

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Estudio del variador de frecuencia Mitsubishi Electric FR-A720 para aplicaciones de control en motores trifásicos.

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Ruhaine Herrera Acosta

Tutor: Msc. Orlando Urquijo Pascual

Santa Clara

2015

“Año 57 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Estudio del variador de frecuencia Mitsubishi Electric FR-A720 para aplicaciones de control en motores trifásicos.

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Ruhaine Herrera Acosta
rhacosta@uclv.edu.cu

Tutor: Msc. Orlando Urquijo Pascual Prof. Asistente
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: orlandop@uclv.edu.cu

Santa Clara

2015

“Año 57 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 Ingeniería en Automática, autorizando 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.

Ruhaine Herrera Acosta
Autor

Fecha

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.

Ruhaine Herrera Acosta
Autor

Fecha

Iván Santana Ching, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr.C., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“Cuando la miseria se multiplica y la esperanza huye del corazón de los hombres, el tiempo de los flojos no cuenta, ... solo el del coraje.”

Oscar Niemeyers

DEDICATORIA

A mi mamá,
*que es madre y amiga, por anhelar tanto este momento y estar tan orgullosa de mí,
por hacer suyos mis logros.*

A mi papá,
*por ser el mejor de los padres, apoyarme siempre y darme la confianza para realizar
mis sueños.*

A mis abuelos,
por darme todo el amor del mundo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser los mejores y confiar en mí, por alentarme siempre a estudiar y superarme.

A mis abuelos, por su cariño, consejos y apoyarme siempre.

A mi tutor, Orlando Urquijo, por brindarme su ayuda y dedicarle tiempo a este trabajo.

A Shaki, por estar en las buenas y en las malas y ser la hermana que no tengo.

A mi familia, por ser parte fundamental de mis logros.

A Xioma y Orestico, por quererme como una hija más.

A Rache, por la fidelidad en estos 5 años juntas y aguantar mis resabios, por contagiarme siempre con su alegría.

A Andrés, por convertirse tan rápido en alguien muy especial.

A los amigos que siempre llevaré en mi corazón, Yissel, Osiel, Téllez y Carlos (los chambones), Xavi, Francis, Wendy, Lili, Jessica, Oski, Uría, Jorge, Tatico, Yosley, Alberto, Alvaro, Eliseo y el Pelú.

A todos mis compañeros de aula, por hacer que estos 5 años fueran maravillosos.

A Valeriano, por estar siempre dispuesto a ayudar.

A mis vecinos Faury y Yelena, por estar siempre pendientes.

A todos los profesores de la carrera que me han aportado un poco de sus conocimientos, en especial a María y José Omar, por dejar huellas en mis compañeros y en mí.

A Picante y Trapito, por ayudarme tanto.

A todos los que confiaron en que podía lograrlo y a los que pensaron que sería imposible, muchas gracias.

Santa Clara, Cuba, 2015

RESUMEN

La mayoría de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, por ejemplo, los mecanismos de elevación y 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, y garantizar la seguridad de personas y bienes. Un método eficaz y eficiente para la variación de velocidad hoy en día es el uso de variadores de frecuencia aplicados a los motores asíncronos, principalmente aquellos que emplean el principio de control por modulación del ancho de pulso (PWM), los que permiten lograr la regulación de la velocidad con una alta eficacia y eficiencia.

En este trabajo se realiza un estudio del variador de frecuencia Mitsubishi FR-A720 analizando el funcionamiento del mismo y el comportamiento de las estrategias de control implementadas en él, y se evalúan sus potencialidades en el control de motores trifásicos.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA	4
1.1. Introducción	4
1.2. Variador de frecuencia	4
1.2.1. Principio de funcionamiento	4
1.3. Tipos de variadores de frecuencia	6
1.4. Aplicaciones de los variadores de frecuencia	8
1.4.1. Aplicaciones en sistemas de control	10
1.4.2. Aplicaciones en Cuba	11
1.4.3. Industrias donde se utilizan	12
1.5. Principales fabricantes	13
1.6. Consideraciones finales del capítulo	14
2. INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL VARIADOR DE FRECUEN- CIA FR-A720	16
2.1. Introducción	16
2.2. Instalación y manipulación	16
2.2.1. Manejo y ajustes	18
2.2.2. Parámetros básicos	18
2.2.3. Acondicionamiento y protección del circuito de control	20

2.2.4.	Resistencia de frenado externa (tipo FR-ABR)	22
2.2.5.	Ejecución y parada del motor	23
2.2.6.	Conexión del motor con encoder	24
2.2.7.	Funciones de protección y diagnóstico	24
2.3.	Modos de operación	25
2.3.1.	Modo de funcionamiento PU	25
2.3.2.	Modo de funcionamiento externo	25
2.4.	Métodos de control	26
2.4.1.	Control vectorial	26
2.4.2.	Control vectorial avanzado de flujo magnético	28
2.4.3.	Control vectorial sin sensores en tiempo real	29
2.5.	Consideraciones finales del capítulo	32
3.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	33
3.1.	Introducción	33
3.2.	Control por modo externo	33
3.2.1.	Control de posición	35
3.2.2.	Control de velocidad	35
3.3.	Control por modo interno	37
3.4.	Ejemplos de aplicaciones	38
3.5.	Análisis económico	40
3.6.	Consideraciones finales del capítulo	41
	CONCLUSIONES	42
	RECOMENDACIONES	43
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
A.	Principales fabricantes	46
B.	Circuitos	48
C.	Unidad de control FR-A7AP	49
D.	Características de hardware empleado	50

E.	Control de velocidad por control vectorial sin sensores en tiempo real . . .	52
----	--	----

INTRODUCCIÓN

Para arrancar los motores eléctricos y controlar su velocidad, fueron una primera solución los reostatos de arranque, los variadores mecánicos y los grupos giratorios; posteriormente los arrancadores y variadores electrónicos se han impuesto en la industria como la solución moderna, económica, fiable y sin mantenimiento.

El comando y protección electrónica de motores provee un desempeño mayor que las soluciones tradicionales electromecánicas. Cuando la necesidad sea arrancar un motor, la opción será elegir entre los métodos tradicionales electromecánicos de arranque y un arrancador electrónico progresivo. Si las necesidades de la aplicación son de variar velocidad y controlar el par de torsión, las opciones son utilizar alguna solución mecánica, un motor especial (de corriente continua, servo, etc.), o un motor asincrónico jaula de ardilla con variador de frecuencia (Clenet, 2008).

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, por ejemplo, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, entre otros. En estos, es necesario un excelente control de la velocidad para lograr que el producto tenga una buena terminación. Hoy en día para la variación de velocidad uno de los métodos más eficientes es la utilización de variadores de frecuencia acoplados a motores asincrónicos, mayormente los que emplean el principio de control por modulación de ancho de pulso (PWM) (Viego, 2008).

Un variador o arrancador electrónico es un convertidor de energía cuya misión es controlar la velocidad que se proporciona al motor. Los arrancadores electrónicos se destinan exclusivamente a los motores asincrónicos y forman parte de la familia de los reguladores de tensión. Los variadores de velocidad o inversores aseguran una aceleración y desaceleración progresivas y permiten fijar con precisión la velocidad en las condiciones de explotación.

Históricamente, el variador para motor de corriente continua fue la primera solución propuesta. Los avances de la electrónica de potencia y de la microelectrónica han permitido la construcción de convertidores de frecuencia fiables y económicos. Los convertidores de frecuencia modernos permiten la alimentación de motores asincrónicos

estándar con prestaciones análogas a los mejores variadores de velocidad de corriente continua (Clenet, 2008).

En adición a su función de regular la velocidad, los convertidores de frecuencia actuales ofrecen otras características ventajosas. Una nueva generación de accionamientos de velocidad variable, que permite que los motores asincrónicos sean tan controlables y eficientes como sus contrapartes de corriente directa, ha evolucionado rápidamente con los avances de la electrónica del estado sólido y sin los grandes costos que anteriormente implicaba. Los nuevos sistemas de accionamiento, como los que emplean control por modulación del ancho del pulso (PWM), permiten lograr la regulación de la velocidad con una alta eficacia y eficiencia (Viego, 2008).

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

De manera general los inversores acoplados a motores trifásicos tienen sus principales aplicaciones en ascensores y elevadores para arranque y paradas suaves, en máquinas textiles y bombas. Su utilización en sistemas de bombeo presenta numerosas ventajas como disminución de daños en la bomba, causados por cambios bruscos de flujo. En aplicaciones de calefacción es muy útil también consiguiendo un ahorro considerable de energía (IFI, 2014). En Cuba el aprovechamiento de estos equipos ha aportado una tecnología más novedosa en la industria azucarera obteniendo un gran ahorro de energía en el proceso productivo (OEI, 2008).

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

A partir de la entrega del variador de frecuencia FR-A720 por parte de la Tarea Triunfo perteneciente a las Fuerzas Armadas Revolucionarias, al Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (*GARP*), se realiza un estudio del dispositivo con el objetivo de evaluar sus potencialidades en el control de motores trifásicos.

Situación problémica:

Debido a que se desconocen las estrategias de control para motores trifásicos que presenta el variador de frecuencia FR-A720 Mitsubishi Electric, se hace necesario realizar un estudio para analizar las potencialidades del mismo y aplicar estas estrategias en la industria cubana actual.

Para el desarrollo de este trabajo, y con el objetivo de ofrecer datos validados, se cuenta con una estación de prueba con un variador de frecuencia Mitsubishi FR-A720, adquirido por el Departamento de Automática de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV).

Los objetivos, **general y específicos, se plantean de la siguiente manera:**

Objetivo General:

Evaluar las potencialidades para propósitos de control en motores trifásicos del variador de frecuencia FR-A720 para mejorar el desempeño de los motores.

Objetivos Específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de la utilización de los variadores de frecuencia como controladores en la industria para el control de motores trifásicos.
- Describir el funcionamiento del variador de frecuencia FR-A720.
- Explorar las estrategias de control que incluye este variador.
- Evaluar el comportamiento de las estrategias de control en un motor trifásico.

Contenido de la Tesis:

En la Introducción queda definida la importancia, actualidad y necesidad del tema que se aborda y se dejan explícitos los elementos del diseño teórico de la investigación.

La investigación incluye tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo I: En el capítulo inicial de la tesis se realizará la conceptualización general de los principales aspectos referentes a los variadores de frecuencia. Se identificarán los fundamentales tipos de variadores, así como sus ventajas y principales aplicaciones en la industria.

Capítulo II: En este capítulo se realizará una descripción detallada del funcionamiento del variador de frecuencia FR-A720, explicando modo de instalación y funcionamiento del mismo y sus diversos modos de control .

Capítulo III: En el tercer capítulo se llevarán a cabo las simulaciones y se expondrán los principales resultados de las estrategias de control identificadas en el variador de frecuencia FR-A720.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA

1.1. Introducción

En este capítulo se hará énfasis en la conceptualización general de los aspectos fundamentales relacionados con los variadores de frecuencia. Se estudiará su principio de funcionamiento así como los fundamentales tipos de variadores y principales aplicaciones en la industria. También se exponen los principales fabricantes a nivel mundial y una breve descripción de sus productos.

1.2. Variador de frecuencia

Se trata de dispositivos electrónicos que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción, los hay de corriente continua (variación de la tensión) y de corriente alterna (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 (*inverter*) o variadores de frecuencia (Calvo, 2011).

Son sistemas utilizados para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna. Un variador de frecuencia se deriva de un variador de velocidad, ya que llevan un control de frecuencia de alimentación, la cual se suministra a un motor.

Otras formas conocidas de los variadores de frecuencia son los llamados drivers, ya sea de frecuencia ajustable (ADF) o de CA, VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia), micro drivers o inversores; esto depende en gran parte del voltaje que se maneje (Campbell, 1987; Jaeschke, 1978; Siskind, 1963).

1.2.1. Principio de funcionamiento

Los variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad sincrónica de un motor de corriente alterna está determinada por la frecuencia de corriente alterna suministrada y el número de polos en el estator. La velocidad del motor cambia en la misma proporción en que cambia la frecuencia; así, el motor puede girar lento o muy rápido según la frecuencia suministrada por el variador (Calvo, 2011).

El circuito de potencia que se muestra en la Figura 1-1 es un convertor CA/CD/CA, está compuesto por los bloques 1, 2 y 3, y está separado de la placa de control (bloque 4) ya que manejan distintos niveles de potencia.

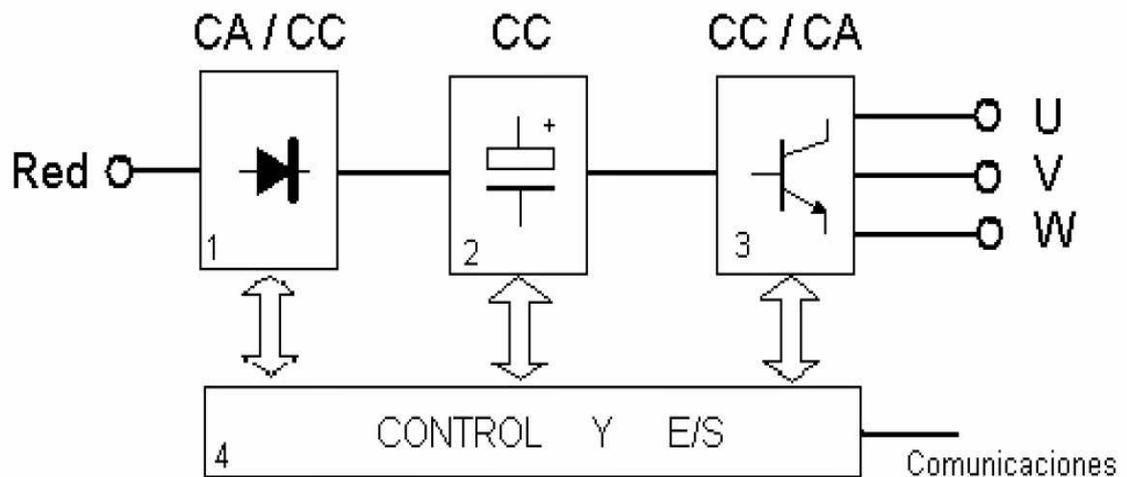


Figura 1-1: Diagrama de bloques de un variador de frecuencia

- 1.- Rectificador: Partiendo de la red de suministro de corriente alterna trifásica, se obtiene corriente continua (C.C) mediante diodos rectificadores.
- 2.- Bus de continua: Condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la corriente continua rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
- 3.- Etapa de salida: Convierte el voltaje continuo del circuito intermedio en uno de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Para esto los variadores emplean IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistor*, Transistor Bipolar de Puerta Abierta) que generan los pulsos de voltaje de manera controlada.
- 4.- Control y E/S: Circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación, etc., y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además se incluye la interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario. Estos dispositivos electrónicos ajustan la tensión y la frecuencia de alimentación del motor a un valor que decida el usuario, y además, son capaces de regular la velocidad manteniéndola a valor constante e inmune a las variaciones de carga. Se basan en la conmutación de transistores de potencia y el método de generación de tensiones de distintas frecuencias denominado modulación de ancho de pulso (PWM)(Calvo, 2011).

