta(Q)$ y $E_v(Q)$ de dos sistemas de elevación con tres bombas de velocidad de giro. a) Todas fijas; (b) todas variables mediante convertidores de frecuencia.

Se aprecia que las tres curvas cambian, aunque las que lo hacen significativamente son $H(Q)$ y consecuentemente $E_v(Q)$. La diferencia de energía consumida entre ambos casos es importante para caudales pequeños mientras que no lo es para los caudales mayores.

Se aprecia que, en el caso 1(b), el consumo de energía es menos dependiente del caudal demandado y además mínimo. No obstante, el rendimiento del convertidor de frecuencia puede ocasionar que el consumo energético para caudales grandes sea mayor con convertidores de frecuencia que sin ellos.

Asimismo, se aprecia que el valor de caudal por debajo del cual E_v es considerablemente elevado se ve reducido al emplear convertidores de frecuencia. Por lo tanto, el intervalo de uso de la red se ve incrementado para los caudales menores.

Por otro lado, debido a que los convertidores de frecuencia regulan la altura de elevación automáticamente, tiene interés el determinar, en función de las bocas

abiertas en un determinado momento, la presión a regular, caso en el que el ahorro de energía sería aún más importante. Para ello, deben combinarse las técnicas de telecontrol, las de predicción del funcionamiento de redes con sus llaves automáticas de control y, por supuesto, las de análisis del funcionamiento de estaciones de bombeo. [3]

1.2 Arranque de motores asincrónicos

En la figura 2 se observa la imagen de un motor asincrónico jaula de ardilla.



Figura 2: Imagen de un motor asincrónico.

El arranque de un motor asincrónico o de inducción se produce en el momento en que se conecta el motor a la red de alimentación. En este instante de tiempo el motor consume la máxima corriente y desarrolla un par que depende del voltaje aplicado al estator, además de otros parámetros.

La corriente de arranque en los motores trifásicos puede oscilar entre un cuatro y siete por ciento de la corriente nominal dependiendo del tipo de motor. Esta alta corriente se mantiene solo por un pequeño intervalo de tiempo, por lo que el efecto calorífico provocado por ella no es de consideración para el motor. Sin embargo, esta alta corriente provoca grandes caídas de voltaje en las líneas que alimentan el

motor que pueden afectar a otros equipos conectados a las mismas, como por ejemplo: equipos de iluminación.

Por otro lado, muchos dispositivos y equipos se conectan a la alimentación a través de dispositivos sensibles al voltaje, como pueden ser los contactores magnéticos.

Por todo lo anterior se hace necesario aplicar algún método que permita reducir esta alta corriente en el arranque. No obstante es necesario aclarar que, en función de la potencia del motor, este podrá ser arrancado sin usar ningún elemento adicional, lo que se conoce como arranque directo.[5]

Los métodos de arranque pueden clasificarse de la siguiente forma:

Por reducción del voltaje:

- Inserción de resistencia en serie con el estator.
- Inserción de reactancia en serie con el estator.
- Utilización de un compensador o autotransformador
- Arranque estrella-delta

Variando otros parámetros:

- Aumento la resistencia en serie con el rotor (solo para motores de rotor bobinado)
- Rotores especiales (doble jaula y ranura profunda)
- Técnicas modernas basadas en la electrónica de potencia.

A continuación se comentarán las técnicas más utilizadas para el arranque de motores eléctricos de inducción.

1.2.1 Arranque directo

El arranque directo consiste en conectar directamente el bobinado del motor a la red, según se observa en la figura 3. El motor arrancará con sus características nominales, produciendo un pico de intensidad.

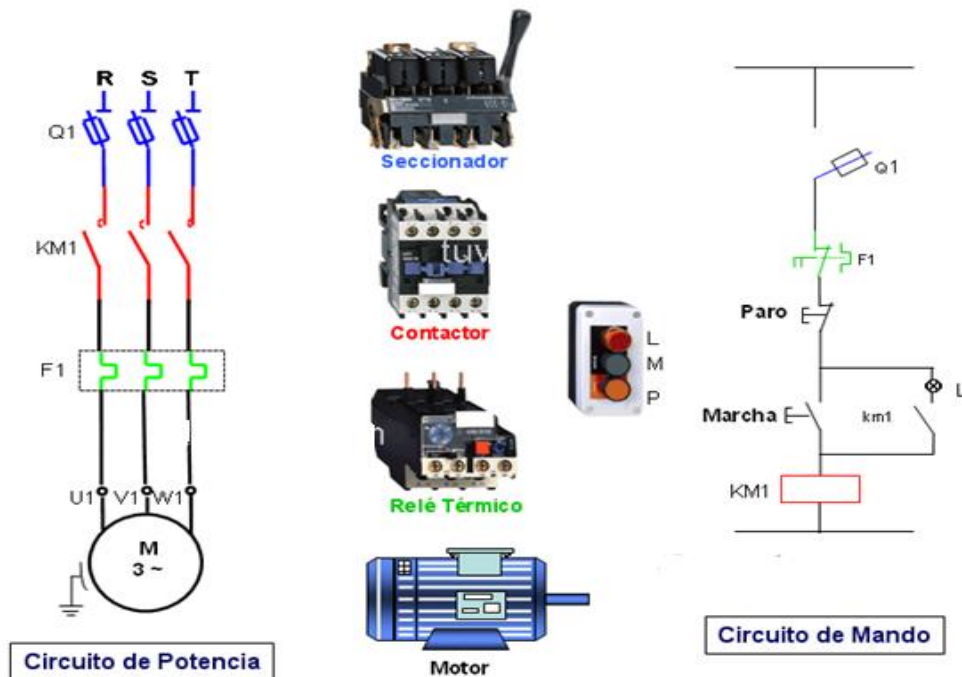


Figura3: Circuito del arranque directo.

Este método de arranque es muy adecuado si el pico de intensidad es tolerable y el par resistente es menor que el par de arranque. Esta forma de arrancar el motor permite hacerlo a plena carga, siempre y cuando la red aguante el pico de intensidad.

Este método de arranque es indicado para motores de baja potencia, de hasta 5 kW. Los motores de mayores potencias no pueden usar el arranque directo porque los elevados picos de corriente provocarían una sobrecarga en la línea de alimentación, pudiendo dañarla. Además, el pico de intensidad provoca una significativa caída de tensión en la línea, que podría perjudicar a otras cargas conectadas a la misma red del motor.[6].

Las curvas de corriente/ velocidad de arranque y par/ velocidad de arranque para este tipo de arranque se representan en la figura 4.

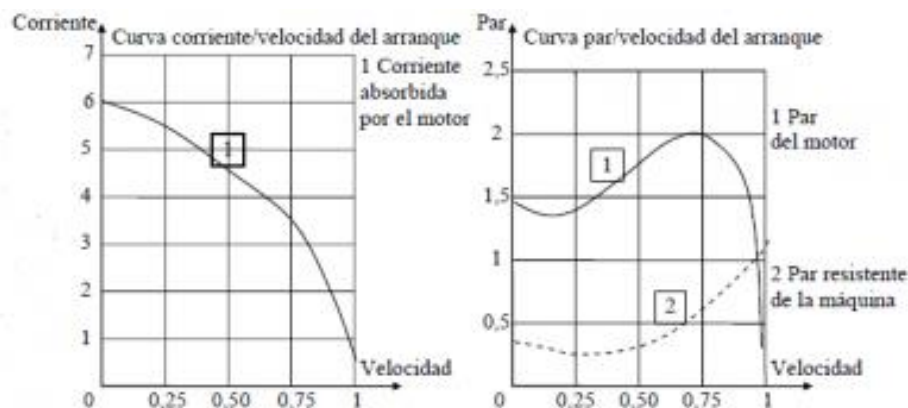


Figura 4: Curvas corriente/ velocidad de arranque y Par/ velocidad de arranque.

1.2.2 Arranque con resistencia en serie con estator

Consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados. Las resistencias producirán una caída de tensión que conseguirá que la tensión del motor sea inferior a la nominal. Debido a ello, la intensidad de arranque se verá reducida proporcionalmente a la tensión y el par se reducirá proporcionalmente al cuadrado de ésta. Una vez estabilizada la velocidad, las resistencias se eliminan y el motor pasa a trabajar a tensión nominal.

Esto conlleva el inconveniente que para bajar la intensidad de arranque se baja mucho el par de arranque, pudiendo, la máquina, no arrancar en caso de que el par resistente sea elevado.

El valor de la resistencia se calcula en base a la punta de corriente que no se debe superar durante el arranque, o al valor mínimo del par de arranque necesario teniendo en cuenta el par resistente de la máquina accionada.

El arranque mediante resistencias estáticas se puede producir en dos o más etapas, reduciendo en cada etapa el valor de la resistencia para llegar finalmente al valor mínimo.

La tensión aplicada al motor no será constante durante el periodo de aceleración debido a que la intensidad, máxima cuando se pone el motor en tensión, disminuye a medida que el motor acelera, por lo que la caída de tensión en bornes de la

resistencia disminuye y la tensión en el motor aumenta. Debido a esto, los valores obtenidos del par, para un par inicial dado, son mayores que con un sistema que suministra tensión reducida de valor fijo.

Las curvas de corriente/ velocidad de arranque y par/ velocidad de arranque para este tipo de arranque se representan en la figura 5.

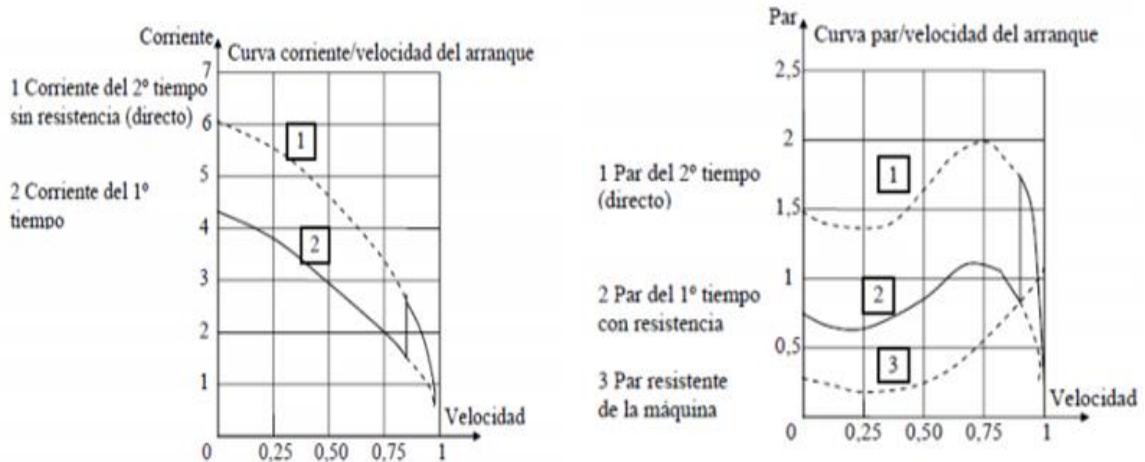


Figura 5: Curvas corriente/velocidad de arranque y par/velocidad de arranque.