1.3. Tipos de variadores de frecuencia

- Variadores de frecuencia de corriente alterna:

Estos variadores están diseñados para controlar los vehículos que funcionan con corriente alterna. Ellos se están convirtiendo en el único tipo de variadores de frecuencia. Dentro de esta categoría existen dos variantes:

 - Variadores de frecuencia de voltaje de entrada:

Los variadores de frecuencia de voltaje de entrada (VVI, por sus siglas en inglés) son los tipos más simples de variadores de frecuencia. En este tipo, los dispositivos de conmutación de salida crean una nueva onda sinusoidal de tensión del motor mediante la introducción de una serie de onda cuadrada a diferentes voltajes. Estas unidades trabajan generalmente con la ayuda de un condensador grande.
 - Variadores de frecuencia de fuentes de entrada: Los variadores de frecuencia de fuentes de entrada (CSI, por sus siglas en inglés) son muy similares a los VVIS. La diferencia entre los dos diseños es que los VFD de entrada de la fuente de corriente se las arreglan para forzar una onda cuadrada de corriente en oposición a la tensión. Los VFD de entrada de origen requieren un gran inversor para mantener la corriente lo más constante posible.
- Variadores de frecuencia de corriente directa:

Los variadores de frecuencia de corriente directa funcionan en motores de corriente continua. Este diseño de motor de corriente continua tiene inductores y los circuitos de derivación por separado. La utilización de este tipo de variadores de velocidad se adapta bien a todas las aplicaciones. Los únicos límites vienen impuestos por el propio motor de corriente continua, en especial por la dificultad de conseguir velocidades elevadas y la necesidad de mantenimiento (sustitución de las escobillas). Los motores de corriente continua y sus variadores asociados han sido las primeras soluciones industriales. Después de más de una década, su uso va en constante disminución en beneficio de los convertidores de frecuencia. En efecto, el motor asíncrono es a la vez más robusto y más económico que un motor de corriente continua.
- Variadores de frecuencia de ancho pulso modulado:

El variador de frecuencia de ancho de pulso modulado (*PWM*) es muy popular en la generación de sistemas de alimentación de frecuencia variable, pues tiene una ventaja que lo destaca del resto: con él es extremadamente fácil controlar la frecuencia de la tensión de salida. El diagrama electrónico de un controlador de velocidad típico PWM se muestra en la Figura 1-2.

Este método permite que el motor funcione de manera más eficiente. Los PWM logran esto a través de la utilización de transistores. Los transistores conmutan la corriente directa a diferentes frecuencias y por lo tanto ofrecen una serie de pulsos de voltaje

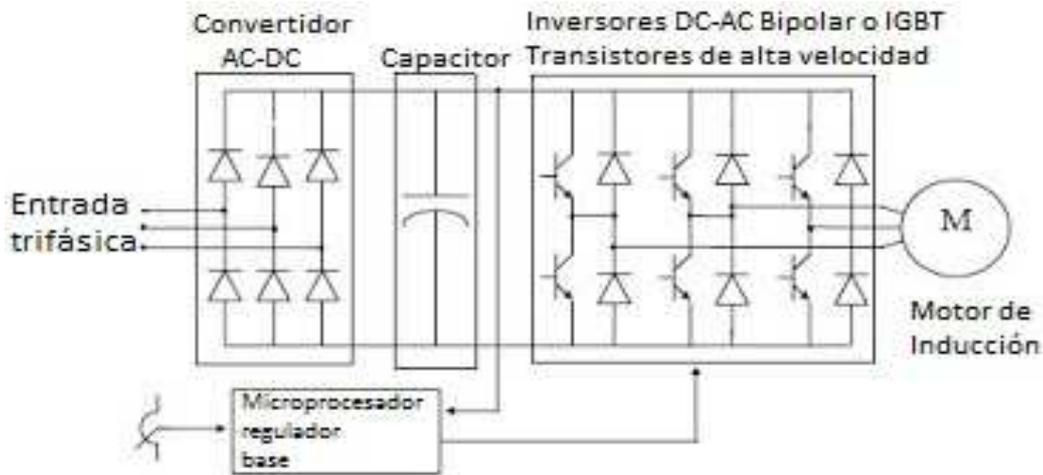


Figura 1-2: Diagrama electrónico de un controlador de velocidad típico PWM.

al motor. Cada uno de estos pulsos está en porciones para reaccionar con el motor y crear la corriente adecuada en él (Mitchell, 2015).

Presenta pocos requisitos de filtrado para la reducción de armónicos y el excelente control de la amplitud de salida, por lo que es importante escoger una estrategia de conmutación para el inversor que sea de fácil realización y permita aplicar al motor la tensión y frecuencia deseadas.

Su principio de funcionamiento consiste en alimentar el equipo con un voltaje de corriente alterna (CA), este primero convierte la CA en corriente directa (CD) por medio de un puente rectificador (diodos o SCR's), este voltaje es filtrado por un banco de capacitores interno, con el fin de suavizar el voltaje rectificado y reducir la emisión de variaciones en la señal; posteriormente en la etapa de inversión, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que encienden y apagan en determinada secuencia (enviando pulsos), se genera una forma de onda cuadrada de voltaje de CD a una frecuencia constante y su valor promedio tiene la forma de onda senoidal de la frecuencia que se aplica al motor. El método básico consiste en generar una onda senoidal de bajo contenido armónico, de la misma frecuencia que la onda de salida del inversor, y con una amplitud proporcional a la requerida y compararla con una onda de tensión triangular simétrica de frecuencia elevada. Los puntos de intersección de la onda senoidal (moduladora) con la triangular (portadora) determinan los instantes de conmutación de los semiconductores y, en consecuencia, la anchura de los sucesivos bloques de tensión continua aplicada a la salida. Así pues, la modulación se basa en la modificación de la anchura de pulsos, en función del valor eficaz de la onda de salida requerida como se observa en la Figura 1-3 (Donsión, 2004).

- Variadores de frecuencia de vector de flujo de ancho de pulso modulado:
Utilizan un tipo de sistema de control por lo general más estrechamente asociado

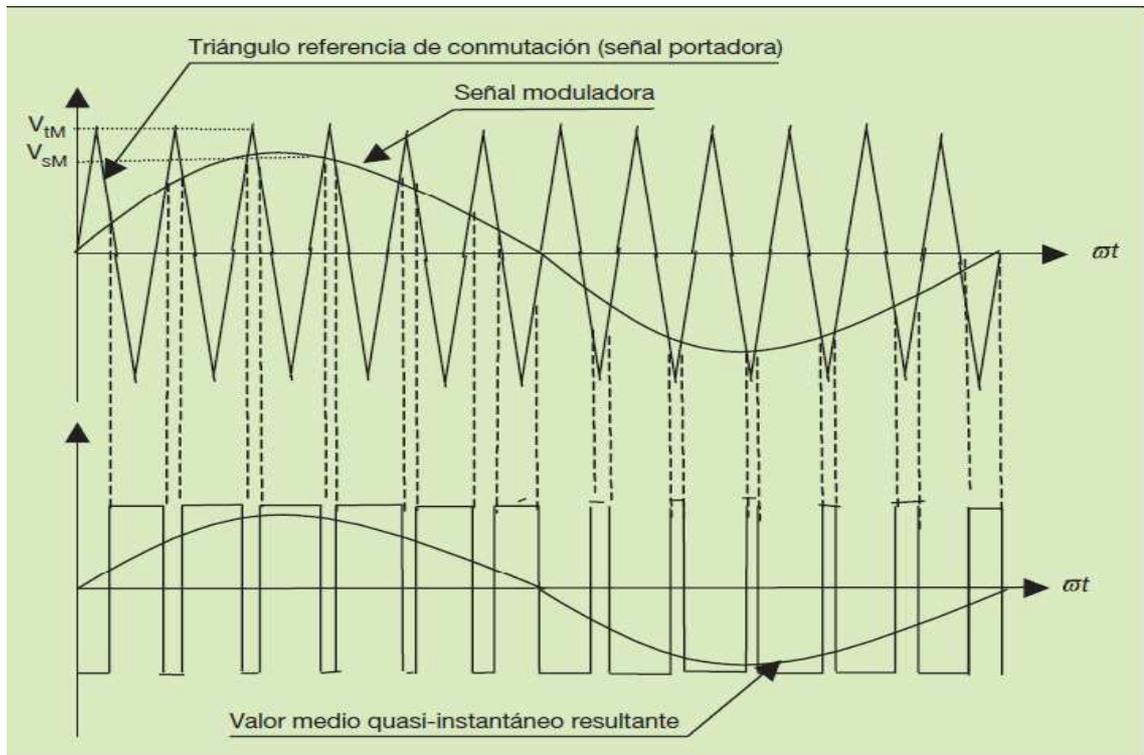


Figura 1-3: Principio de funcionamiento de la técnica PWM.

con motores de corriente continua. Estas unidades tienen un microprocesador que está conectado al motor a través de un control de lazo cerrado. Esto permite que el procesador regule más de cerca cómo funciona el motor (Mitchell, 2015).

El método de control de par usado en el variador de frecuencia de flujo vectorial es similar al usado en los de CD, que incluyen un amplio rango de velocidades con una rápida respuesta. La posición y velocidad del rotor es monitoreada en tiempo real a través de un codificador digital que determina y controla la velocidad, par y potencia del motor.

La gran mayoría de fabricantes tienen variadores de frecuencia con tecnología enfocada al control de par más que al control de velocidad. El objetivo es controlar el par del motor en lugar de la velocidad y por lo tanto tienen respuestas más rápidas y precisas a las variaciones del par demandado por la carga. Este tipo de variador es ideal para aplicaciones de una complejidad mayor que generalmente se controla con motores de CD como extrusoras, grúas, elevadores, máquinas de papel y molinos, entre otras (Rincón, 2011).

1.4. Aplicaciones de los variadores de frecuencia

De manera general los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en máquinas transportadoras controlando y sincronizando la velocidad de producción de

acuerdo al tipo de producto que se transporta; en bombas y ventiladores centrífugos controlando el caudal; en ascensores y elevadores, para arranque y paradas suaves manteniendo el par del motor constante; en máquinas textiles, para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades de tipo aleatorio para conseguir telas especiales; y en pozos petroleros, donde se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo (IFI, 2014).

Aplicaciones de bombeo

Al variar la velocidad de la bomba, su curva característica también cambia. Como el flujo de salida es directamente proporcional a la velocidad de la bomba centrífuga, si esta gira a una menor velocidad, la curva se desplaza hacia abajo. Este ejemplo muestra que el método de control de flujo más eficiente corresponde a aquel que usa un variador de frecuencia, logrando un 50 % de disminución de la potencia requerida.

El uso de variadores de frecuencia en aplicaciones de bombeo disminuye el costo de vida de la bomba y presenta un menor costo de mantenimiento y reparación, a causa de la reducción del estrés mecánico de la bomba, de riesgos de cavitación, de daño en bomba debido a cambios bruscos de flujo, asociados a la partida de esta; y permite la aplicación de bombas en paralelo (redundantes), controladas según la demanda de flujo solicitada (Ludueña, 2007).

Sistema de bombeo de agua

Un sistema de bombeo de agua accionado mediante un variador de velocidad proporciona una operación más suave que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante. A modo de ejemplo, en las estaciones de bombeo de una planta de tratamiento, las aguas residuales circulan por el alcantarillado y por la fuerza de gravedad pasan a las instalaciones sumergidas o pozos. Desde ahí se bombea para pasar al proceso de tratamiento y saneamiento. Cuando se utiliza una bomba impulsada por un motor que opera a velocidad fija, la bomba se activa cuando el flujo alcance un nivel máximo y se apaga cuando no detecta flujo. La repetida activación y desactivación de la bomba puede dar lugar a altas corrientes en el circuito de arranque del motor eléctrico y como consecuencia, los equipos de control y motores están sujetos a severos esfuerzos eléctricos y térmicos, el sistema de bombeo y la tubería están sometidos a mayores tensiones hidráulicas y mecánicas, y el proceso de depuración de las aguas residuales tiene que dar cabida a cambios súbitos en el flujo de agua. Resulta mucho más eficiente el control automático de bombas con velocidad ajustable porque estos variadores adaptan la potencia y velocidad de las bombas al flujo entrante y saliente de agua, provocando así un ahorro considerable de energía y una operación más suave de todo el proceso.

Otra aplicación de los variadores de frecuencia es en un sistema de flujo variable de refrigerante. Estos sistemas conectan uno o más compresores a un sistema común de abastecimiento de refrigerante que alimenta múltiples evaporadores. En las tuberías de refrigerante en vez de conductos de aire, se reducen considerablemente los requisitos de distribución de energía. Debido a que la carga en el compresor está en constante cambio por la demanda de los evaporadores, puede usarse un variador para controlar la velocidad de funcionamiento del compresor para que coincida con la carga. De esta forma se reducen los requerimientos de energía bajo condiciones de carga parcial ([ATOM, 2011](#)).

Motores y ventiladores en aplicaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)

La mayoría de los sistemas de caudal de aire variable consisten básicamente de compuertas de entrada colocadas a un rotor o en algunos casos de una polea de paso variable para regular el caudal de aire. Para todas estas aplicaciones la utilización de un variador de velocidad resulta mucho más eficiente y económico. Para las instalaciones que cuentan con un sistema de control centralizado de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*HVAC*), un variador de velocidad puede instalarse para conseguir el máximo ahorro en energía eléctrica.

1.4.1. Aplicaciones en sistemas de control

En ([ATMEL, 2005](#)) se realiza una descripción sobre cómo pueden implementarse fácilmente las técnicas de control de un motor de inducción AC utilizando variadores de frecuencia con el algoritmo PWM en un AT90PWM3, un microcontrolador basado en AVR RISC dedicado a las aplicaciones de control de potencia. Los algoritmos de control se han aplicado en la AT90PWM3, un microcontrolador de bajo costo, baja potencia y de un solo encapsulado, y adecuado para el control de motores trifásicos de inducción y motores de corriente continua sin escobillas. Las principales características que hacen que este dispositivo sea adecuado para aplicaciones de control de motores son los tres controladores de potencia de una etapa (llamado PSC). Esto permite generar cualquier onda trifásica por modulación de ancho de pulso, con una gestión sencilla del inversor en tiempo muerto.

En ([Ogbuka, 2009](#)) se realiza un análisis basado en Fourier, el cual se utiliza para determinar el efecto de la tensión de alimentación no sinusoidal en las corrientes del motor. El motor de inducción tiene dos limitaciones inherentes:

1. El motor estándar no es una verdadera máquina de velocidad constante, su deslizamiento a plena carga varía desde menos de 1 % a más del 5 %.

2. No es, inherentemente, capaz de proporcionar operaciones de velocidad variable.

Estas limitaciones pueden ser resueltas mediante el uso de variadores de frecuencia. La acción básica de control es aplicar variables de frecuencia a variables de magnitud de voltaje AC al motor para alcanzar los objetivos de la operación a velocidad variable.

Los resultados obtenidos muestran las variaciones por ciclo de la tensión de alimentación y las corrientes de motor para el motor de inducción de la muestra. Se ha observado que los componentes armónicos son muy insignificantes en comparación con los componentes fundamentales. Esto hace posible el funcionamiento seguro del motor incluso en la presencia de estos componentes armónicos.

En (Shinde, 2014) se elabora un análisis acerca del control de velocidad en motores de inducción utilizando variadores de frecuencia y se llega a la conclusión de que la adición de una unidad de frecuencia variable a un sistema con motor puede ofrecer ahorros potenciales de energía en un sistema en el que las cargas varían con el tiempo. La velocidad de funcionamiento de un motor conectado a un variador de frecuencia se varía cambiando la frecuencia de la tensión de alimentación del motor y esto permite el control de la velocidad del proceso continuo.

1.4.2. Aplicaciones en Cuba

Científicos del Departamento de Sistemas y Automática de la Universidad de Valladolid y de la Universidad cubana de Oriente trabajan en un proyecto que busca introducir mejoras tecnológicas en la industria azucarera de Cuba. Bajo el título “Control del Movimiento en la Industria Azucarera Cubana” se pretende automatizar y optimizar energéticamente el transporte de la caña hasta los molinos. Este transporte constituye el primer paso del proceso y en la actualidad se realiza de forma manual y poco eficiente. Las cañas se transportan en esteras movidas por grandes motores de rotor bobinado, muy ineficientes y con los que se pierde mucha energía y calor. En los estudios que se han realizado se ha puesto de manifiesto que pueden trabajar con menos capacidad y ser más eficientes. Así, proponen sustituir estos motores de rotor bobinado (parte móvil del motor compuesta por cables de cobre conectados en un punto común) por otros más eficientes de jaula de ardilla alimentados con convertidores de frecuencia. Se trata de una tecnología más novedosa que supondría un ahorro energético en el proceso productivo, teniendo en cuenta que el transporte de las cañas a los molinos es la fase industrial que consume mayor energía (OEI, 2008).

Para una mayor producción azucarera, AZCUBA introduce hoy en la zafra tecnologías como la automatización de centrífugas en más de treinta centrales, el alistamiento de

once sistemas de procesamiento de biomasa y el montaje de variadores de frecuencia en los motores donde sea realmente útil y necesario para el ahorro energético, las cuales están destinadas a hacer más eficiente el proceso en las áreas industrial y energética, según un directivo de ese grupo empresarial (Méndez, 2011).

1.4.3. Industrias donde se utilizan

- *Metalúrgica*: Caños, chapas y laminados, perfiles de hierro, aluminio, cables, tornerías, electrodomésticos, revestimiento de caños, fundiciones, fresadoras, electrodos.
- *Alimenticias*: Pastas secas, pastas frescas, chocolates, lácteos, azúcar, frigoríficos, quesos, grasas animales, molinos harineros, mantecas, criaderos de pollos, aceiteras, frutícolas, aguas minerales, cerveceras, productos balanceados.
- *Construcción*: Edificios, autopistas, tejas, azulejos, pisos, ladrillos, bloques, fibrocemento, sanitarios, caleras, arenas especiales.
- *Automovilísticas*: Montadoras de autos, montadoras de camiones, ómnibus, tapizados, plásticos, radiadores, neumáticos, rectificadora de motores.
- *Plásticos*: Perfiles, impresoras, envases, juguetes, muebles, bolsas.
- *Papeleras*: Papel, cartón, cajas, papel higiénico, bobinas, bolsas, envases.
- *Cueros*: Tintorerías, calzados, ropas.
- *Químicas*: Laboratorios medicinales, adhesivos, detergentes, jabones, explosivos, acrílicos, anilinas, insecticidas, fertilizantes, petroquímicas.
- *Petroleras*: Petróleos, refinerías, lubricantes, destilerías.
- *Textiles*: Tejidos, tintorerías, lavaderos, hilanderías.
- *Madereras*: Aserraderos, muebles, impregnadoras, laminados, tableros, terciados.
- *Caucho*: Neumáticos, gomas, látex.

- *Otras*: Aeronáuticas, tabacaleras, vidrio, aguas sanitarias, universidades, empresas de ingeniería, minería, acerías, agropecuarias, preparadores de vehículos de competición.

1.5. Principales fabricantes

Numerosas compañías se dedican a la fabricación de estos dispositivos que constituyen un factor fundamental en el desarrollo de la industria moderna. Los principales fabricantes de variadores de frecuencia (Ver Anexo A) son:

- Schneider Electric (Francia)
- Siemens AG Industry Sector (Alemania)
- Mitsubishi Electric (Japón)
- Hyundai (Corea)
- WEG (Brasil)
- REO AG (Alemania)
- ABB Asea Brown Boveri Ltd (Suiza)

WEG

Los Convertidores de Frecuencia WEG son equipos destinados al control de velocidad de motores eléctricos de inducción trifásicos, para una amplia gama de aplicaciones industriales. Con tecnología de última generación y diseño moderno, permiten una fácil instalación/operación y se adaptan perfectamente a las necesidades de los accionamientos con una excelente relación coste beneficio. Han sido proyectados con software de última generación lo que permite equipos optimizados y una excelente interactividad con el usuario a través de la HMI (Interfaz Hombre Máquina). Además, disponen de funciones y recursos especiales que permiten protección y control (velocidad, par o posición) de los motores eléctricos y proporcionan aumento de eficiencia/productividad de los sistemas. Los Convertidores de Frecuencia WEG pueden operar con el método de control V/F control Vectorial (WEG, 2008).

Siemens

Incorporando los últimos avances en tecnología IGBT Siemens se distingue gracias a su robustez. Ofrece una solución de accionamiento económica con una amplia gama de

componentes y accesorios opcionales, que se puede adaptar a las necesidades específicas del cliente. La mayoría de sus productos presentan integración sin problemas en los sistemas de automatización debido a la interfaz PROFIBUS y las interfaces analógicas y digitales.

Mitsubishi Electric

Mediante el inteligente uso de nuevas tecnologías, los variadores de frecuencia de Mitsubishi Electric son sistemas de accionamiento altamente dinámicos y auténticos ahorradores de energía logrando un ahorro de hasta el 60 %, reduciendo así al mismo tiempo las emisiones de dióxido de carbono y contribuyendo a preservar el medio ambiente. Presentan numerosas funciones de protección y de sobrecarga, condensadores de alta calidad resistentes a la temperatura, ventiladores de refrigeración de lubricación permanente, así como platinas de control y de potencia con doble capa de barniz garantizan un funcionamiento seguro y exento de problemas.

Desde aplicaciones comerciales hasta aplicaciones en la industria pesada, estos variadores de frecuencia convencen cada día una y otra vez por su efectividad de costos, su fiabilidad, su funcionalidad y su flexibilidad. Para la realización de este estudio se escoge el variador FR-A720 de este fabricante, el cual combina funciones innovadoras y tecnología fiable con la máxima potencia, economía y flexibilidad. Es especialmente adecuado para aplicaciones como grúas y aparatos elevadores, sistemas de estanterías de almacenamiento, extrusoras, centrífugas y máquinas de bobinado exigente. Está equipado de unidades de mando integradas. Las unidades de mando permiten la supervisión y la visualización de los datos de funcionamiento, a través de esta es posible controlar un variador y con ello el motor conectado; esto resulta particularmente útil para la búsqueda de fallos o la comprobación de funciones. La serie FR-A700 de Mitsubishi dispone de una regulación vectorial sin sensores para el máximo rendimiento del accionamiento y ofrece alta tecnología al máximo nivel, alta funcionalidad, función de control y de tecnología, capacidad de integración y un concepto mecánico (Electric, 2005).

1.6. Consideraciones finales del capítulo

Luego de realizar un análisis crítico de la literatura consultada, se llega a las siguientes consideraciones:

La mayoría de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, en los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, por lo que resulta conveniente el empleo de un variador de frecuencia.

Existen diversos tipos de variadores, el más utilizado en la industria es el variador de ancho de pulso modulado (*PWM*) debido a la facilidad que presenta para controlar la frecuencia de la tensión de salida, permitiendo que el motor funcione de manera eficiente.

Pueden ser utilizados en numerosas aplicaciones como sistemas de bombeo; métodos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*HVAC*) y también en técnicas de control utilizando un motor de inducción AC.

Los variadores de frecuencia de Mitsubishi Electric son sistemas dinámicos y auténticos ahorradores de energía. Disponen de regulación vectorial sin sensores para el máximo rendimiento del accionamiento y presentan control de posición y velocidad.

CAPÍTULO 2

INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA FR-A720

2.1. Introducción

El FR-A720 es una unidad de alto rendimiento que reemplaza a la popular serie A500(L). Cuenta con muchas de las tecnologías especiales desarrolladas originalmente para los productos de servomotor de Mitsubishi Electric, como el ajuste automático de adaptación que compensa automáticamente los cambios en la inercia de carga. El resultado es un mejor funcionamiento, menos tiempo de inactividad y costos operativos más bajos. Los modos de control incluyen velocidad, par y posición ([Luque, 2014](#)).

En este capítulo se presentan las características generales más importantes del variador de frecuencia FR-A720, se describen el modo de instalación y operación del mismo, así como las diferentes estrategias de control implementadas en este dispositivo.

2.2. Instalación y manipulación

El entorno de instalación del variador de frecuencia debe cumplir con las especificaciones estándar. La operación en cualquier lugar que no cumpla con estas condiciones deterioraría el rendimiento y la vida útil del equipo.

Entorno de instalación

La temperatura ambiente permitida del variador de frecuencia oscila entre -10 y $+50$ °C. El variador siempre debe operar dentro de este rango de temperatura, de lo contrario acortará considerablemente la vida útil de los semiconductores, condensadores y otros componentes. La humedad ambiente debe estar de 45 a 90 %. Un valor de humedad demasiado alto presentará problemas de la reducción del aislamiento y la corrosión del metal. Por otro lado, un valor demasiado bajo puede producir una avería eléctrica. El polvo y la suciedad causarían fallas tales como la falta de contacto de los puntos de contacto, aislamiento reducido o pequeño efecto de enfriamiento debido a la absorción de humedad del polvo y suciedad acumulados, y aumento de la temperatura en el recinto causado por la obstrucción del filtro. En la atmósfera, el polvo y la suciedad

provocarían el mal funcionamiento, aislamiento deteriorado y cortocircuito en un corto tiempo ([Electric, 2014](#)).

Características generales de manipulación e instalación:

- La longitud de los cables hasta el motor no debe exceder los 500 m.
- El inversor siempre debe montarse en forma vertical.
- Cuando se instalan múltiples inversores deben ser puestos en paralelo.
- No debe ser expuesto a gases corrosivos, polvo o suciedad.
- Contra humedad se aconseja la conducción de aire seco al interior del armario de distribución.
- El rango de potencia se encuentra entre 0.4 y 630 kW.
- La frecuencia de entrada oscila entre 50 y 60 Hz, y la frecuencia de salida de 0 a 400 Hz.

Precauciones de uso del inversor

La serie FR-A700 es un producto altamente fiable, pero al armar el circuito periférico se deben comprobar los siguientes elementos para no dañar la vida útil del dispositivo.

- Se deben emplear utensilios con material aislante para conectar la fuente de alimentación y el motor.

- La entrada y salida del circuito principal del inversor incluye componentes de alta frecuencia, que pueden interferir con los dispositivos de comunicación (como radios AM) que se utilizan cerca del inversor. En este caso, es necesario establecer un filtro de red, válido para minimizar interferencia.

- No instalar un condensador de corrección del factor de potencia, filtro supresor de sobretensión o ruido de radio en el lado de salida del inversor, ya que puede provocar daños en la salida de servicio o el condensador.

- La máquina no debe reiniciarse cuando la energía es restablecida después de un corte de energía, se debe proporcionar un contactor magnético (MC) en el lado de entrada del inversor y hacer una secuencia que no se encenderá en la señal de inicio. Si la señal de arranque permanece encendida después de un corte de energía, el inversor se reiniciará automáticamente ([Electric, 2014](#)).