1.2.3 Arranque con reactancias en el estator

Este método es similar al anterior pero tiene como desventaja que la utilización de reactores (reactancias en serie con la línea de alimentación) provoca que la corriente consumida por el motor tenga una mayor componente inductiva lo cual provoca mayores caídas de voltaje en el sistema y empeora el factor de potencia en el arranque.[7]

1.2.4 Arranque con autotransformador

Es un procedimiento que se utiliza en motores de gran potencia y consiste en disponer entre la alimentación y los devanados del motor un autotransformador. Éste tendrá distintas tomas de tensión reducida, por lo que, en el momento del arranque, al motor se le aplica una tensión menor, disminuyendo la intensidad, y se irá elevando la tensión de forma progresiva hasta dejarlo conectado a la tensión de red.

Con este tipo de arranque, tanto la intensidad como el par se reducen según la relación de transformación al cuadrado.

Este método de arranque prácticamente no produce pérdidas si despreciamos las escasas pérdidas en el autotransformador. Por el contrario, el elevado precio del autotransformador lo convierte en un método de arranque caro.

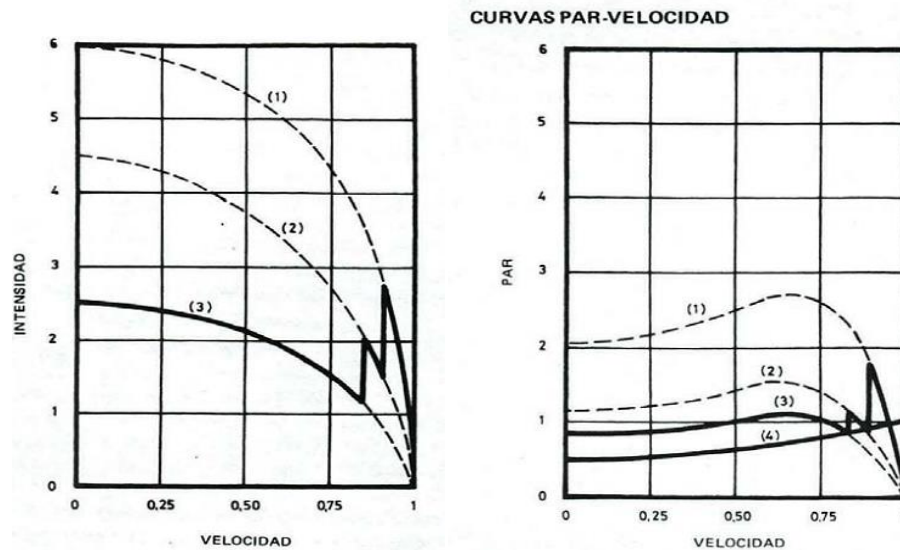


Figura 6: Curvas corriente/velocidad de arranque y Par/velocidad de arranque.

1.2.5 Arranque estrella-delta

En la figura 7 se representan el esquema de fuerza y el de control para un arranque estrella- delta en un motor de inducción.

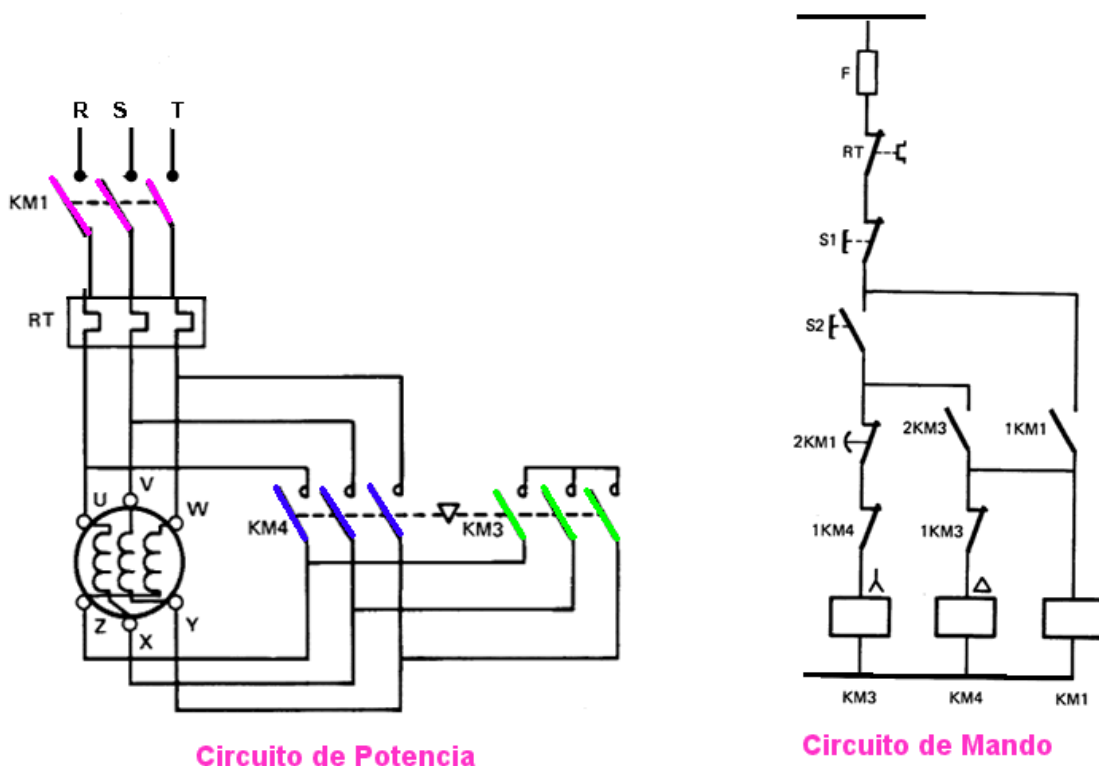


Figura 7: Circuito de fuerza y de control.

Es el tipo de arranque más utilizado en la industria para motores de inducción trifásicos. Este sistema de arranque únicamente puede ser aplicado a los motores que tengan accesibles los seis (6) bornes de conexión del estator y en los motores donde el acoplamiento en delta corresponda a la tensión de la red, por ejemplo, para una red de 380V es preciso un motor de 380D/660Y.

Este sistema de arranque se basa en conectar los devanados del estator en estrella durante el arranque y cambiar a delta cuando el motor haya alcanzado cierta velocidad.

En el momento en que se arranca en estrella, el valor de la tensión será $\sqrt{3}$ veces menor que la tensión nominal del motor. La punta de corriente durante el arranque se dividirá por 3, ya que el motor acoplado en estrella a su tensión nominal absorbe

una corriente $\sqrt{3}$ veces menor que en delta y la corriente se divide nuevamente entre $\sqrt{3}$.

El par también se dividirá entre tres, ya que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación. Es por ello que el motor debe arrancar en vacío o en poca carga.

Si la conexión no se cambiara a delta pasado un tiempo, la corriente del motor sería inferior a la nominal y el par también se vería reducido. El cambio de conexión de los devanados se realiza mediante un conmutador (manual o automático) o mediante un sistema automático basado en relés y contactores. En el momento de la conmutación, si el par resistente es elevado, la velocidad del rotor será baja, pudiendo provocar puntas de corriente.[8]

Por otra parte, en el momento de la conmutación se sufre una discontinuidad en la alimentación a los devanados. Ello, añadido al carácter inductivo de los devanados, provocan puntas de corriente transitorias muy elevadas que pueden desaconsejar el uso de este tipo de arranque en potencias elevadas.

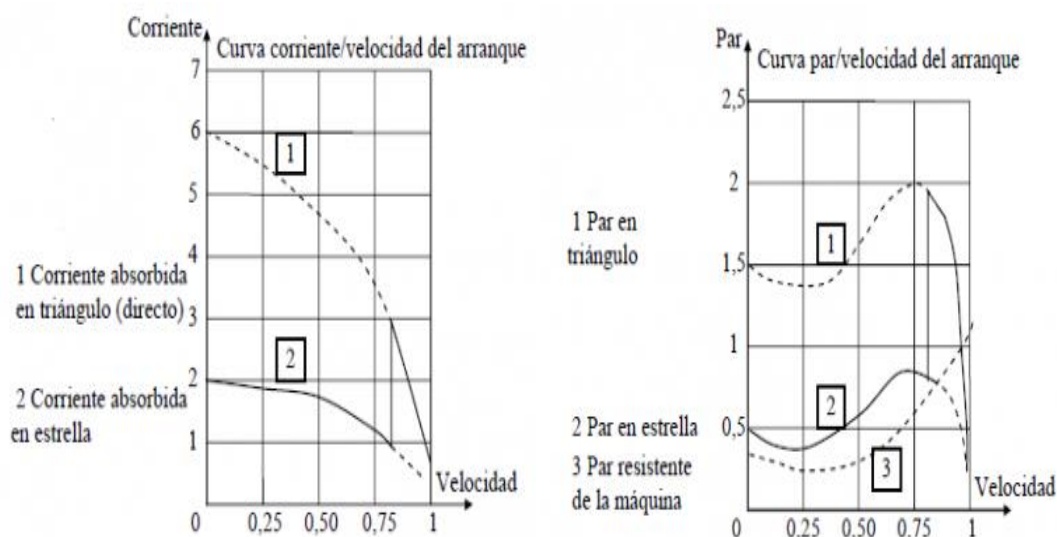


Figura 8: Curvas corriente/velocidad de arranque y par/velocidad de arranque.

1.2.6 Arranque con resistencias en el rotor

Únicamente se puede usar en motores de rotor bobinado. Se trata de conectar en serie resistencias con el rotor que serán cortocircuitadas progresivamente, todo ello conectando el estator a tensión de red.

Al introducir una resistencia en el devanado del rotor, se aumenta la impedancia de la máquina, con lo que la intensidad requerida para el arranque disminuye (comparado con el arranque directo). Además de ello, a bajas velocidades el par motor aumenta, y a medida que se aumenta la velocidad el par va disminuyendo debido a que se reduce la intensidad consumida. Para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia.

Es por ello que este tipo de arranque se impone en los casos en los que el pico de corriente debe ser débil y se deba arrancar a plena carga.

Los inconvenientes de este tipo de arranque son, por una parte, la duración del arranque, que suele ser más lento que otros tipos de arranques; y por otra, que se producen pérdidas por efecto Joule al disiparse calor en las resistencias. Para evitar este último problema, se pueden colocar resistencias líquidas (normalmente agua con sales), de forma que el calor se disipa calentando ese líquido.

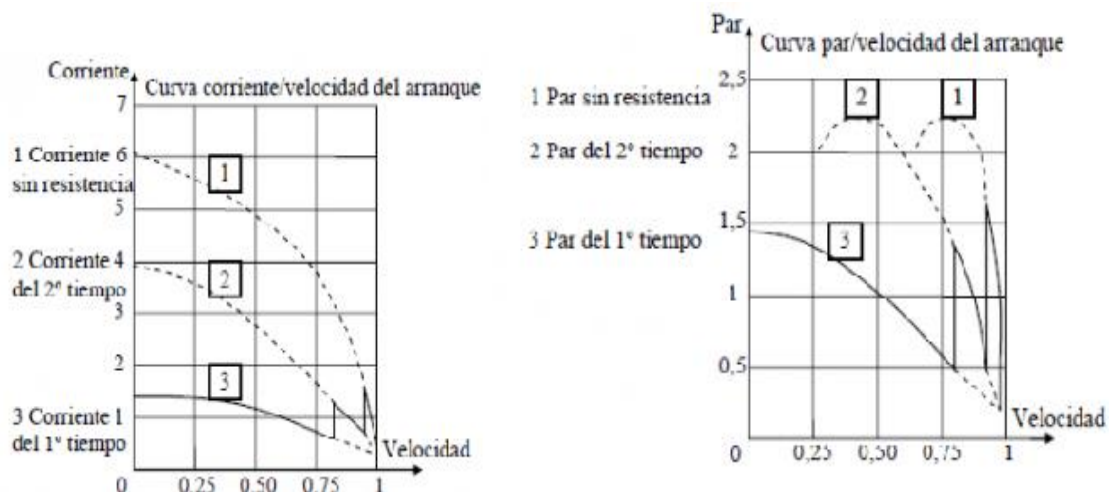


Figura 9: Curvas corriente/velocidad de arranque y Par/velocidad de arranque.

1.2.7 Arranque electrónico

Este método utiliza un graduador de tiristores montados en oposición de dos por dos en cada fase de la red. Este arranque permite hacer una subida gradual de la tensión en el arranque, lo que permite reducir el pico de intensidad. Puede controlarse el valor de la intensidad impidiendo que suba de un límite, normalmente entre 2 y 5 veces la intensidad nominal, este hecho también implica que el par se vea reducido entre 0,1 y 0,7 veces comparado con el arranque directo.[8]

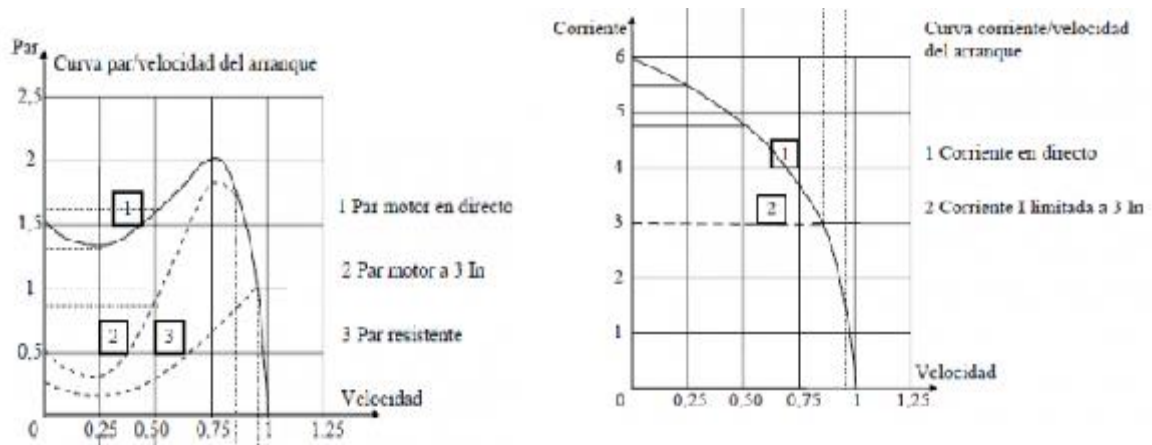


Figura 10: Curvas corriente/velocidad de arranque y Par/velocidad de arranque.

1.3 Concepto y definiciones básicas de los variadores de frecuencia

Variadores de frecuencia: se trata de dispositivos electrónicos, que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción; los hay de c.c. (variación de la tensión), y de c.a. (variación de la frecuencia); los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla). También se les suele denominar inversores (invertir) o variadores de velocidad.

Red de suministro: acometida de c.a., monofásica en aparatos para motores pequeños de hasta 1,5 kW (2 C.V. aproximadamente), y trifásica, para motores de más potencia, hasta valores de 630 kW o más.

Entradas y salidas (E/S): diferentes conexiones de entradas y salidas de control; pueden ser digitales tipo todo o nada (contactos, pulsadores, conmutadores, contactos de relé...) o analógicas mediante valores de tensión (0...10 V o similares) e intensidad (4...20 mA o similares). Además puede incluir terminales de alarma, avería, etc.[9]

Comunicaciones: estos dispositivos pueden integrarse en redes industriales, por lo que disponen de un puerto de comunicaciones, por ejemplo RS-232, RS-485, red LAN, buses industriales ProfiBus...) o conexiones tipo RJ-45 o USB para terminales externos y ordenadores. Cada fabricante facilita el software de control, directo o mediante bus de comunicaciones. Que permitirá el control, programación y monitorización del variador(o variadores) en el conjunto de aparatos de control empleados.

Salida: conexión al motor, generalmente de tres hilos (U-V-W) para conexión directa en delta / estrella según la tensión del motor.

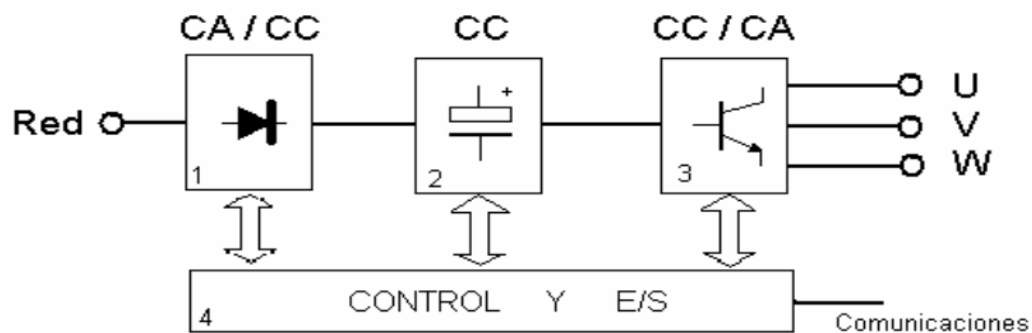


Figura 11: Diagrama en bloque de un variador.

- Rectificador: partiendo de la red de suministro de c.a., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.
- Bus de continua: condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran el c.c. rectificado, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.

- Etapa de salida: desde la tensión del bus de continua, un ondulator convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO... etc. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como troceado, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de impulsos PWM.
- Control y E/S: circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación, entre otras y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además se incluye el interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

1.3.1 Conceptos básicos sobre variadores para motores trifásicos

Velocidad (n): la velocidad en el eje de un motor asíncrono en rpm, depende del número de polos magnéticos del motor, y la frecuencia f (Hz), de la red de suministro:

$$n = 60 f / 2p \quad (5)$$

Donde: n es la velocidad en rpm, f es frecuencia de la red en Hz y 2p es número de pares de polos del motor.

La diferencia de n sincrónica y n asincrónica, se denomina deslizamiento, que se expresa en porcentaje de rpm o en valor absoluto:

Nsincrónica = 1500rpm; Nasincrónica = 1440rpm el deslizamiento $\sigma = 4\%$ o 60rpm

Los motores se fabrican para una velocidad nominal o de trabajo determinada, pero mediante el variador de frecuencia dicha velocidad puede controlarse de manera progresiva. Por ejemplo, un motor de 50 Hz y 1500 rpm (4 polos), podría girar, con variación de frecuencia entre 5 y 120 Hz a velocidades comprendidas entre:

$$n = \frac{60 \cdot 5}{2} = 150rpm \quad (6)$$

$$n = \frac{60 \cdot 120}{2} = 3600 \text{rpm} \quad (7)$$

Sobre-velocidad: el variador puede proporcionar frecuencias de salida superiores a la de trabajo del motor, lo que le hace girar a mayor velocidad que la nominal. La curva de par, para velocidad de trabajo mayor de la nominal, disminuye, de manera que con velocidad doble (200%) el par cae a la mitad del nominal. La sobre velocidad es útil en aplicaciones que no requieren mucho par, como por ejemplo sierras de disco, pero si altas velocidades. En estos casos es importante tener en cuenta las características de par y temperatura de trabajo del motor.[10]

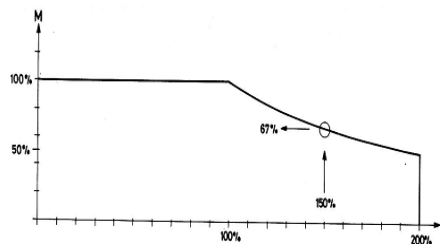


Figura 12: Par temperatura de trabajo del motor.

Par transmitido por el eje(par motriz): la fuerza de tracción del motor a través del eje, depende principalmente de las expresiones siguientes:

$$T = 9550 \frac{P}{n} \quad (8)$$

$$T = K[U/f]^2 \quad (9)$$

Donde: T =par motriz (también suele usarse M o Mn)

K y 9550 = constantes.

U = tensión aplicada al inductor (estator)

F = frecuencia en Hz

P = potencia del motor en kW

n = velocidad (real) de giro del motor en rpm

Por otro lado, el flujo magnético en los polos del motor (Φ), depende de la tensión:

$$U = K \cdot \theta \cdot f \rightarrow \text{el flujo magnetico } \theta = K (U/f) \quad (10)$$

Es decir, el par depende directamente del flujo magnético, por lo que para obtener el control del par, hay que operar sobre este parámetro; por ello, si tenemos en cuenta las relaciones de par y velocidad:

Par constante = flujo constante, en consecuencia:

$$U/f = \text{cte} \quad (11)$$

El factor U/f tiene especial importancia en la forma de configurar un variador, ya que de ahí dependerá el par motriz desarrollado por el motor, sin importar la velocidad de giro.

Además, de la primera expresión de T , vemos que el pares proporcional a U al cuadrado, de manera que si U/f es constante, el par dependerá de manera directa de la tensión.

En la figura 13 se observa un ejemplo de curvas par-velocidad para par constante:

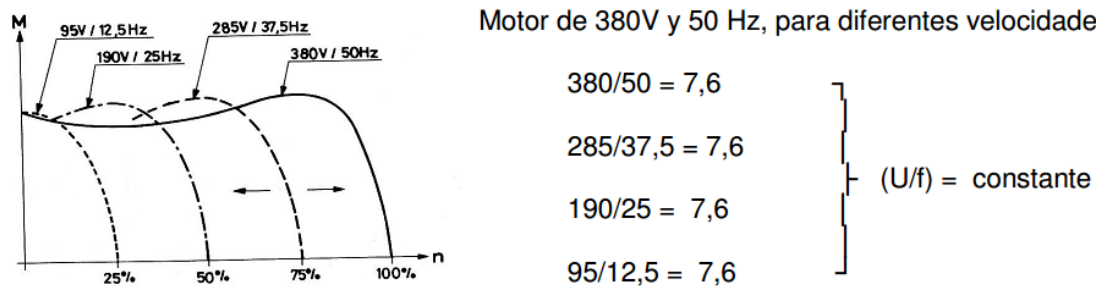


Figura13: Curva par-velocidad para par constante.