2.2.1. Manejo y ajustes

Los variadores de frecuencia de la serie FR-A700 están equipados de unidades de mando integradas. Estas unidades permiten la supervisión y la visualización de datos de funcionamiento y avisos de alarmas, pero también la entrada y visualización de los ajustes de funcionamiento (parámetros).

Además, a través de la unidad de mando es posible controlar un variador y con ello el motor conectado. Esto resulta particularmente útil para la puesta de funcionamiento en el lugar, la búsqueda de fallos o la comprobación de funciones.

2.2.2. Parámetros básicos

Para un funcionamiento óptimo, un variador de frecuencia tiene que ser adaptado al accionamiento conectado a la aplicación de que se trate. Los ajustes necesarios para ello son denominados parámetros y se guardan en la memoria del variador. Solo es necesario ajustarlos una vez, pues cuando se desconecta la fuente de alimentación no se pierde su valor. A continuación se muestran algunos de los parámetros básicos a ajustar.

Elevación de par de giro (Parámetro 0)

Con ayuda del parámetro 0 es posible elevar la tensión de salida con frecuencias de salida reducidas y elevar así el par de giro. Esta función se utiliza cuando se necesita un alto par de arranque o un alto par de giro a bajas revoluciones.

En la Figura 2-1 se observa el efecto del ajuste del parámetro 0 en la tensión de salida.

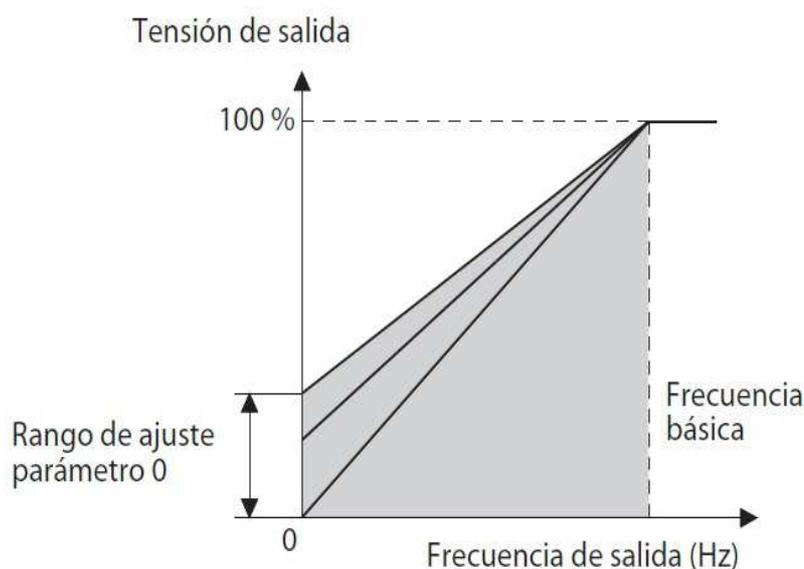


Figura 2-1: Ajuste del parámetro 0 en la tensión de salida.

Frecuencia de salida mínima y máxima (Parámetros 1 y 2)

Las frecuencias de salida mínima y máxima determinan el rango dentro del cual el valor nominal de frecuencia puede regular las revoluciones de un accionamiento.

A través del ajuste de los parámetros 1 y 2 es posible adaptar el rango del valor nominal de frecuencia a las circunstancias y características mecánicas de la máquina. En muchas aplicaciones no es conveniente o posible una parada del accionamiento (frecuencia de salida = 0 Hz) con un valor mínimo. Por otro lado es necesario limitar también la frecuencia máxima de salida y con ello el número máximo de revoluciones, ejemplo, para no sobrecargar a la máquina mecánicamente o para no exceder una determinada velocidad máxima.

La frecuencia de funcionamiento del variador se puede ajustar por el terminal de entrada analógica de ajuste de frecuencia y la entrada digital por la unidad del panel de operación o parámetro. El panel de control permite configurar en incrementos de 0,01 Hz hasta 100 Hz y 0,1 Hz a más de 100 Hz, y la unidad de parámetro permite ajustar en incrementos de 0,01 Hz de su teclado numérico. Como se muestra en la Figura 2-2 la resolución de frecuencia de salida f_{out} no cambia si la frecuencia de salida varía.

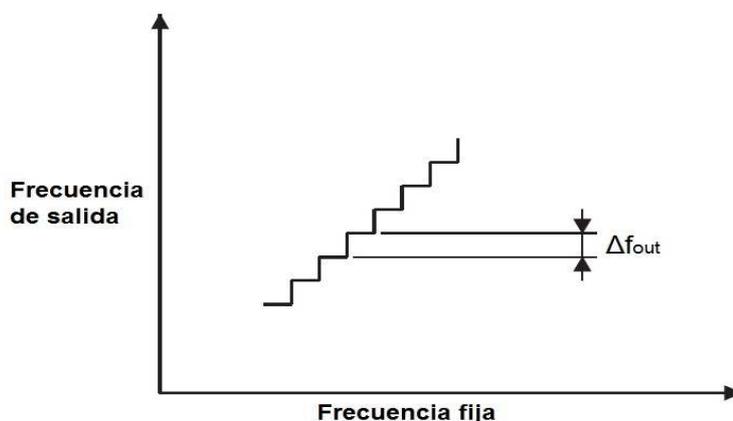


Figura 2-2: Frecuencia de salida.

La resolución de frecuencia para el conjunto de entrada digital se determina por el número de dígitos fijados en el panel de operación. Para la entrada analógica se determina por el número de bits del convertidor analógico digital.

Protección electrónica del motor (Parámetro 9)

Los variadores de frecuencia están equipados con una función electrónica interna para la protección del motor, esta registra la frecuencia y la corriente del motor. En función de estos dos factores y de la corriente nominal del motor, la protección electrónica del motor se hace cargo de disparar las funciones de protección en caso de sobrecarga. Esta función sirve en primera línea como protección contra un calentamiento no permitido cuando se opera con revoluciones parciales y con un par de giro muy alto. Para ello se

toma en consideración, entre otras cosas, la reducción del rendimiento de refrigeración del ventilador del motor.

En el parámetro 9 se indica la corriente nominal del motor. Este dato puede tomarse de la placa de características del motor.

2.2.3. Acondicionamiento y protección del circuito de control

Cuando se trabaje con los terminales externos no se deben fusionar el interruptor y el contactor magnético en el lado de alimentación. Este último puede ser usado para comenzar y detener el motor, sin embargo, no debe ser utilizado con frecuencia ya que puede acortar la vida útil de esta sección del equipo. Para evitar la fusión de estos dos componentes se instala un interruptor específico de circuito en caja moldeada (MCCB) en el lado receptor de energía para proteger el cableado del inversor. Un MCCB de mayor capacidad puede ser necesario a causa del bajo factor de potencia de la fuente de alimentación resultante de la corriente de entrada distorsionada en el lado de entrada de alimentación del inversor. También se recomienda instalar un contactor magnético en el lado de la fuente de alimentación del variador como se muestra en la Figura 2-3 para garantizar la seguridad del mismo en caso de fallos.

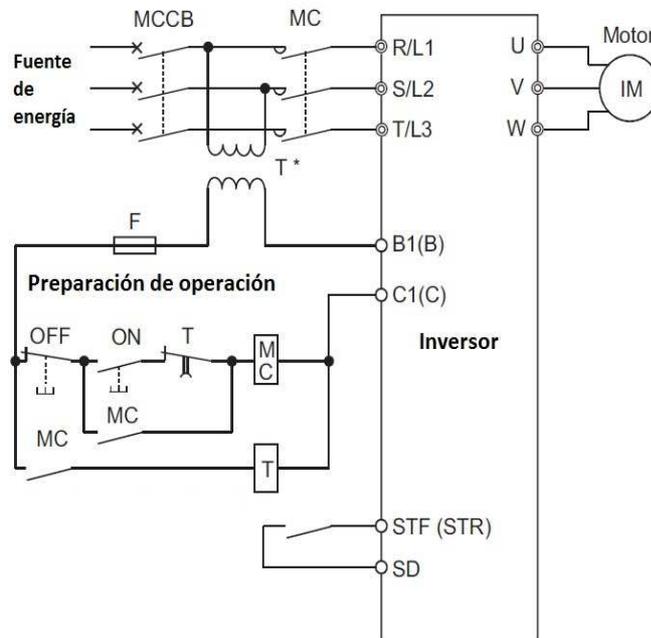


Figura 2-3: Contactor magnético usado en el lado de alimentación.

Filtros de red

Para reducir interferencias de forma efectiva se utilizan los filtros de red, también llamados filtros antiparasitarios. Estos se conectan entre la fuente de alimentación y el

variador de frecuencia (Electric, 2012). En la Figura 2-4 se puede observar la conexión de un filtro de red con fuente de alimentación trifásica.

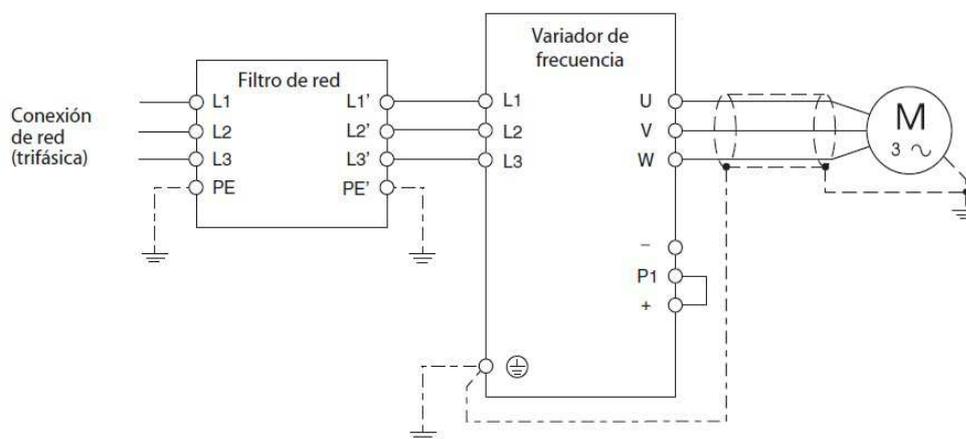


Figura 2-4: Conexión de un filtro de red con fuente de alimentación trifásica.

El empleo de filtros antiparasitarios genera conforme al funcionamiento corrientes de descarga a tierra. Por ello pueden reaccionar los órganos de protección previamente conectados, en especial en caso de tensiones de red asimétricas, fallo de fases de red o conmutaciones antes del filtro.

Conexión externa de alimentación al circuito de control

Si alguna de las funciones de protección (que no sean de alarma del ventilador, vuelco, y las funciones de límite de corriente) se activa, la luz indicadora de alarma se enciende y la señal de fallo correspondiente se emite. Si el contactor magnético en la alimentación del convertidor se desconecta, la señal de fallo en este momento se pierde y la salida de fallo no se puede mantener encendida (ON). Para mantener esta salida de fallo encendida, se utiliza otra fuente de alimentación con el circuito de control (fuente de alimentación con el mismo voltaje que la que se utiliza con el circuito principal). El cable de alimentación a los terminales nunca se debe conectar en la posición equivocada, ya que podría dañar al variador.

El otro bloque de conexión de los terminales de alimentación en la placa de circuito impreso es un bloque de terminales de tipo ‘ ‘dos pasos’ los puentes están conectados a través de los terminales superiores e inferiores. Después de aflojar y eliminar los tornillos y puentes, se conecta una fuente de alimentación externa.

La alimentación de control no se debe desconectar de la alimentación principal del circuito. Cuando la alimentación del circuito principal está encendida, existe una tensión continua en el área de salida del convertidor y la tensión está siendo aplicada a los transistores. Cuando la fuente de alimentación de control está encendida, se aplica un

voltaje de polarización inversa al circuito (puerta) para evitar que los transistores conduzcan. El circuito debe estar configurado para que la alimentación principal también se apague cuando la alimentación de control está apagada (Electric, 2013).

2.2.4. Resistencia de frenado externa (tipo FR-ABR)

Un inversor acepta varias unidades de opción única como requieran. La incorrecta conexión puede causar daños o accidentes.

Una de estas unidades es la resistencia de frenado externa mostrada en la Figura 2-5, la cual es instalada cuando el variador es operado en exceso (Electric, 2014).

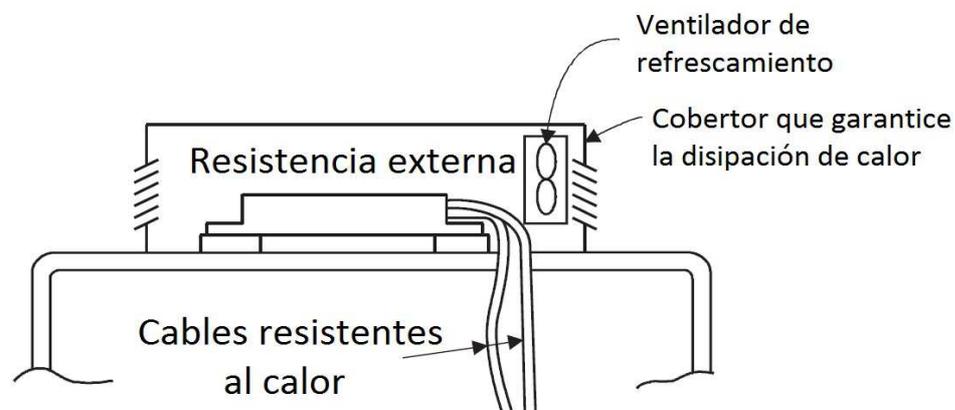


Figura 2-5: Resistencia de frenado externa.

A continuación se especifican algunos detalles de su posición de montaje y cableado (Electric, 2013).

- La conexión se realiza a través de los terminales P/+ y PR como se muestra en la Figura 2-6.
- Cuando el variador A-720 de 7.5 K o menos es operado en exceso, se incorpora al circuito la resistencia de frenado externa.
- Puesto que la resistencia de frenado externa genera mucho calor, su temperatura de superficie puede exceder los $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se debe tener en cuenta la disipación de calor. El inversor y otros dispositivos no deben estar por encima de la resistencia.
- La distancia de cableado debe ser lo más corta posible. Si es superior a 2 m, es recomendable retorcer los cables. (Si es torcido, la distancia no debe ser superior a 5 m).
- En el cableado es necesario tomar medidas para impedir que los cables entren en contacto con la resistencia. Los cables deben ser de 2 mm^2 o mayor medida, resistentes

al calor o cubierto con tubos de silicona.