Tensión de arranque inicial: en el arranque de un motor con carga, es necesario aplicar un cierto par inicial mínimo, para garantizar que el motor empiece a girar. Esto se consigue, iniciando la marcha con un valor de tensión determinado U_{INI} , de acuerdo a las relaciones (U/f) y T_{INI} vistas en el apartado anterior:

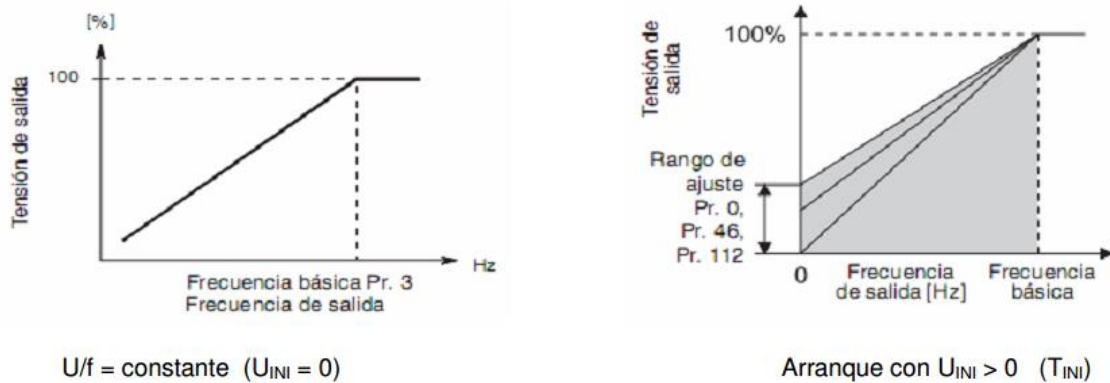


Figura14: Curvas de tensión de arranque inicial.

La variación del par debe ser cuidadosa, para no excederlas características del motor ni sobrecargar el propio variador, especialmente en el arranque, ya que podría circular una intensidad de corriente elevada, y eso no lo permite el variador. Cuando el motor gira en las dos direcciones, el control del par puede ser igualmente importante, como por ejemplo un montacargas en subida y bajada con carga. En el primer caso, el control del par permite el arranque e inicio de la marcha, y en el segundo, hace la función de retención de la carga evitando el embalamiento del motor en la caída. (En cualquier caso, el variador no puede realizar las funciones de freno-motor; debiéndose instalar un freno-motor, de retención mecánica tipo magnético, disco, zapata, etc.)[9]

Características de carga típicas:

Par de carga constante: $T=\text{cte.}$; se da en sistemas que tienen siempre (o aproximadamente) el mismo par resistente, como molinos, bombas de pistón, transportadoras en carga (cintas, elevadores, sinfines...). Las curvas de par-velocidad (teórica y real) pueden ser las representadas en la figura 15.

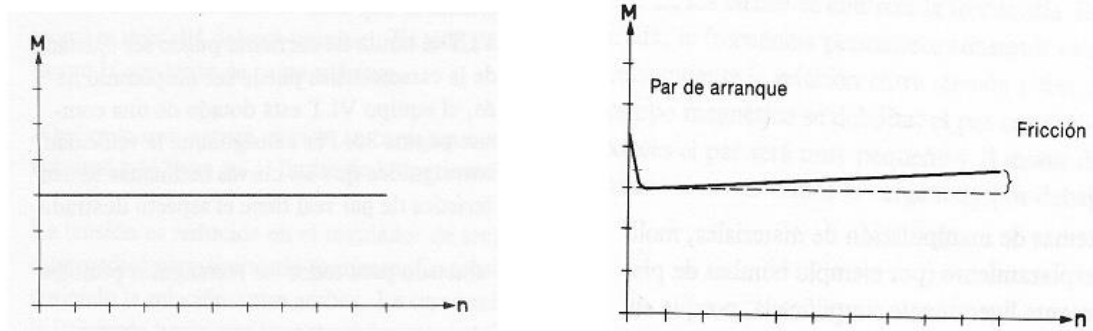


Figura15: Curvas de par-velocidad (teórica y real).

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.

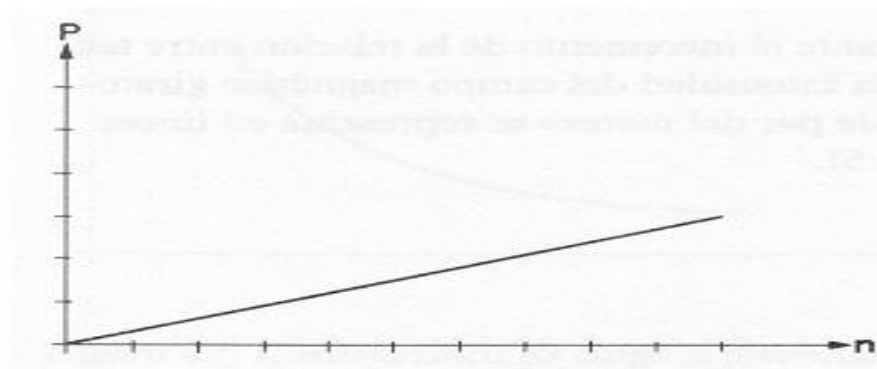
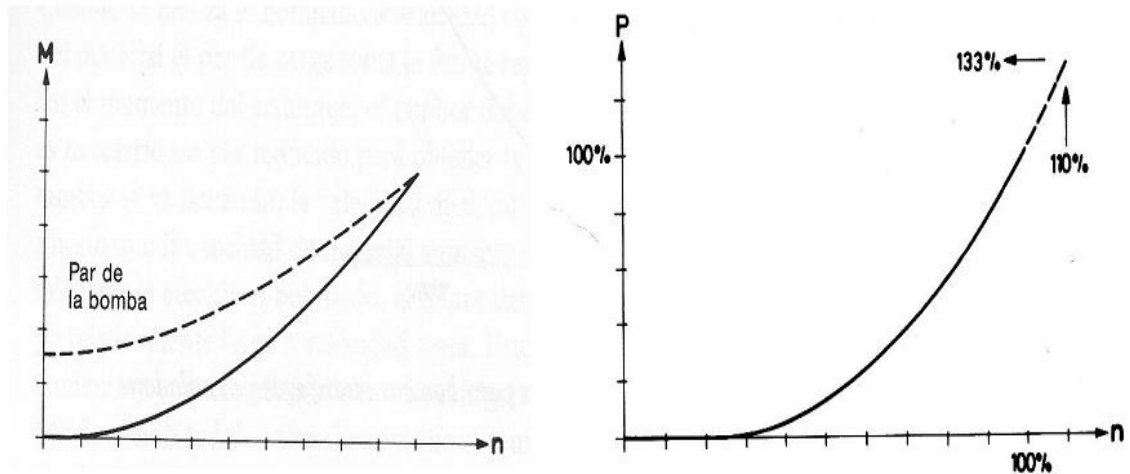


Figura16: Curva potencia velocidad.

Par de carga cuadrático: el par es proporcional al cuadrado de la velocidad. Es decir, inicialmente muy bajo, va creciendo de forma cuadrática al aumentar la velocidad. Esta característica se da en ventiladores, motores de bombas centrífugas, etc.



Par de carga cuadrático (bomba)

Demanda de potencia (bomba)

Figura17: Curvas par de carga y demanda de potencia de la bomba.

Potencia constante: ($P = M \cdot \omega_{cte.}$); al 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. A veces se aprovechan las características de sobre-velocidad para mejorar las posibilidades del proceso, si el par necesario no es alto.

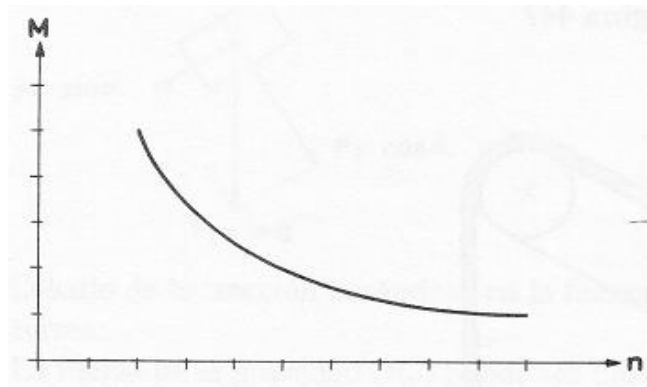


Figura18: Curva de par sobre-velocidad.

1.4 Consideraciones finales del capítulo

El caudal demandado es el que determina el consumo de energía en una estación de bombeo. Por este motivo el manejo de la red tiene consecuencias importantes

sobre dicho consumo. En el caso de conocer la probabilidad del caudal demandado se podría estimar con precisión dicho consumo. El empleo de convertidores de frecuencia contribuye a independizar el consumo energético del caudal demandado. El consumo de energía puede reducirse aún más en caso de adoptar valores específicos de presión a regular para cada situación de funcionamiento de la red.

CAPÍTULO 2. Diseño del arranque de las bombas de jugo con variadores

La automatización agroindustrial juega un papel fundamental en los procesos productivos y para los cuales el país realiza grandes inversiones, de ahí que el empleo de los variadores de frecuencia se realiza con el fin de mejorar tecnológicamente e incrementar el ahorro energético para ello se han instalado en los paneles de los equipos de bombeo de jugo mezclado que intervienen en el proceso de fabricación del azúcar en determinados centrales azucareros, lo cual ha tenido resultados satisfactorios para la empresa.

Inicialmente, de forma general, los variadores de frecuencia se utilizaban para mejorar los lazos de regulación automático de alimentación de bagazo de las calderas contribuyendo a una mejor combustión de las mismas y sustituyendo además la tecnología obsoleta como el arranque con auto transformador de 180 kW el costo es muy elevado, con baja eficiencia.

El accionamiento de las bombas de jugo del central Carlos Baliño se realizaba con autotransformadores, debido a que es imposible la variación de velocidad con este tipo de arranque, es necesario automatizar el proceso de producción para poder variar la velocidad del motor, por lo que se decide utilizar variadores de frecuencia, específicamente Mitsubishi serie 700. Se escoge este tipo de variador debido a la posibilidad que tiene el país de realizar contrato con esta firma y por los exitosos resultados obtenidos durante más de cuatro años [11].

2.1 Análisis del arranque de las bombas que existían anteriormente utilizando autotransformadores

El diagrama de fuerza y control para el arranque de las bombas de jugo utilizando autotransformadores se muestra en los anexos del 1 al 3. El circuito general está formado por un interruptor automático magneto térmico de 400A, tres fases 440V, 60 Hz denominado **(Q0)** el cual es alimentado por dos contactores magnéticos **(KM1, KS2)** 220 kW de potencia, con bobina de 220V de alimentación, 60 Hz, trifásico, 400 A con dos contactos auxiliares normalmente abierto y dos normalmente cerrado, el transformador **(T1)** monofásico de un (1) kVA por primario 460 V por secundario de 220 V, 60 Hz encargado de la alimentación de control, con un interruptor automático **(Q1)** magneto térmico dos polos modular, 460V, 60 Hz, con corriente nominal 4 A, clase c, se alimenta el transformador de control, los 2 botones pulsadores verde y rojo, 250V, 5A **(BAVTI, BPVTI)**, son los encargados de la marcha y la parada de las bombas, dos lámparas de señalización 230V, 60 Hz, color blanco y verde **(HC, HL)**, para la tensión de control y marcha de la bomba. Contactor **(KS1)** magnético 132 kW con bobina 220V, 60 Hz, tres fases 250A con contactos auxiliares, dos normalmente abierto-dos normalmente cerrado encargado del cierre de la estrella, relé auxiliar con base, bobina 220V, 60 Hz, con cuatro contactos normalmente abierto y cuatro contacto normalmente cerrado. Relé de tiempo 0---300 s con dos juegos de contacto de tiempo dos normalmente abierto y dos normalmente cerrado, 220V, 5 A y el auto transformador de 180 kW conexión estrella con tap de 50%, 60%, 80%.

En el anexo 1 se observa que el circuito está constituido por **(Q0)**, interruptor principal conectado a la acometida de fuerza, con él se alimenta **(Q1)**, interruptor primario que alimenta el transformador de control **(T1)** 480-220V.

En el anexo2 se muestra el diagrama de control que comienza con los contactores **(KM1, KS2, KS1)** que son los encargados del arranque junto con el autotransformador, que el mismo la función que realiza es bajar el voltaje de línea con diferentes tap, en este caso utilizamos 50% del voltaje nominal del motor para

que el par de arranque del mismo no aumente. Cuando pulsamos el botón de arranque energizamos **(R1)** relé auxiliar enclavamiento del temporizador, en serie con este se encuentra un contacto cerrado de la protección térmica que cierra **(RT1)** temporizador 0-300s, contamos con relé auxiliar de bloqueo **(R2)** que con uno de sus contactos cerrados **(R2.1)** se alimenta **(RT1.1)** contacto normalmente cerrado (NC) con tiempo para abrir, para poder cerrar **(KS1)** que es el contactor de cierre de la estrella, en paralelo se encuentra **(KS2)** contacto auxiliar de alimentación autotransformador. Con **(2KS1)** se alimenta **(RT1.2)** contacto normalmente abierto con tiempo para cerrar. Cuando **(RT1.1)** se abre se cierra **(RT1.2)** para energizar **(KM1)** contactor de alimentación al motor, entra **(R2)** relé auxiliar de bloqueo con el contacto auxiliar del mismo **(R2.2)** se alimenta **(IT)** alimentación transmisor de corriente 0-5A 4-20mA con la ayuda de los transformadores de corriente. Dos de los tres transformadores de corriente **(TC1, TC2)** se cortocircuitan con los contactos auxiliares de **(KM1)** por la ausencia de protecciones térmicas **(RTH)** que soporten la corriente de arranque del motor. El **(TC3)** es utilizado para medir la corriente de arranque del motor junto con transmisor **(IT)** mostrado en anexo2, que es el diagrama de control [15].

Como se puede apreciar no se pudo variar la velocidad de las bombas, por este motivo para automatizar el proceso se emplea variador de frecuencia Mitsubishi serie 700.

2.2 Diseño del arranque de las bombas de jugo con variadores de frecuencia Mitsubishi serie 700

Este trabajo es realizado cumpliendo el manual de instrucciones MITSUBISHI utilizando Variadores de 75 kW para el mando de los motores de las bombas de jugo, según las necesidades del proyecto de automatización.

En esta aplicación se utilizarán equipos de: 55, 75, 90, 110, 132 kW. Estos equipos se montarán de forma individual en armarios de diferentes dimensiones atendiendo al rango de potencia de cada uno de ellos.

En este tipo de aplicación hay que considerar que los equipos manejan las correspondientes bombas tomando el jugo que se desea impulsar desde tanques que están a diferentes alturas con respecto al piso de la fábrica por consiguiente las bombas en la tubería de succión siempre verán una presión positiva. Luego la carga hidrostática o la altura manométrica de carga que ven las bombas depende del diseño de la fábrica y también de la trayectoria de la red de tuberías que estén montadas en cada ingenio.

Todos los motores que se utilizan en esta aplicación para las potencias indicadas anteriormente son motores de inducción trifásico y de 4 polos.

En esta aplicación es importante tomar en consideración que existen dos formas de trabajo del variador: manual y automático, en la forma manual el conmutador SMA debe estar en la posición de apagado (off) y por medio del potenciómetro de referencia de frecuencia se varía la velocidad de la bomba seleccionada teniendo en cuenta que hay que poner el parámetro Pr.73=1, otra forma sería: colocando el conmutador SMA en la posición Auto (Entrada 4/20 mA terminal 4) desde el PLC teniendo en cuenta que hay que cambiar el parámetro Pr.73=6 La función Manual solo se utilizará en el caso de comienzo de zafra en que no se dispone del panel de PLC o por rotura del mismo [13].

El dial de la unidad de programación (PU) nos permitirá entonces ajustar la referencia del sistema (cantidad de m^3 /hora que se desea bombear a fábrica) y el comando de arranque y parada también lo podremos ejecutar a través de las teclas de la unidad PU. Pensamos que a este modo de funcionamiento, o sea el modo PU se pueda acceder con independencia de la posición en que se encuentre el conmutador de dos posiciones que describimos en las dos formas de trabajo modo exterior del variador.

La última forma que se desea trabajar los variadores es mediante una conexión en red MODBUS-RTU donde se puedan realizar ciclos de lectura – escritura de parámetros, enviar comandos operativos como arranque, detener la marcha, monitorear el estado del variador, etc.

El proceso de parada tanto mediante el pulsador colocado en la puerta del armario, o desde la red MODBUS – RTU y desde la unidad PU se va a realizar mediante una rampa de parada o deceleración con una desconexión al final del proceso. Si ocurriera un fallo en la alimentación en pleno proceso de trabajo cuando la misma retorne, hay que pulsar el botón energizar variador instalado en la puerta del armario con lo cual se activan el contactor que alimenta al variador.

Características Técnicas: Contactor Magnético 75 kW con bobina 220V 60 Hz, tres (3) fases 250 A con contactos auxiliares de dos normalmente abierto y dos normalmente cerrado.

2.3 Explicación del circuito de control, fuerza y panel para las bombas con el variador de frecuencia Mitsubishi serie 700

Los parámetros del variador Mitsubishi serie 700 para el arranque y control de la bomba de jugo están representados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de ajuste del variador de frecuencia Mitsubishi serie 700 [13].

PARAMETROS	NOMBRE	VALOR
1	Frecuencia máxima	60 Hz
2	Frecuencia mínima	20 Hz
3	Frecuencia Base	60 Hz
7	Tiempo de aceleración	20 s
8	Tiempo de desaceleración	30 s
9	Protección Térmica del Motor	INOMX1.1
160	Visualización de Función Extendidas	0

14	Selección del tipo de carga	TV=1
19	Selección del voltaje aplicado al Motor	9999
20	Referencia de rampa de aceleración y frenado	60 Hz
71	Características de trabajo	V/F=0
73	Selección de entradas analógicas	6(4/20mA)
78	Selección giro motor	Giro derecha =1
79	Selección del modo de trabajo	Pu/Externo/Red=6
125	Ganancia de corriente entrada 2 (no se usa)	60 Hz
126	Ganancia de corriente entrada 4	60 Hz
55	Frecuencia de referencia de salida	CA=20mA=60 Hz
196	Diferentes modos de activar la señal de Marcha	45
C5	Velocidad de consigna mínima corriente	20 Hz(bombas)
C6	% de señal mínima corriente	Entrada en 4mA PU=20%
C7	% de señal máxima de corriente	Entrada en 20mA PU=100%

En el anexo 4 se muestra el circuito de alimentación y mando de la bomba de jugo mezclado con selección de bombas. Está formado por el variador de velocidad (**A1**),

con potencia a par constante de 75 kW, 500V tres fases con una capacidad de sobrecarga 150 % durante 60 s; 200 % durante 3 s, la alimentación es trifásica 380 a 500 V, $\pm 10 \%$, 47 a 63 Hz, Mod. FR-F740-02160, Mitsubishi. Es alimentado por el contactor magnético (**KM1**), con bobina a 220 V de alimentación y 60 Hz de frecuencia de trabajo, con un contacto auxiliar normalmente abierto y uno normalmente cerrado. En la salida del variador se conecta una reactancia, grado de protección IP20 (75 kW) de potencia. El botón pulsador (**SBP1**) color rojo, con un juego de contacto normalmente abierto y normalmente cerrado de 250 V 5A de alimentación, es utilizado para el cierre y parada de la bomba. Encontramos la conexión del cable de comunicación de 4/20mA, las salidas de alarmas y salidas programables con sus relé de protección (**R1, R2 y R3**) y lámparas de señalización (**H1, H2, y H3**) para saber cuándo están activadas [16].

El anexo 5 muestra el circuito de arranque en el que se encuentra una lámpara de señalización de tensión de control denominada (**HC**) y el relé (**V<>**) de sobre voltaje, con tres fases de 440 V de alimentación, 60 Hz, con ajuste de 10 a 100 % y un contacto auxiliar normalmente abierto y uno normalmente cerrado para conectar y desconectar el circuito y de esta manera protegerlo. Para energizar el variador se encuentra el pulsador (**SBT1**), sellado por un contacto auxiliar de (**KA1**) relé auxiliar con base, de 220V de alimentación y cuatro contactos auxiliares normalmente abiertos y cuatro normalmente cerrados. Para paradas de emergencias se utiliza un pulsador seta (**SE**), se cuenta con uno de los contactos de la protección térmica, para los ventiladores de enfriamiento del panel denominada (**Q3.1**), en serie con todos los contactos mencionados está la bobina del relé auxiliar de control (**KA1**) para lograr sellar el circuito. Para lograr la marcha desde el PLC se cierra el contacto de marcha interno, alimentando la bobina del relé auxiliar (**KA2**) y para la parada desde el PLC, se cierra otro contacto interno que alimenta la bobina del relé auxiliar (**KA3**), con las características similares a (**KA1**). Los relés auxiliares (**KA4, KA5 y KA6**) son los encargados del permiso de marcha para cada bomba, que son alimentados por un contacto auxiliar, el cual es cerrado por el contacto auxiliar

(KA1.1) del relé auxiliar de control **(KA1)**. Cada bomba cuenta con una lámpara de señalización **(H4, H5, y H6)** para saber cual está en marcha.

El anexo 6 muestra el interruptor manual (SFA1), tres fases 440 V, 60 Hz, 3 x 400 A y corriente de corto circuito de 36 kA, que es el encargado de alimentar el interruptor automático magneto térmico (Q1) dos polos modular, 460 V, 60 Hz, corriente nominal 2 A, poder de corte 10 kA, clase C, que alimenta el transformador de control monofásico (T1) 500 VA, por primario 460 V, y por secundario 220 V, 60 Hz, POLYLUX. Por secundario del transformador encontramos (Q2) interruptor automático magneto térmico dos polos modular, 220 V, 60 Hz, corriente nominal 3 A, poder de corte 10 kA, clase C, que alimenta el seccionador de control y vigilancia de voltaje, (FT1, FT2) son fusibles de protección, 5 A 250 V. En los anexo7 y 8 se muestran las fotos exterior e interior del panel.

2.4 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se mostraron las principales características del variador de frecuencia Mitsubishi serie 700 y se explicó el funcionamiento básico de los circuitos de fuerza y control que alimentan las bombas de jugo.

CAPÍTULO 3. Resultados y discusión

En este capítulo se explican los resultados económicos del sistema de control de las bombas de jugo. Se describen también las pruebas realizadas al panel del variador.