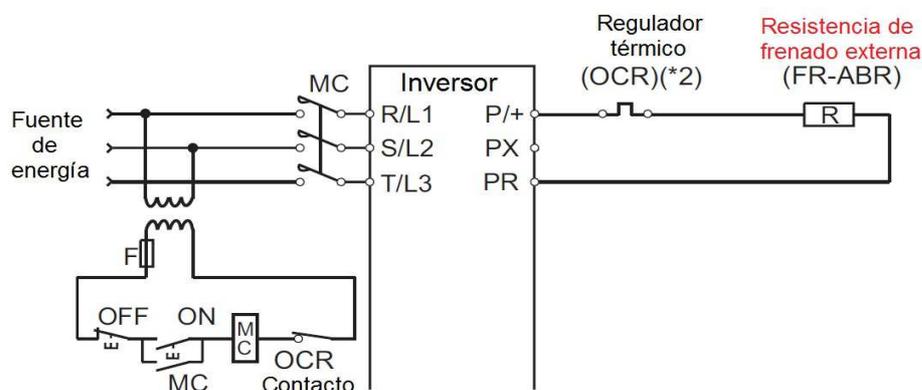


Figura 2-6: Conexión de la resistencia externa a los terminales P/+ y PR.

2.2.5. Ejecución y parada del motor

Para iniciar y detener el motor, primero se enciende la energía de entrada del variador y luego se inicia el motor con la señal de inicio de rotación hacia delante o hacia atrás. Existen dos tipos de conexión para este procedimiento, el tipo de dos cables (STF, STR) y el de tres cables (STF, STR, STOP).

Tipo de dos cables (STF, STR)

Las señales de avanzar (STF) y retroceder (STR) se utilizan para comenzar y parar el motor (Ver Anexo B). Se activa cualquiera de las señales (avanzar y retroceder) para comenzar a girar en la dirección correspondiente. El ajuste de la velocidad puede realizarse mediante la introducción de 0 a 5 V_{DC} a través de la entrada de frecuencia en sus terminales específicos, o mediante la entrada de tres velocidades (alto, medio, bajo). Para detener el motor, se acciona el freno de inyección de corriente directa para el período de tiempo establecido en el parámetro correspondiente al tiempo de operación del freno de inyección a no más de 0,5 Hz.

Tipo de tres cables (STF, STR, STOP)

Se enciende la señal de STOP para activar la función de autoarranque. En este caso, las funciones de la señal de rotación adelante/atrás funcionan solo como señal de arranque. El inversor se desacelera hasta detenerse desactivando la señal de STOP una vez. Para la señal de ajuste de frecuencia y freno de inyección de corriente directa el procedimiento es el mismo que en el tipo de dos cables (Electric, 2013).

2.2.6. Conexión del motor con encoder

El control de la orientación, de realimentación del encoder, de velocidad, de par y de posición por operación de control de vector a escala completa, se pueden realizar utilizando un motor con encoder y la opción del complemento FR-A7AP (Ver Anexo C).

Cuando se utiliza el cable FR-JCBL o FRV5CBL del encoder para el motor convencional, se corta la rugosidad del terminal del cable y se dejan sueltos. Además, se realiza un tratamiento para proteger la pantalla y asegurar que no va a hacer contacto con la zona conductora. Se deben utilizar cables de par trenzado de blindaje de 0.2 mm^2 o más grandes para conectar el FR-A7AP y el detector de posición. La longitud de cableado se puede extender a 100 m incrementando ligeramente la potencia por 5V (aproximadamente 5.5 V) utilizando seis o más cables con medida de 0.2 mm^2 en paralelo o un cable con área de 1.25 mm^2 o más. Es necesario tener en cuenta que la tensión aplicada debe estar dentro de las especificaciones de la fuente de alimentación del encoder (Electric, 2013).

Para la realización de este trabajo no se contó con el complemento FR-A7AP, en su lugar el encoder se conecta al motor y a una tarjeta de adquisición de datos, la cual se comunica con la computadora donde se procesan los datos.

2.2.7. Funciones de protección y diagnóstico

Los variadores de la serie A-700 están equipados con muchas funciones para la protección tanto del variador mismo como también el accionamiento contra daños en caso de que se presente un fallo. En caso de un fallo grave se dispara la función de protección y se bloquea la salida del variador, el motor se detiene libremente sin frenar y en la unidad de mando se visualiza un código de error (Electric, 2012).

En relación a los avisos de error hay que observar las indicaciones que se detallan a continuación:

- Memorización de códigos de error.
Después de que se presenta un fallo, los códigos de error pueden indicarse solo cuando se mantiene conectada la tensión de alimentación del variador.
- Visualización de los avisos de error.
Cuando se dispara una función de protección, en la unidad de mando se visualiza automáticamente el aviso de error correspondiente.
- Reinicio de funciones de seguridad.
En caso de un fallo primero hay que eliminar la causa del mismo y realizar después un reinicio del variador. Después de ello es posible proseguir con el funcionamiento.

2.3. Modos de operación

El modo de funcionamiento se puede seleccionar del panel de operación o con el código de instrucción de comunicación.

El modo de operación especifica la fuente de inicio del comando y la frecuencia de comando para el variador. Básicamente, existen los siguientes modos de operación (Morffi, 2014):

- Mediante el panel externo (PU) Mitsubishi FR-DU07.
- Mediante un potenciómetro con el cual variando su resistencia, varía el voltaje de entrada al inversor.
- Mediante una entrada externa con rango de voltaje 10 V o 5 V, así como corriente normalizada 4 a 20 mA.

2.3.1. Modo de funcionamiento PU

Se selecciona el modo de operación PU cuando se opera con un panel de control FR-DU07/FR-PA07 o mediante teclas de la unidad de parámetros FR-PU04/FR-PU07. Para la serie A700 se selecciona el modo de funcionamiento PU para la comunicación mediante conector PU también.

De modo estándar, el variador de frecuencia FR-A720 se entrega con la unidad de mando FR-DU07. Esta unidad permite un manejo claro y sencillo del variador de frecuencia, así como la visualización de diversas magnitudes de funcionamiento y avisos de error. Con ayuda del dial digital integrado, el usuario puede ajustar la frecuencia manualmente y acceder a todos los parámetros importantes de forma rápida y directa. Con el teclado numérico es posible entrar directamente los datos de funcionamiento. Para la visualización es posible optar entre ocho idiomas diferentes. Se conecta descentralizado al variador de frecuencia por medio de un cable. En la Figura 2-7 se muestra el panel externo correspondiente a la serie A700.

2.3.2. Modo de funcionamiento externo

Se selecciona el modo de funcionamiento externo cuando el inicio de comando y el comando de frecuencia se aplican desde un potenciómetro de frecuencia, interruptor de arranque, una tarjeta de adquisición de datos conectada a una computadora, que se proporcionan externamente y se conectan a los terminales del circuito de control del variador. Básicamente, el cambio de parámetros se desactiva en el modo externo.



Figura 2-7: Panel externo FR-DU07.

El variador de frecuencia puede conectarse a un ordenador personal corriente por medio de una interfaz RS485 o una tarjeta de adquisición de datos, y ser operado entonces por medio del software (adquirible por separado) FR-Configurator. Así es posible preparar, operar y supervisar varios variadores de frecuencia paralelamente en una red de datos o a través de un único ordenador personal o portátil.

En este modo de operación la dirección de rotación se determina por la señal de entrada de la operación externa, y la frecuencia es establecida por la señal de comando de frecuencia externa.

2.4. Métodos de control

Existen básicamente cuatro métodos de control para este variador, los cuales son seleccionados mediante el parámetro 800 del mismo. Los métodos son:

- Control V/F.
- Control vectorial.
- Control vectorial avanzado de flujo magnético.
- Control vectorial sin sensores en tiempo real.

Control V/F

En el control V/F se controla la frecuencia y el voltaje, de manera que la relación de frecuencia a voltaje es constante cuando se cambia la frecuencia.

2.4.1. Control vectorial

De manera general el control vectorial tiene excelentes características en comparación con el control V/F y otras técnicas, logrando características iguales a las máquinas de corriente directa.

Cuando la opción del complemento FR-A7AP está disponible, la operación de control a escala de vector se puede realizar utilizando un motor con encoder. Esta técnica presenta la ventaja de una rápida respuesta y un control de alta precisión de velocidad, y se puede realizar el control de par y control de posición (Electric, 2013).

Es un método adecuado para aplicaciones como:

- Minimizar la fluctuación de velocidad, incluso para carga severa.
- Para generar par a baja velocidad.
- Para evitar daños en la máquina debido al par de torsión muy grande.
- Para realizar control de par y posición.
- Control de par servo-bloqueo para generar par de torsión a velocidad cero.

El control vectorial ofrece las siguientes ventajas:

- Excelentes características de control.
- Adecuado para aplicaciones de rápida respuesta en la que los motores de inducción fueron considerados previamente como difíciles de usar.
- Permite el control de par.

Control de posición por control vectorial

En el diagrama de bloques de la Figura 2-8 se muestra la configuración general del control de posición por control vectorial implementado en el variador de frecuencia. La configuración requiere primeramente la selección de la forma en que será dado el comando de velocidad para realizar el arranque del motor a través del parámetro 419. Como se observa, cuando el parámetro 419 es fijado en 0, se activa el modo de trabajo denominado “Función de avance de posición condicional por entrada de contacto”. Cuando es 1, activa la opción de la utilización de un controlador programable FR-A7AL, el cual es una unidad de control de posición programable que debe estar instalado para su funcionamiento. Y en 2 activa la opción de “Comando de posición del tren de pulsos condicional por la entrada del tren de pulsos del convertidor”. Cada uno de estos modos de trabajo permitirá el control de posición del motor, con la condición de la utilización de un encoder para la realimentación de la posición real del rotor del motor.

Cuando el tren de pulsos entra, estos son acumulados en un contador y a su vez actúan como impulsos de control de posición para generar el comando de velocidad de arranque del motor. Tan pronto como el motor se pone en marcha a partir del comando de velocidad del inversor, el encoder genera los pulsos de realimentación, y además, se genera un tren de pulsos en la etapa de aceleración, el cual se mantiene constante al terminar esta etapa para mantener la velocidad del motor a través del Contador de Desviación. Luego cuando los pulsos de entrada se detienen, decrece el tren de pulsos y

el motor entra en la etapa de desaceleración hasta que se para en la posición deseada. En la Figura 2-9 se puede apreciar el funcionamiento general del control de posición vectorial (Electric, 2013).

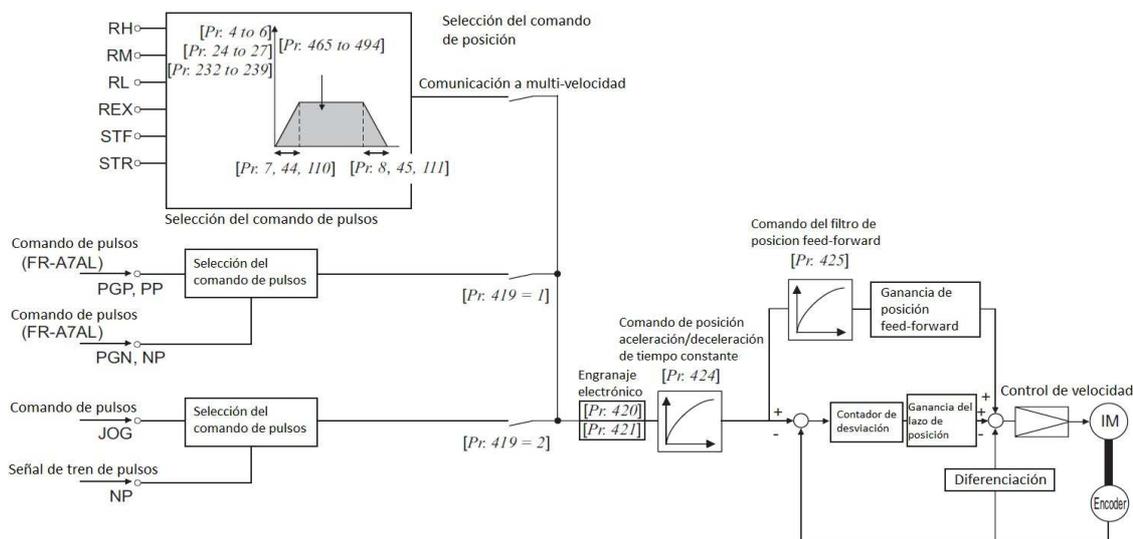


Figura 2-8: Diagrama en bloques del control de posición.

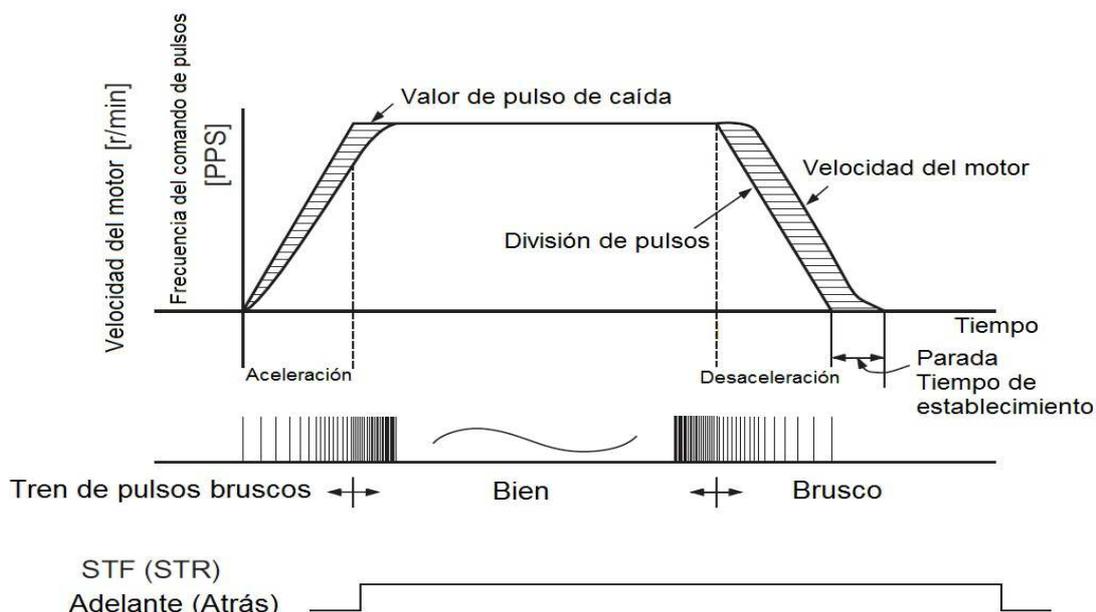


Figura 2-9: Funcionamiento general del control de posición vectorial.