Se ha probado con éxito el empleo de variadores en esta área en otros centrales y se conoce que debido a las modificaciones en los calentadores y clarificadores se requiere de un sistema más estable del flujo y una menor recirculación de guarapo a su tanque, lo cual es factible de lograr con el uso de variadores de frecuencia. El ahorro aquí en parte es desde el punto de vista de las pérdidas en el proceso tecnológico, dado que en la mayoría de los esquemas actuales se utiliza la recirculación del jugo y la bomba siempre está funcionando al máximo de su capacidad. Hay un ahorro de potencia también con respecto a la capacidad del motor que se necesita para las nuevas condiciones cuando se utiliza variador de frecuencia, siendo la potencia de los mismos menor que la instalada. Esta es un área donde se necesita incrementar el uso de variadores de frecuencia, dado que por las características de las curvas de par contra velocidad, la relación entre el par demandado por la bomba y la velocidad es cuadrática y con la potencia es cúbica, por lo tanto si se logra ajustar con el variador de frecuencia el punto de funcionamiento de trabajo de la bomba para el caudal requerido, una pequeña disminución de la velocidad de la bomba por debajo de la velocidad nominal representaría un ahorro considerable de energía. Por otro lado existe un ahorro importante debido a que las bombas en esta área están en casi todas las fábricas sobredimensionadas por distintos factores. Por tanto si se logra un

dimensionamiento adecuado de las mismas y le sumamos a esto el uso de una regulación del caudal, por el uso de variadores de frecuencia tendríamos un ahorro considerable.

En esta área se puede considerar un ahorro de un 25 %, lo que representa un ahorro de energía de 3 840 MW.h en una zafra, o sea 230 000 pesos

3.1 Conexión eléctrica automática- convertidor de frecuencia

Los convertidores de frecuencia pueden conectarse a un sistema de control externo, con una conexión RS 485, con aislamiento galvánico de protocolo Modbus recibiendo toda la información de control de un bus de campo o a torre de entradas analógicas y digitales.

Cuando se utilizan entradas analógicas como control interno, debe utilizarse la entrada analógica diferencial del convertidor de frecuencia ya que el potencial de conexión a tierra del dispositivo que envía la señal analógica puede diferir hasta ± 15 V de potencial de toma a tierra del *chasis* del convertidor de frecuencia, sin perturbar la señal de entrada. También puede utilizarse módulos de salida analógica del automático aislado galvánicamente[16].

En el caso de no contar con las variantes antes expuestas, deberá utilizar un aislador galvánico en la línea de 4 a 20 mA del automático al convertidor de frecuencia. De no cumplirse estrictamente estas instrucciones se producirán daños en el módulo de salida o en el convertidor de frecuencia.

Los convertidores de frecuencia pueden controlarse desde un puesto de control local o desde un puesto de control externo donde puedan darse las referencias marcha / parada y comandos de dirección a través de la lista de parámetros.

3.1.1 Comunicación serie

Los convertidores de frecuencia usan para su comunicación un interfaz serie compatible RS 485 con pleno control de sus capacidades de trabajo.

El lenguaje usado es protocolo Modbus configurable en uno o dos modos de transmisión.

3.1.2 Bus 485

En este tipo de red RS 485 se deben conectar a tierra todos los dispositivos de la misma adecuadamente, utilizando sus respectivos terminales de tierra.

Los cables de conexión a tierra no deben formar lazos cerrados y todos los dispositivos deben ser conectados mediante una tierra común. La red RS 485 debe ser terminada utilizando resistencias de $120\ \Omega$ en los extremos de la misma[17].

3.1.3 Supervisión

Un programa de supervisión *Windows* puede ser utilizado este debe estar encargado con un protocolo Modbus RS 485.

El *software* destinado para el control y supervisión permite obtener un control total de forma remota de todas las funciones del convertidor.

3.1.4 Lista de parámetros

En el manual de usuario se describe detalladamente el procedimiento de cambio de parámetros así como la descripción completa de cada parámetro.

Los parámetros pueden cambiarse y ajustarse mediante las teclas del panel de control frontal.

En el trabajo con los convertidores de frecuencia debe emplearse estrictamente las normas de seguridad en las operaciones de instalación y mantenimiento y estas deben ser realizadas por un profesional competente[17].

Una vez terminada la prueba al variador de velocidad, el control de la calidad del mismo, inscribirá en el registro de inspección diario los resultados de la misma [16].

3.2 Valoraciones económicas

La proyección de producción en esta UEB a partir del objetivo de la inversión sería a través del ahorro en combustible equivalente (Fuel Oil) que representa la instalación de los variadores. (Ver tabla #2)

Tabla 2: Proyección de producción a partir del uso de los variadores de frecuencia (VF)

Pronóstico de Producción a partir del ahorro que representa la inversión en variadores de velocidad por frecuencia (U.E.B Central Azucarero Carlos Baliño)							
Variadores de velocidad de frecuencia	Potencia (kW)		Variador			Ahorro en Combustible Equivalente (t)	
	Actual	Promedio de consumo con el variador	Ahorro (kW.h)	Cant.	Ahorro Diario (kW.h)	Ahorro Zafra 90 días (CUC)	Ahorro Total Fuel Oil Equivalente (t).
Estera alimentadora	75	45	600	1	600	54 000	17.97
Estera de caña elevadora	75	45	600	1	600	54000	17.97
Alimentadores de bagazo a calderas	45	2.2	856	1	856	77 040	25.64
Bombas de Jugo Mezclado	110	75	700	5	3 500	315 000	104.83
TOTAL	305	167.2	2 756	8	5 556.0	500 040	166.41

Para realizar pronóstico de producción a partir del ahorro que representa la inversión en variadores de velocidad por frecuencia se tomó como referencia 20 horas de trabajo de los variadores, con un estimado de 90 días de zafra.

Los ingresos por producción se muestran en la siguiente tabla. (Ver tabla # 3)

Tabla 3: Ingresos por producción a partir del uso de los VF

Ahorro que representa la Inversión en Variadores de velocidad por frecuencia (Carlos Baliño)									
Variadores de velocidad de frecuencia	Potencia (kW)		Variador		Ahorro Total (kW).	Ahorro en Combustible Equivalente (t).			
	Actual	Propuesta	Ahorro (kWh).	Cantidad		Ahorro Total Fuel Oil	Precio de la tonelada de Fuel Oil	Valor de Ahorro Diario (CUC)	Valor de Ahorro Zafra 90 días
Estera alimentadora	75	45	600	1	600	0.200	680.00	135.78	12,220.42
Ester de caña elevadora	75	45	600	1	600	0.200	680.00	135.78	12,220.42
Alimentadores de bagazo a calderas	45	2.2	856	1	856	0.285	680.00	193.72	17,434.46
Bombas de Jugo Mezclado	110	75	700	5	3500	1.165	680.00	792.06	71,285.76
TOTAL	305	167.2	2756	8	5556.0	1.8		1,257.35	113,161.05
<i>Nota: La energía expresada en Fuel Oil equivalente es 0.0003328 kWh por cada tonelada.</i>									

Esta inversión trae consigo un ahorro en la compra en el mercado internacional de Fuel Oil (Petróleo crudo) utilizado en la generación de energía eléctrica, el cual tiene un alto precio (680.00 CUC), lo que se convierte en ahorro de importaciones para el país, algo vital en la situación económica que se atraviesa a nivel mundial, lo cual se ha considerado como ingreso. Generalizando este proyecto en todos los centrales azucareros lograríamos ampliar el desarrollo tecnológico y de automatización industrial, así como la posibilidad de realizar inversiones de rápida ejecución y recuperación para un mayor ahorro energético.

3.3 Consideraciones finales del capítulo

Podemos concluir que en la actualidad cuando se requiere regular el caudal entregado por la bomba en un amplio margen de regulación y a una alta eficiencia es muy utilizado y casi no se entran a analizar otras variantes, el control por variación de la frecuencia, ahora bien esta decisión se refiere a los métodos de control por variación de la velocidad y no es tan categórico cuando la cuestión es decidir entre aplicar el método de variación de la velocidad y el método de

estrangulación. La selección óptima del método de regulación del caudal se realiza a partir de los resultados que se obtengan de un exhaustivo proceso de análisis técnico-económico en el cual se incluyan todas las variantes y cuyo resultado final dependerá mucho de las condiciones específicas de donde se aplicará el control.

La ventaja fundamental que se logra al utilizar variadores de velocidad en el accionamiento de bombas centrífugas es de carácter energético, ahora bien, existen otras consideraciones tecnológicas importantes que también están a favor de la utilización de este tipo de accionamiento, a esto se une el cuidado de las bombas al trabajar a menor velocidad, así como de las válvulas automáticas, las cuales no estaban diseñadas para trabajar a estas presiones. Se pudo apreciar además una mejoría en la estabilidad de los niveles del flujo del jugo, independientemente del porcentaje de apertura de las válvulas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1) El empleo de convertidores de frecuencia para variar la velocidad de los motores asincrónicos es una alternativa muy utilizada en la actualidad para el accionamiento de motores asincrónicos.
- 2) Con la utilización del variador de frecuencia Mitsubishi serie FR-F700 puede realizarse el control de velocidad de las bombas de jugo.
- 3) Al implementar el circuito de fuerza y control, con la utilización de variadores de frecuencia, para el accionamiento de bombas centrífugas se logra un ahorro energético

Recomendaciones

Elaborar un material que sirva de guía para efectuar los mantenimientos planificados en el central ya que la sujeción de todos los sensores y el cableado de la máquina, pueden dar lugar a que el variador ejecute una secuencia de código que no sea la correcta y se produzca una parada del proceso, o en el peor de los casos ocurra un accidente.