2.4.2. Control vectorial avanzado de flujo magnético

El control vectorial avanzado de flujo magnético es un método que permite un par de torsión a baja velocidad y es perfeccionado dividiendo la corriente de salida del inversor en una corriente de excitación y una corriente de par por operación vectorial como se

muestra en la Figura 2-10, y hace que la compensación de voltaje a fluir en un motor de corriente cumpla con el par de carga.

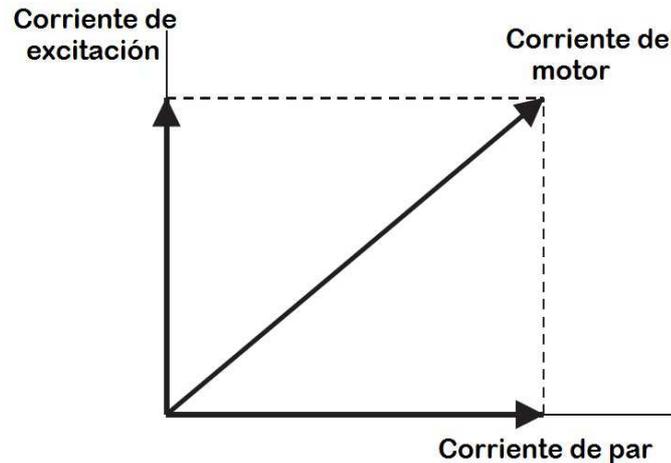


Figura 2-10: División de corriente.

La magnitud del par de carga (es decir, deslizamiento del motor) se estima a partir de la magnitud de la corriente de par sobre la base de las constantes del motor más precisas, controlando así la frecuencia de salida (compensación de deslizamiento) para hacer que la velocidad real del motor esté más cerca al valor de velocidad del comando.

El control vectorial avanzado de flujo magnético se puede seleccionar mediante el establecimiento de la capacidad (potencia), los polos y el tipo de motor.

2.4.3. Control vectorial sin sensores en tiempo real

En el control vectorial sin sensores en tiempo real, mediante la estimación de la velocidad del motor, se habilita el control de velocidad y el control de par con función de control de corriente. Este procedimiento se lleva a cabo cuando se requiere de un control con alta precisión y una rápida respuesta, ya que se puede realizar el autoajuste y la sintonización automática en línea (Electric, 2013).

Este método divide la corriente de salida del inversor en una corriente de excitación y una corriente de par mediante cálculo vectorial, además, mejora el rango de control de velocidad y tiempo de respuesta controlando de manera óptima la frecuencia y el voltaje

La operación de prueba de control de vector se puede realizar sin el motor conectado. El valor del cálculo de la velocidad se puede comprobar con el panel de operación y por el terminal de salida de señal analógica FM y AM.

En la Figura 2-12 se puede observar el diagrama en bloques del control *feed-forward* para el inversor FR-A720.

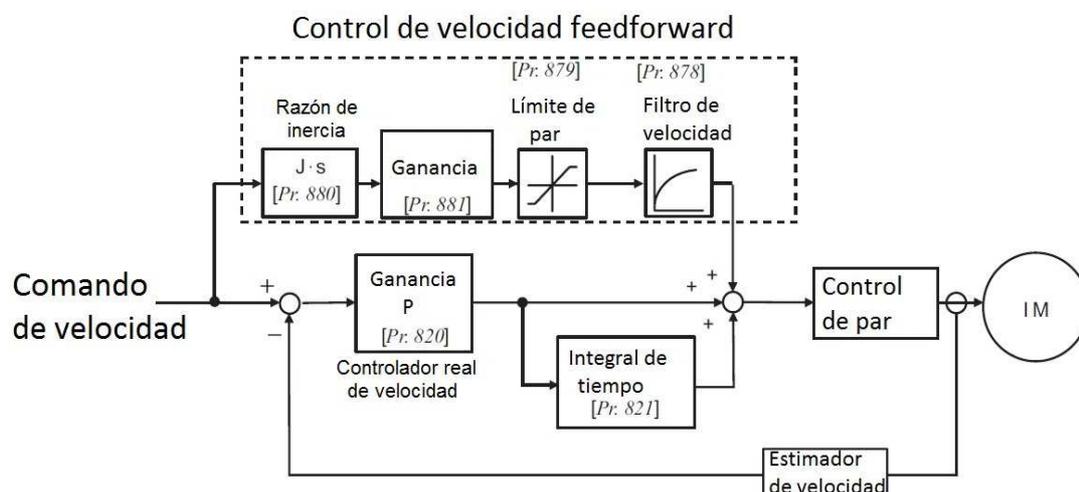


Figura 2-12: Diagrama en bloques del control de velocidad *feed-forward*.

Control de velocidad por modelo adaptable

El modelo de velocidad del motor se calcula con el propósito de proveer de la realimentación al control de velocidad por modelo como se ilustra en la Figura 2-13, además de ser usado por el control real de velocidad a partir del cálculo de la velocidad deseada ante cambios en la carga.

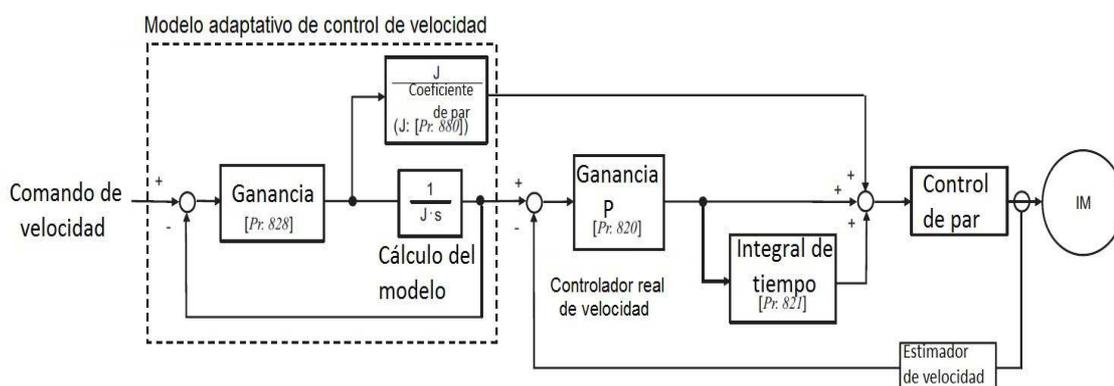


Figura 2-13: Diagrama en bloques del control de velocidad por modelo adaptable.

La razón de inercia dada en el parámetro 880 se ajusta para el cálculo del momento a partir del mando que genera la ganancia ajustada en el controlador de velocidad por modelo. Este momento se adiciona al que genera el controlador de velocidad real, y el resultado es usado como entrada al control de momento o par.

Como se observa en la descripción de ambas estrategias, el control de velocidad por modelo adaptable mejora la respuesta del sistema ante cambios en los parámetros de

la carga en los motores. De esta manera ante estos cambios se realiza un ajuste en el modelo ajustando el cálculo del momento dando al comando la velocidad deseada.

Control de par

El control de par se ejerce para desarrollar el par según lo indicado en el comando. La velocidad del motor se vuelve constante cuando el par de salida del motor y el par de carga están equilibrados. Por tanto la velocidad es determinada por la carga.

Cuando no se establece límite de velocidad, el ajuste del valor límite de velocidad se considera como 0 Hz para desactivar el control de par. Cuando la velocidad del motor real excede los valores límites, el control de momento cambia a control de velocidad para prevenir altas velocidades en la máquina.

El diagrama en bloques del control de par es mostrado en la Figura 2-14.

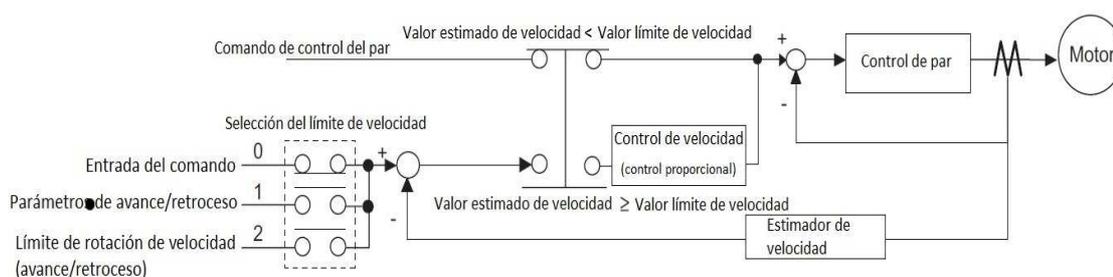


Figura 2-14: Diagrama en bloques del control de par.

2.5. Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se han descrito las características generales de manipulación e instalación para el funcionamiento óptimo del variador de frecuencia FR-A720.

El variador puede ser operado mediante el panel de control externo (PU), mediante un potenciómetro o a través de una entrada externa con rango de voltaje 10 V o 5 V, así como corriente normalizada 4 a 20 mA.

Existen cuatro métodos básicos de control del variador de frecuencia, siendo el control vectorial sin sensores en tiempo real el más idóneo para aplicaciones donde se requiere alta precisión y rápida respuesta.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Introducción

En el control de posición y velocidad de un motor se hace necesario utilizar técnicas adecuadas que garanticen el buen desempeño del sistema. Para el caso del control de posición la señal a realimentar se toma directamente del encoder y para el control de velocidad se realiza el mismo procedimiento y se deriva la señal del encoder, ya que el mismo es utilizado para medir posición.

En este capítulo se implementan estrategias de control de posición y velocidad en una estación de prueba y se realizan las pruebas experimentales correspondientes de modo externo e interno. Además, se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas desde los modos de trabajo externo e interno (PU). Por último, se presenta un análisis económico de este trabajo.

3.2. Control por modo externo

Para realizar el control por modo externo se cuenta con el sistema mostrado en la Figura 3-1, constituido por el motor trifásico en conjunto con el variador de frecuencia.

El motor está acoplado mecánicamente a un encoder que se utiliza para obtener la medición de posición, este a su vez, envía por los canales A y B los pulsos detectados, con el objetivo de determinar el sentido de giro del eje del motor. Las señales después de ser procesadas por un colector abierto son recibidas por la tarjeta de adquisición de datos, la cual se comunica con la PC en donde se procesan los datos. Todos estos elementos componen el sistema de medición, la computadora actuará como controlador, cierra el lazo y establece la entrada de los valores de referencia. Además, envía las señales de mando al conjunto motor-inversor. La naturaleza de estas señales obedecen a un rango de $10V_{DC}$, siguiendo la lógica de 0 a $+10V_{DC}$ para un sentido y de 0 a $-10V_{DC}$ para el otro sentido por lo que se incluye en el esquema de control el elemento de saturación como se muestra en la Figura 3-2. El inversor constituye el elemento de acción final, recibe las señales de voltaje del rango especificado, las interpreta para establecer la frecuencia, muestra la misma en un panel externo al operador y envía

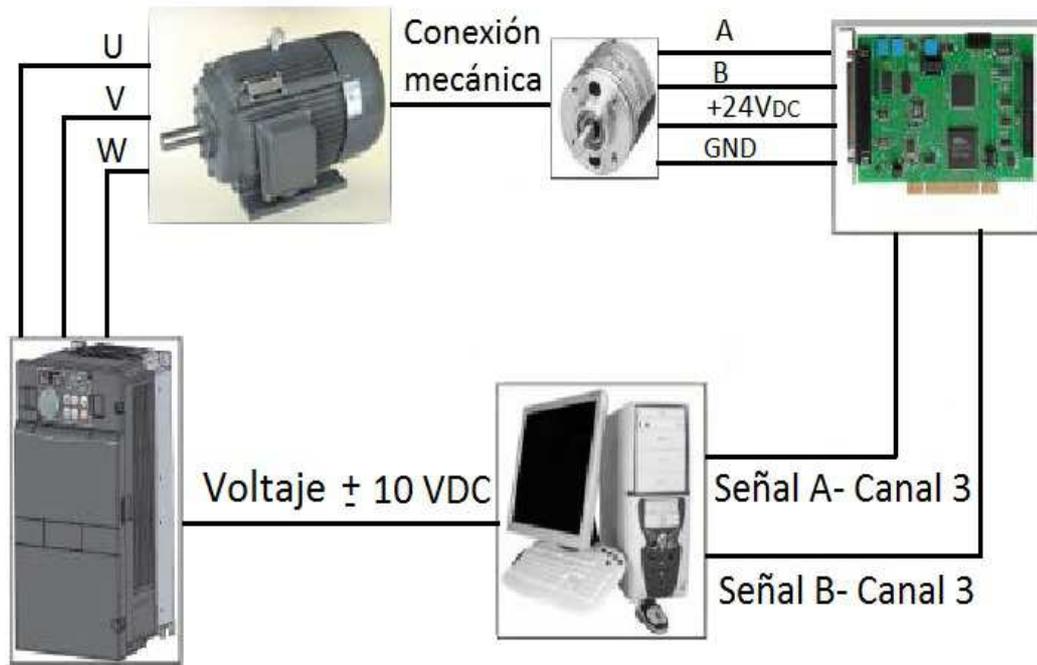


Figura 3-1: Esquema general del conjunto motor-inversor para el control.

las señales de mando al motor en modulación PWM. El motor constituye el elemento principal a controlar. Las características del hardware empleado se pueden observar en el Anexo D.

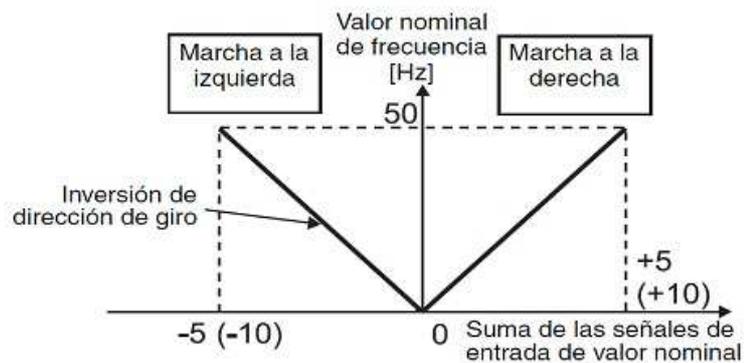


Figura 3-2: Sentido del giro por voltajes de entrada.

Para llevar a cabo el giro del eje del motor hasta la posición deseada, es necesario variar la frecuencia de alimentación a partir de modificar el voltaje. En este caso, si se reduce la frecuencia, también es necesario reducir la tensión, sino, la corriente y el flujo magnético del estator será muy alta y el campo magnético del motor se saturará, por lo tanto, debe controlarse la tensión igualmente. Si la frecuencia se incrementa por encima de lo normal, se necesitará una tensión superior para mantener el flujo máximo, esto no

es siempre posible, de manera que a altas velocidades (es decir, velocidades por encima de la frecuencia de alimentación) se dispone de menor par del motor (Gil, 2009).

3.2.1. Control de posición

El esquema de control de posición se muestra en la Figura 3-3. La medición se realiza a través de un encoder, el cual detecta los pulsos medidos y mediante la ganancia los convierte en radianes. El elemento de saturación evita que la señal de mando exceda los límites de entrada establecidos para el variador.

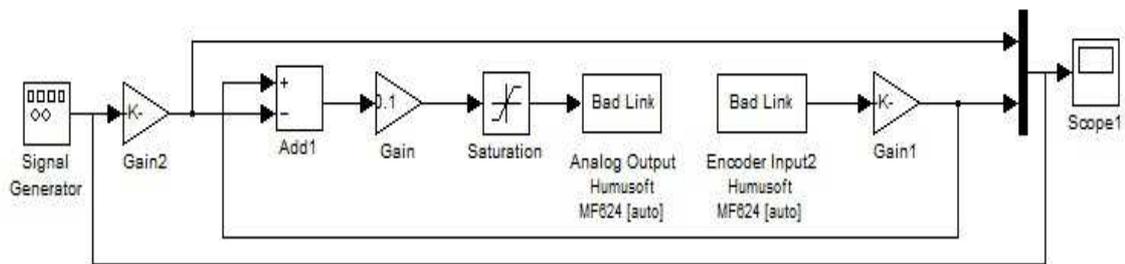


Figura 3-3: Esquema para el control de posición en lazo cerrado.

La relación entre la posición deseada y medida es ilustrada en la Figura 3-4.

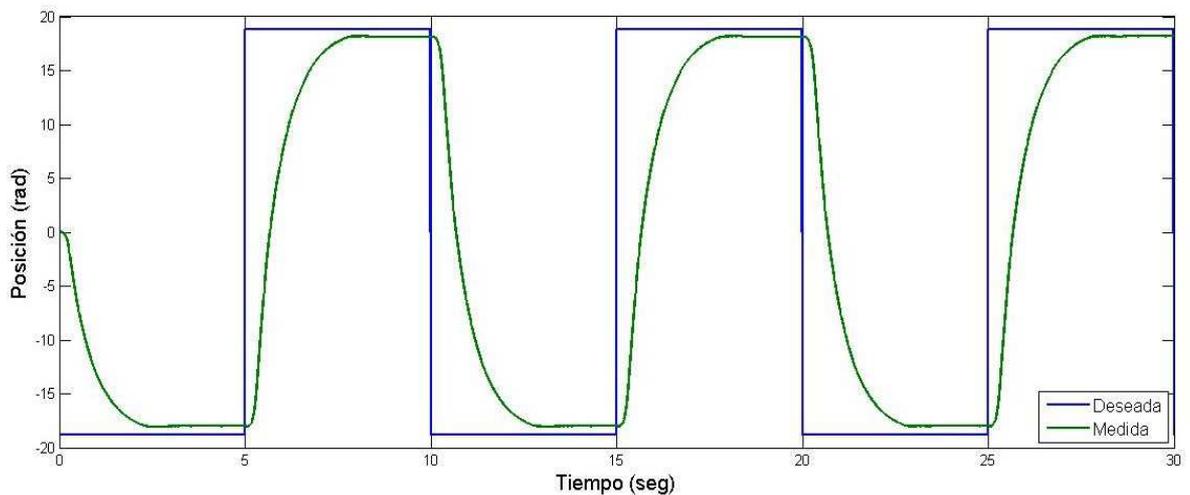


Figura 3-4: Relación modelo real-estimado.

3.2.2. Control de velocidad

En el caso del control de velocidad la variable a controlar es la velocidad del motor. El diagrama en bloques es muy similar al de control de posición como se puede observar en la Figura 3-5.

Es importante destacar la presencia del elemento derivativo en el control ya que el encoder es un medidor de posición, por lo que se deriva esa señal y de esta manera se

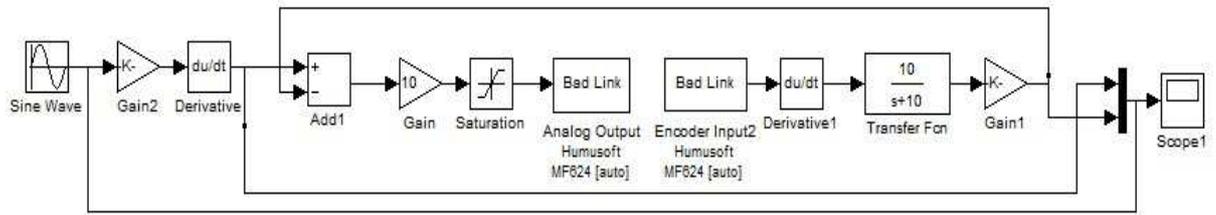


Figura 3-5: Esquema para el control de velocidad en lazo cerrado.

consigue implementar el control de velocidad, se ajusta una ganancia, y se obtiene la respuesta que se muestra en la Figura 3-6. La señal ruidosa es a consecuencia de la derivada de la posición. Para evitar esto es necesario la implementación de filtros de primer o segundo orden que acondicionen la señal de velocidad para el control. Para este caso se implementa un filtro de primer orden y se obtiene la respuesta de la Figura 3-7. Como se puede apreciar, hay una disminución considerable del ruido en la señal de realimentación.

El principal problema en el control de velocidad, a partir de la obtención de la velocidad del motor derivando la señal del encoder, es que puede introducir un pequeño retardo entre la señal de referencia y la de salida, consecuencia de las constantes de tiempo del filtro. Esto pudiera eliminarse si se utiliza un sensor de velocidad para medir directamente la velocidad.

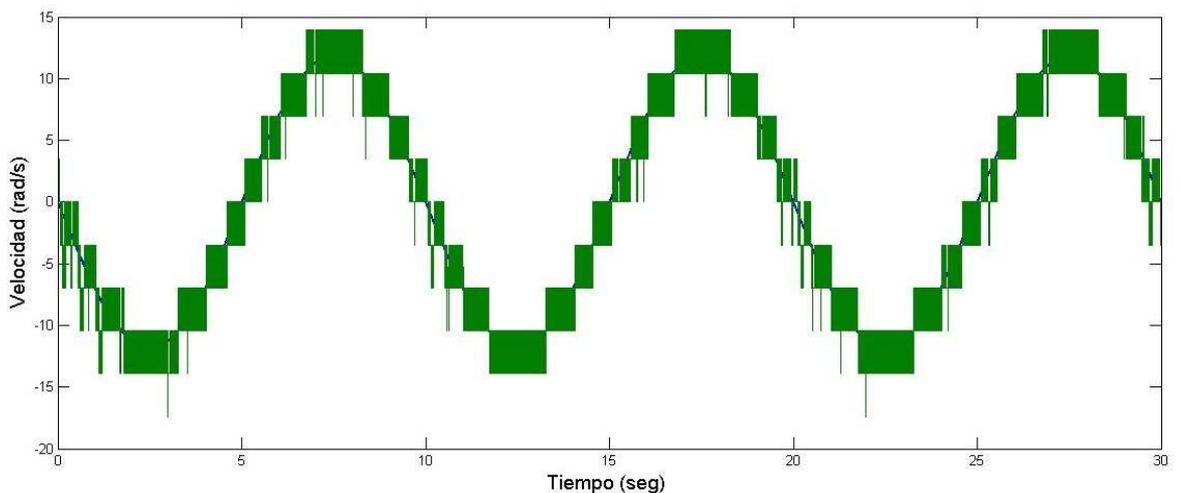


Figura 3-6: Respuesta a la simulación.

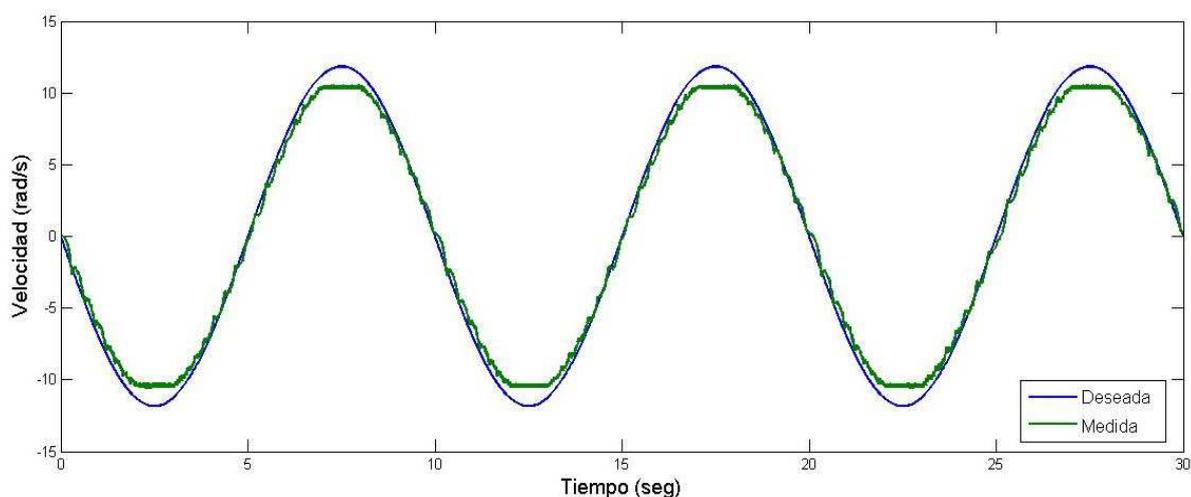


Figura 3-7: Respuesta a la simulación.

3.3. Control por modo interno

En el control por modo interno, realizado a través del panel de control FRDU07/FR-PA07 o mediante teclas de la unidad de parámetros FR-PU04 / FRPU07, es necesario seguir una serie de pasos y ajustes de parámetros (Ver Anexo E).

Para este caso se realiza el control vectorial de velocidad sin sensores en tiempo real. Primeramente se establecen adecuadamente las condiciones de cableado siguiendo las instrucciones indicadas en el manual del inversor. Luego, en el parámetro 71 se ajusta el valor del motor, en el que según los datos de chapa del mismo se establece un valor dentro del amplio rango que presenta, en este caso se selecciona el valor 3 pues se cuenta con un motor estándar (Ver Anexo D). Seguidamente se ajusta la capacidad del motor (potencia) y el número de polos a través de los parámetros 80 y 81 respectivamente. El número de polos se calcula a partir de la Ecuación 3.1, para este motor la velocidad síncrona del motor es 940 rpm, pero al tener 50 Hz de frecuencia se trabaja con 1000 rpm de velocidad.

La ecuación para el cálculo del número de polos de un motor trifásico es la siguiente:

$$n_s = \frac{f * 120}{p} \quad (3.1)$$

Donde:

- n_s = Velocidad síncrona del motor.
- f = Frecuencia del motor.
- p = Número de polos.

Después de haber definido estas condiciones se especifica el método de control a utilizar en el parámetro 800, donde para cada método corresponde un valor del 10 al 12 (10 para control de velocidad, 11 para control de par y 12 para control de posición) si es para el caso del control vectorial sin sensores en tiempo real y el valor 20 para el control vectorial avanzado de flujo magnético, y que para este caso es el control vectorial sin sensores en tiempo real, que es el control que presenta mejores características y se establece el valor 10 en el panel para control de velocidad específicamente. A continuación se ajusta el comando de operación presionando los botones de avance (FWD) o retroceso (REW) en el panel de operación y ajustando la frecuencia manualmente. Antes de poner en funcionamiento la estación de prueba se ajusta el límite del par de torsión (parámetro 810); se tienen dos opciones de ajuste (de modo externo por terminales o interno por parámetros) y se establece el valor 0 ya que se está trabajando por modo interno. Como paso final se realiza el autoajuste y sintonización automática en línea. El autoajuste fuera de línea consiste en la medición automática de las constantes del motor para poner en marcha el mismo con sus características óptimas de operación. Para fijar este valor (parámetro 96) se pueden fijar los valores 1 o 101 en la unidad de parámetros, en dependencia si el motor está en marcha o no. Para este caso se introduce el valor ya que el motor no está trabajando cuando se realiza el ajuste. Este proceso tarda de 25 a 120 segundos aproximadamente para que sea ajustado completamente.

Al ajustar rápidamente las constantes del motor en un inicio, la alta precisión de la operación se ve afectada por la temperatura del motor, por lo que se ejecuta la sintonización automática en línea insertando en el parámetro 95 el valor 1 ([Electric, 2014](#)).