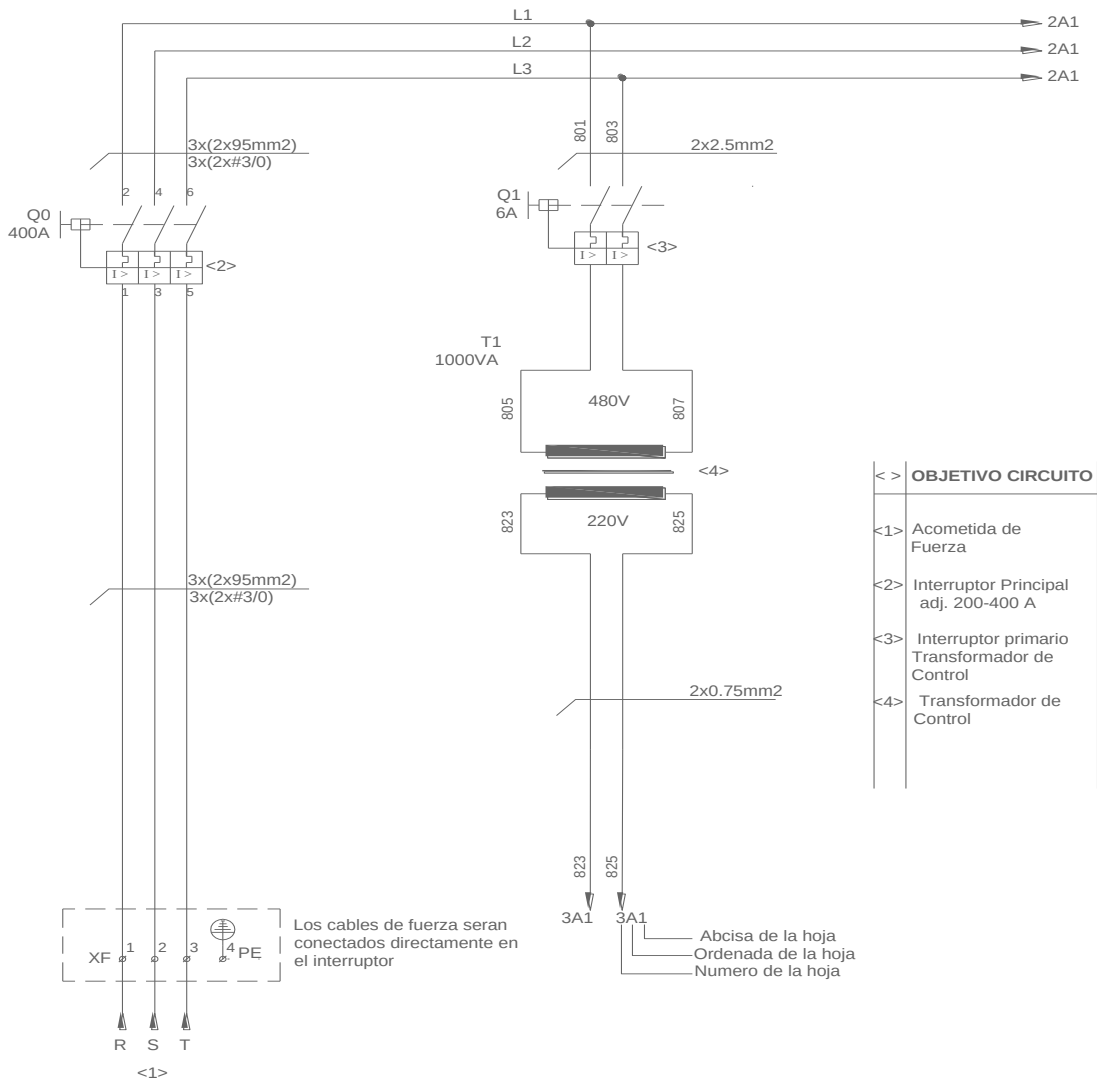
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Riegos (2012), P.d.I.H.y., Investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria E.T.S.I.
- [2] Cherkasski, V.M., (1992) Bombas, Ventiladores. Compresoras
- [3] ABB (2000b) Guía Técnica Nº 4 Guía de Accionamientos de Velocidad Variable. Barcelona, Automation Group.
- [4] ABB (2005) DCS800 Quick guide. Ladenburg. GERMANY, Automation Products GmbH.
- [5] Conferencia 9 (2013). Arranque (1ra Parte).Capítulo II: Control de motores asincrónicos
- [6] M- Chilikin (1972).Accionamiento Eléctrico, MIR, URSS
- [7] M-Kostenko y L. Piotrovsky (1992). Maquinas Eléctricas, edición 5, Pueblo Educación, Ciudad de La Habana.
- [8] Mc Pherson (1921). An Introduction to Electrical Machines and Transformes, New York.
- [9] MORERA HERNÁNDEZ, M. (2004) *Accionamiento Eléctrico Automatizado I*, La Habana. Cuba, Félix Varela.
- [10] MITSUBISHI, E. C. (2007). MODBUS Serial Communication. FX3U Series Programable Controllers. TOKYO. JAPAN.
- [11] MITSUBISHI, (2008).Instruction Manual. Inverter Plug-in option, FR-A7AL.
- [12] MITSUBISHI, (2008).Instruction Manual. Inverter Plug-in option, FR-A7AP.
- [13] MITSUBISHI, (2008).Instruction Manual. Inverter Plug-in option, FR-D700.
- [14] Procedimiento para el control de los equipos de seguimiento, medición y ensayo.“PRO 09.04”
- [15]** Procedimiento de No Conformidades, Acciones correctivas y Acciones Preventivas. “PRO 09.03”.

[16] REG 03.05-10-1 “Registro de inspección diario”

Anexos

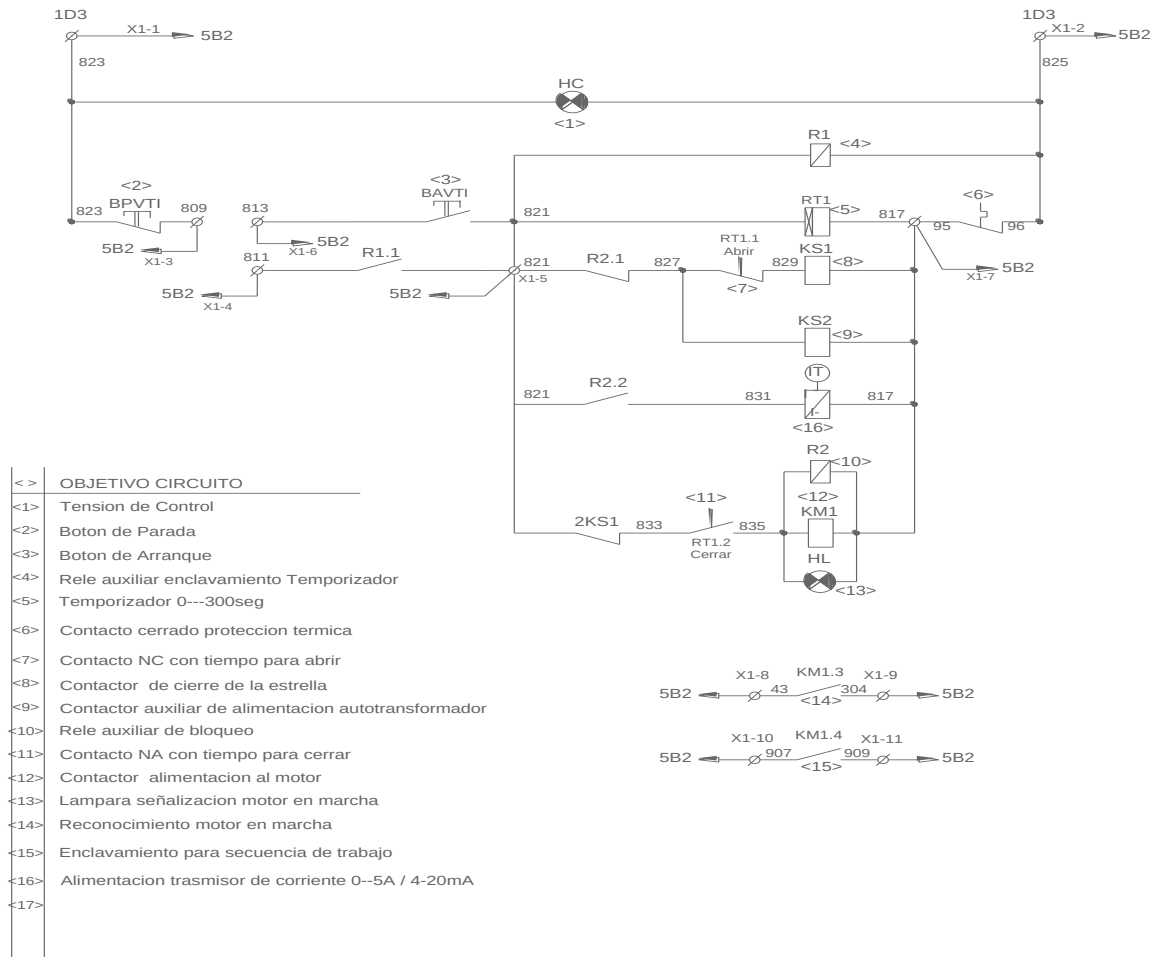
Anexo I



Anexo1: Circuito encargado de la alimentación de control

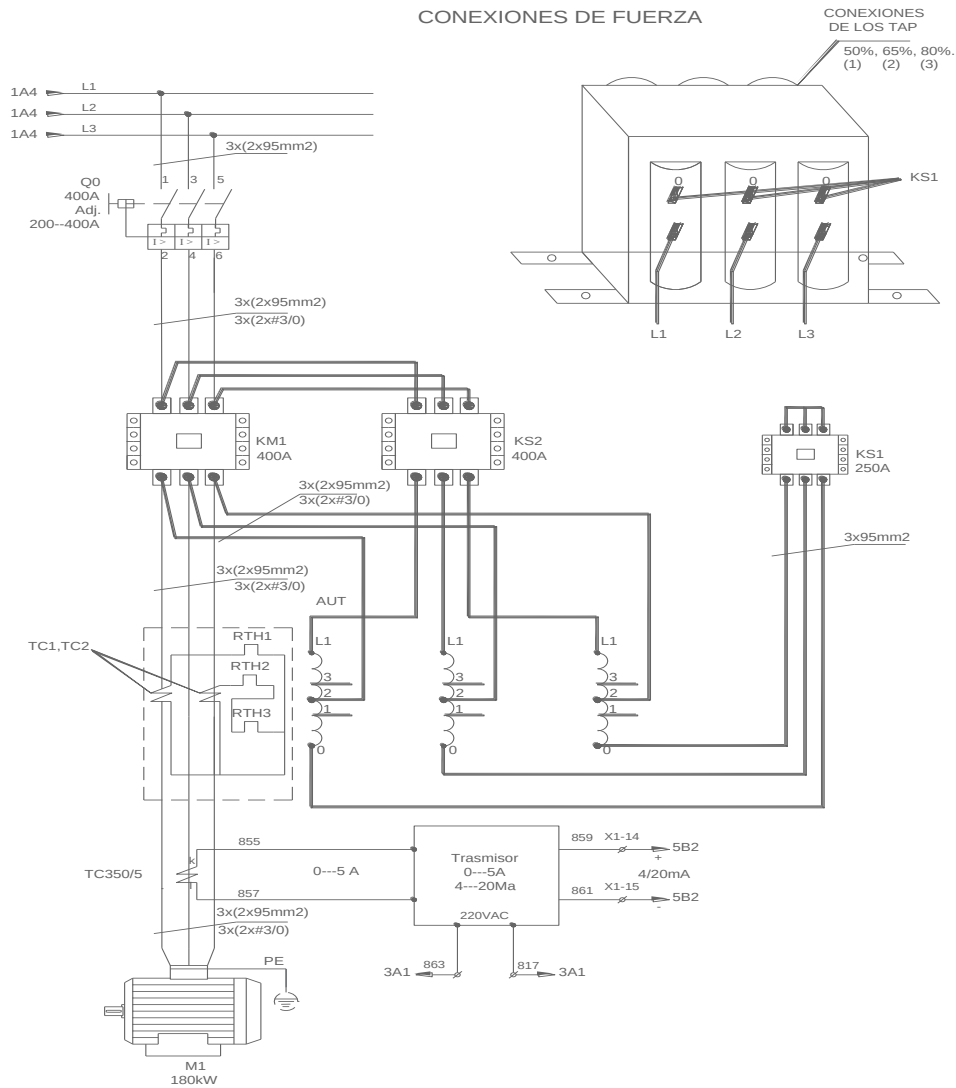
Anexo II

Diagrama de control
VTI-1



Anexo2: Diagrama de control con autotransformador

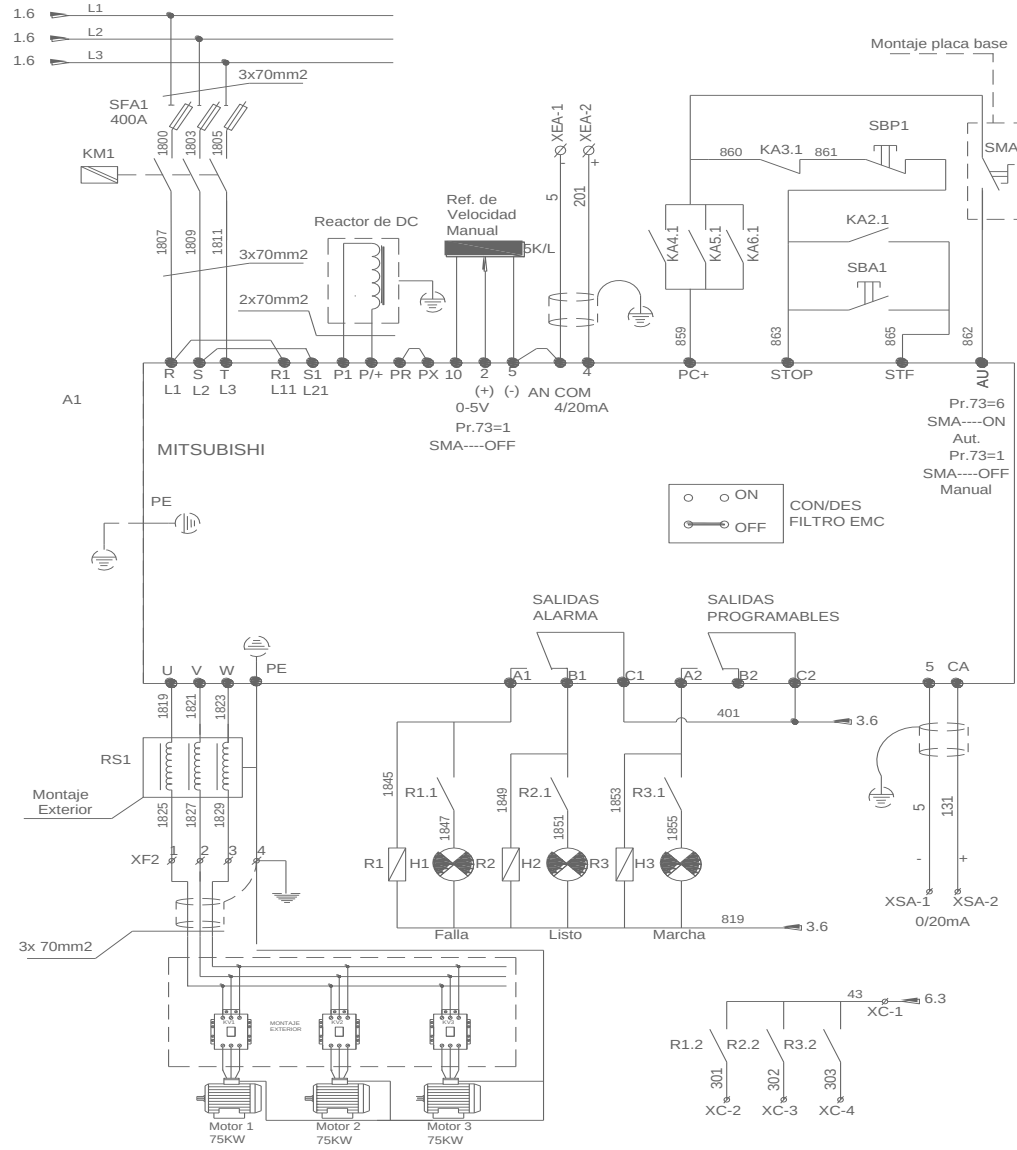
Anexo III



Anexo3: Circuito de fuerza con autotransformadores

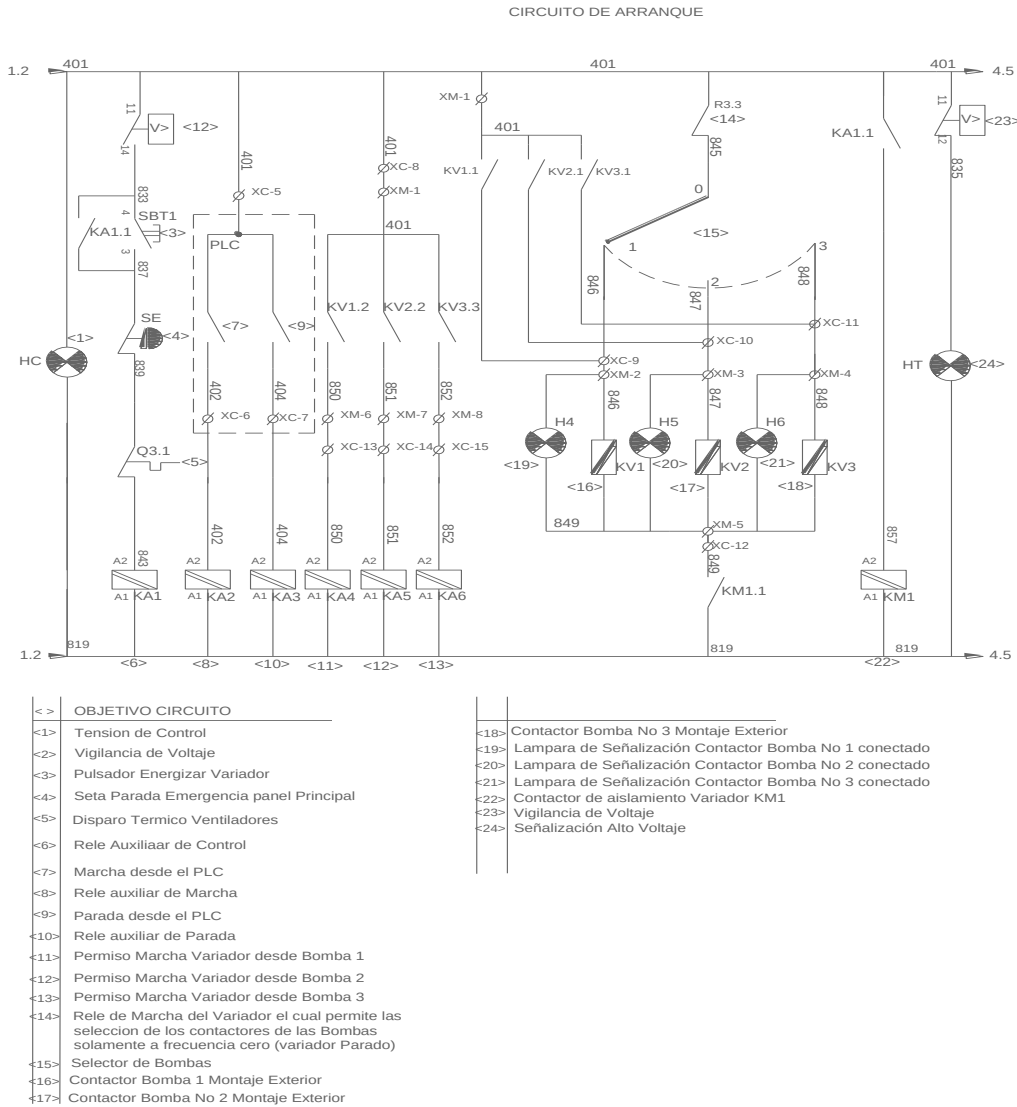
Anexo IV

ALIMENTACION Y MANDO



Anexo4: Circuito de alimentación y mando del variador

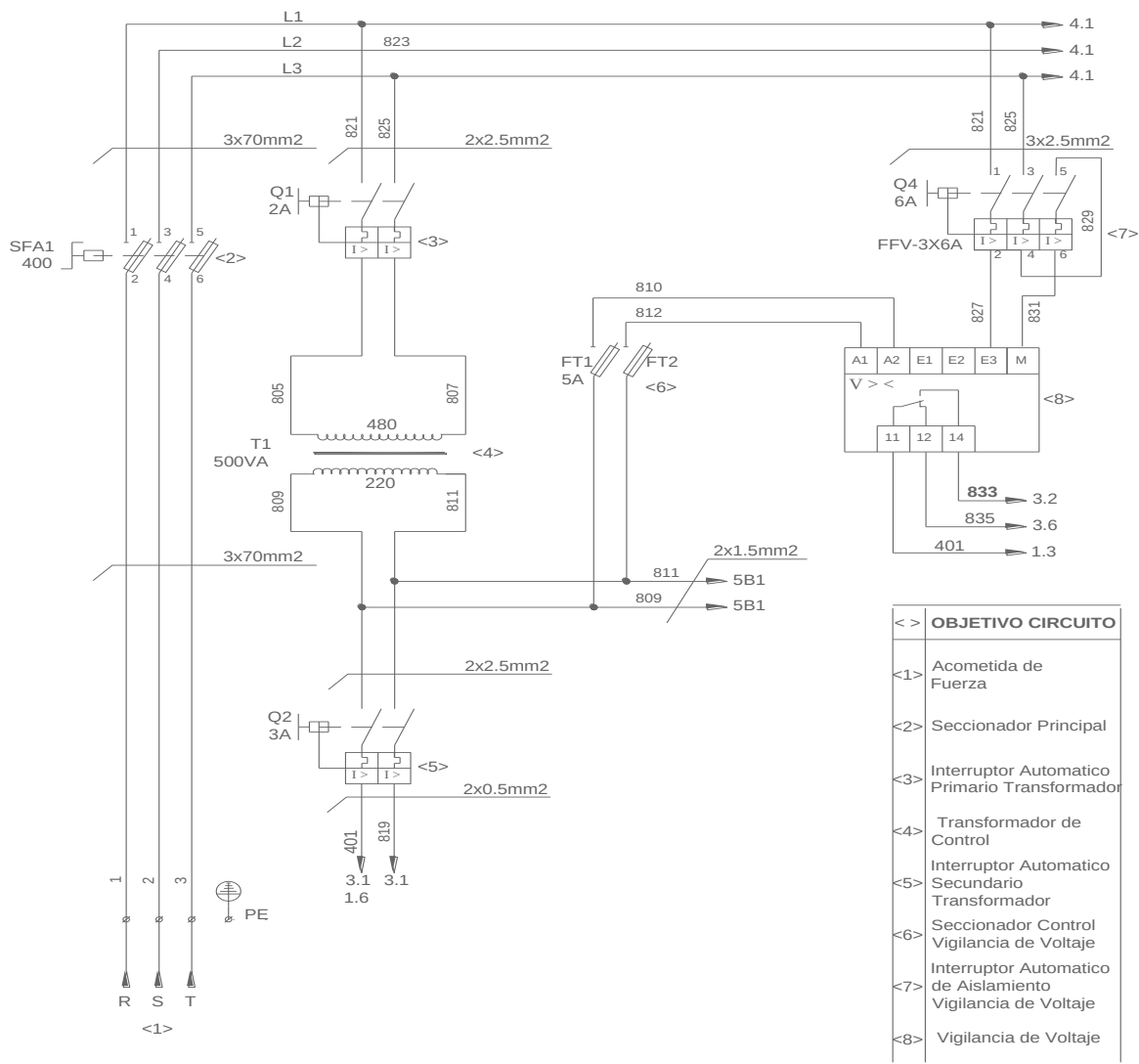
Anexo V



Anexo5: Circuito de arranque de la bomba con el variador.

Anexo VI

CONTROL DE VELOCIDAD BOMBA J. MEZCLADO
CON SELECCIÓN DE BOMBAS



Anexo6: Circuito de la alimentación de control del variador

Anexo VII



Anexo7: Foto interior del panel

Anexo VIII



Anexo8: Foto exterior del panel