En la Figura 3-8 se puede apreciar la señal de velocidad controlada por el variador mediante el método de control vectorial sin sensores en tiempo real.

Ante cambios en la referencia de frecuencia del variador, se realizan variaciones alrededor de los 10 Hz hasta alcanzar la máxima velocidad del motor y luego se realizan cambios de 20 Hz para desacelerar el motor. Como se puede apreciar el motor presenta un comportamiento estable al variar la frecuencia con el ajuste del control vectorial sin sensores en tiempo real. En este caso como el motor no presenta carga, el control de velocidad del mismo no representa un problema grande de control.

3.4. Ejemplos de aplicaciones

Diversas son las aplicaciones en las que se puede utilizar este variador en conjunto con un motor trifásico. Para este caso en el que la señal de entrada tiene variaciones muy suaves se puede utilizar en aplicaciones de cintas transportadoras o accionamientos de elevación.

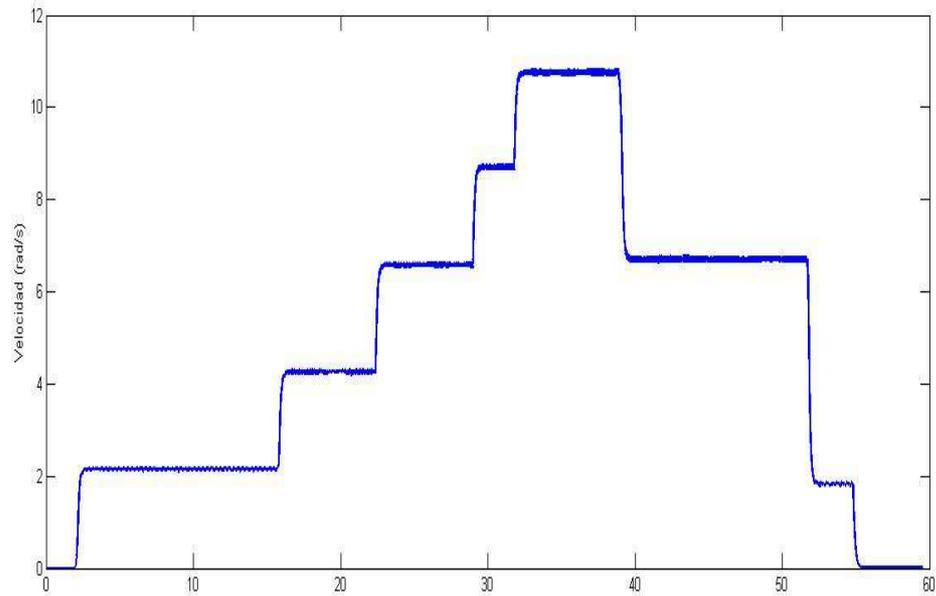


Figura 3–8: Señal de velocidad controlada.

Cinta transportadora

Los variadores de frecuencia se emplean frecuentemente para el control de cintas dedicadas al transporte de materiales, ya que ofrecen la posibilidad de acelerar y frenar suavemente el accionamiento.

La cinta transportadora es puesta en marcha y detenida por medio de un control externo (por ejemplo un PLC). Con un potenciómetro de valor nominal es posible modificar las revoluciones del motor de accionamiento y con ello la velocidad de la banda de transporte. En la Figura 3–9 se observa el esquema general para el control de una cinta transportadora con el variador de frecuencia FR-A720.

Accionamiento de elevación

La Figura 3–10 muestra la configuración fundamental para el control de un accionamiento de elevación tal como el empleado por ejemplo en montacargas o puertas enrollables. Para que la carga no se desplome con el motor desconectado, se emplea un motor con freno mecánico.

Cuando se alcanzan las posiciones finales, el motor es desconectado mediante interruptores de fin de carrera. Después ya solo es posible moverlo en la dirección contraria.

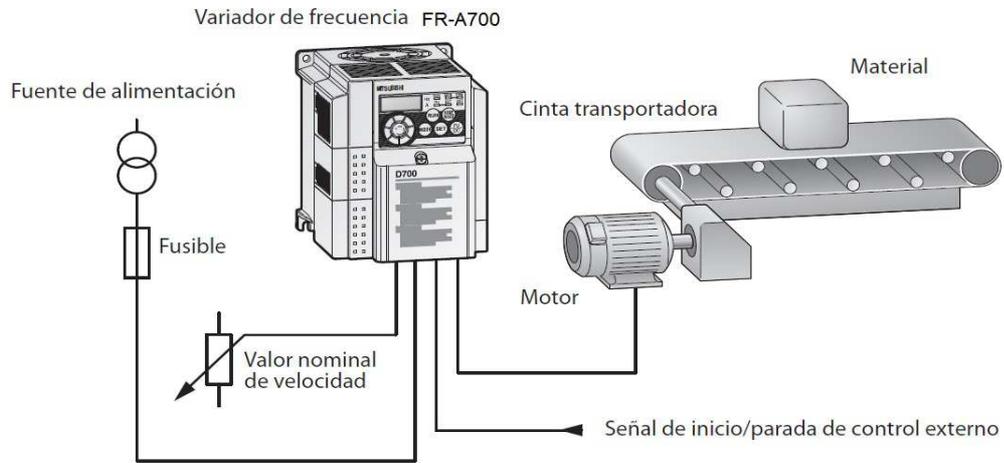


Figura 3-9: Cinta transportadora.

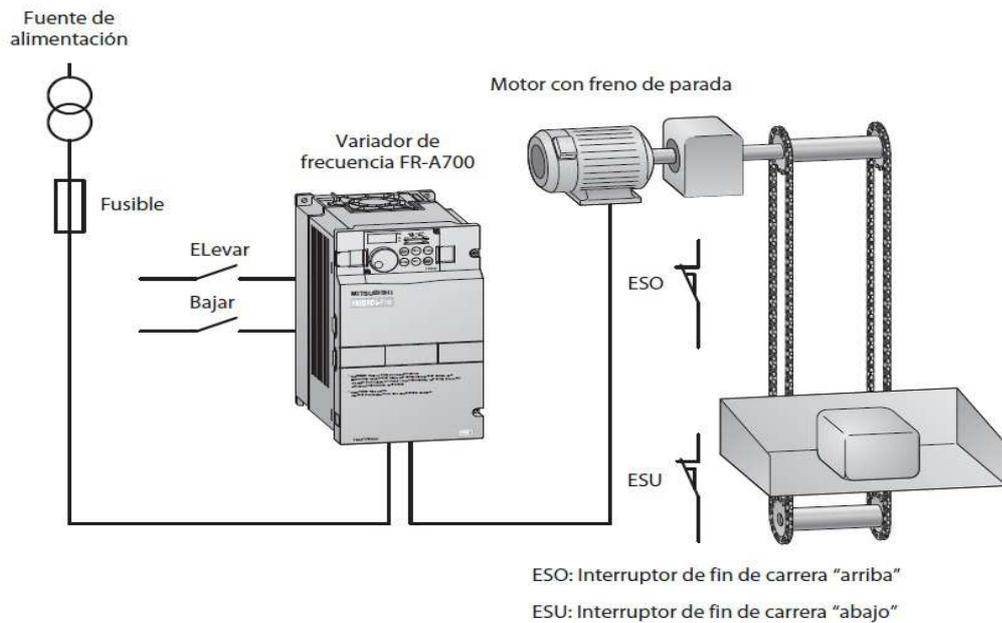


Figura 3-10: Accionamiento de elevación.

3.5. Análisis económico

Para la realización de un proyecto de investigación, un aspecto fundamental es la valoración económica del mismo. El conjunto Motor de Corriente Alterna - Variador de Frecuencia, presenta un avance tecnológico más eficiente y factible que las aplicaciones en los que están presentes los motores de corriente directa. El cambio de tecnología ofrece un importante ahorro de energía, permitiendo tener ahorros en un 60 % a velocidades menores a las nominales.

En la Tabla 3–1 se expone la relación de precios de los elementos de hardware presentes en la arquitectura que se propone utilizar en este trabajo para controlar la posición.

Tabla 3–1: Listado de precios

Elementos	Precios
Inversor Mitsubishi FR-A720-2.2K	617.6 Euros
Tarjeta para realimentación de Encoder	136 Euros
Motor Trifásico <i>Dedong</i>	260 Euros
Encoder <i>NEMICON OEW2-0512-2MHC</i>	202 USD
Tarjeta de adquisición de datos <i>HUMUSOFT MF 614</i>	1241 USD
PC	500 USD

Con esta propuesta e implementación del control se cuenta con una alternativa nacional que puede ser perfeccionada y aplicada en sistemas mecánicos sin depender de costos de importación y servicios de post-venta.

3.6. Consideraciones finales del capítulo

El control de posición y velocidad realizado en el modo externo mediante la utilización de una estación de prueba se lleva a cabo con el empleo de un encoder.

La utilización de un encoder en el control de velocidad trae como consecuencia que para obtener la medición de velocidad es necesario derivar la señal, este procedimiento hace que aparezcan señales ruidosas en la medición por lo que se agrega un filtro para eliminar las mismas.

Para realizar el control vectorial sin sensores en tiempo real en modo interno se sigue una serie de pasos para el ajuste de los parámetros, en dependencia de la aplicación en la que se vaya a utilizar y de acuerdo a las características del motor, por lo que es fundamental realizar este ajuste.

Las estrategias implementadas en este capítulo pueden ser utilizadas en aplicaciones como accionamientos de elevación y cintas transportadoras.

CONCLUSIONES

Como resultado final arrojado por esta investigación, se realizan pruebas implementando las estrategias de control que presenta el variador desde los modos de operación externo e interno, lo cual queda demostrado mediante simulación. A partir del estudio realizado, se plantean las conclusiones generales siguientes:

- El empleo de los variadores de frecuencia en la industria actual constituye un factor fundamental para el rendimiento de cualquier proceso, debido a que son sistemas altamente dinámicos y ahorran hasta un 60 % de energía, por lo que son ideales para el control de motores trifásicos.
- El variador FR-A720 presenta numerosas funcionalidades, este puede ser operado de modo interno o de modo externo, siendo de gran utilidad, pues se puede prescindir del uso de dispositivos adicionales como tarjetas de adquisición de datos y computadoras para el control del motor.
- Para el control de velocidad y posición, el variador presenta varias estrategias de control que pueden ser implementadas con el uso de sensores como es el caso de un encoder, de acuerdo a la aplicación en la que será utilizada.
- Las simulaciones realizadas demostraron que las estrategias de control implementadas cumplen con los requisitos de funcionamiento para el caso del control de posición y velocidad de modo externo y de velocidad en modo interno.

Con las conclusiones presentadas se satisfacen los objetivos del trabajo y se justifica plenamente la necesidad de la investigación.

RECOMENDACIONES

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

- Continuar con el estudio de este dispositivo en conjunto con un motor trifásico en aplicaciones donde el motor presente carga.
- En próximas investigaciones evaluar otras de las estrategias de control implementadas en el variador y realizar pruebas experimentales desde el modo interno (PU).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATMEL (2005). Avr494: Ac induction motor control using the constant v/f principle and a natural pwm algorithm.
- ATOM (2011). La mejores aplicaciones de los variadores de frecuencia variable. *Todo-productividad*.
- Calvo, Fernando S. (2011). Variadores de frecuencia.
- Campbell, Sylvester J. (1987). Solid-state ac motor controls.
- Clenet, D. (2008). *Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos*. 208 ed.. Schneider Electric.
- Donsión, Manuel P. (2004). Estrategias y circuitos de control de la velocidad de los motores de inducción. *Técnica industrial 255*.
- Electric, Mitsubichi (2013). *FR-A700/F700/E700/D700 series. Technical Manual*. Mitsubichi Electric.
- Electric, Mitsubishi (2005). *Familia FR. Variadores de frecuencia*. Mitsubishi Electric.
- Electric, Mitsubishi (2012). *Variadores de frecuencia. Manual introductorio*. 203605 ed.. Mitsubishi Electric.
- Electric, Mitsubishi (2014). *FR-A700 Instruction Manual*. ib-0600225eng ed.. Mitsubishi Electric.
- Gil, F. R. B. (2009). Solución para sistema de posicionamiento de plataformas mecánicas con motor de corriente alterna y variador de frecuencia. Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- IFI, Grupo (2014). Variadores de frecuencia. *IFI*.
- Jaeschke, Ralph L. (1978). Controlling power transmission systems.
- Ludueña, Jesús P. (2007). Variadores de frecuencia: Ahorrando energía en aplicaciones de bombeo. *Electroindustria*.
- Luque, Juan. M. (2014). Variadores de frecuencia para los productos de servomotor, a700. *Soluciones Automáticas LTDA*.
- Mitchell, J. (2015). Tipos de variadores de frecuencia. *Tecnología*.
- Méndez, Ángel M. (2011). Introducen tecnologías para hacer más eficiente producción azucarera en cuba. *Sucroenergía*.
- Morffi, Diosdany L. (2014). Modelado y control de un motor trifásico de corriente alterna en conjunto con un variador de frecuencia. Trabajo de diploma. UCLV.

- OEI (2008). Científicos vallisoletanos y cubanos introducen mejoras en la industria azucarera de Cuba. *Divulgación y cultura científica iberoamericana*.
- Ogbuka, C.; Eng, M. (2009). Performance characteristics of inverter controlled three phase induction motor: Teaching and research. *The Pacific Journal of Science and Technology*.
- Rincón, E. (2011). Motores y variadores de frecuencia. *Todo sobre Siemens*.
- Shinde, P; Burungale, R. (2014). Speed control of induction motor by using variable frequency drive. *Journal of Engineering Research and Applications*.
- Siskind, Charles S. (1963). Electrical control systems in industry.
- Viego, Percy R. (2008). Motores con variadores de frecuencia. *Energía y tú*.
- WEG (2008). *Automatización. Convertidores de frecuencia*. WEG.

ANEXO A PRINCIPALES FABRICANTES



Figura A-1: Variadores de frecuencia WEG



Figura A-2: Variadores de frecuencia Siemens



Figura A-3: Variador de frecuencia FR-A720

ANEXO B CIRCUITOS

Diagrama general del variador de frecuencia FR-A720

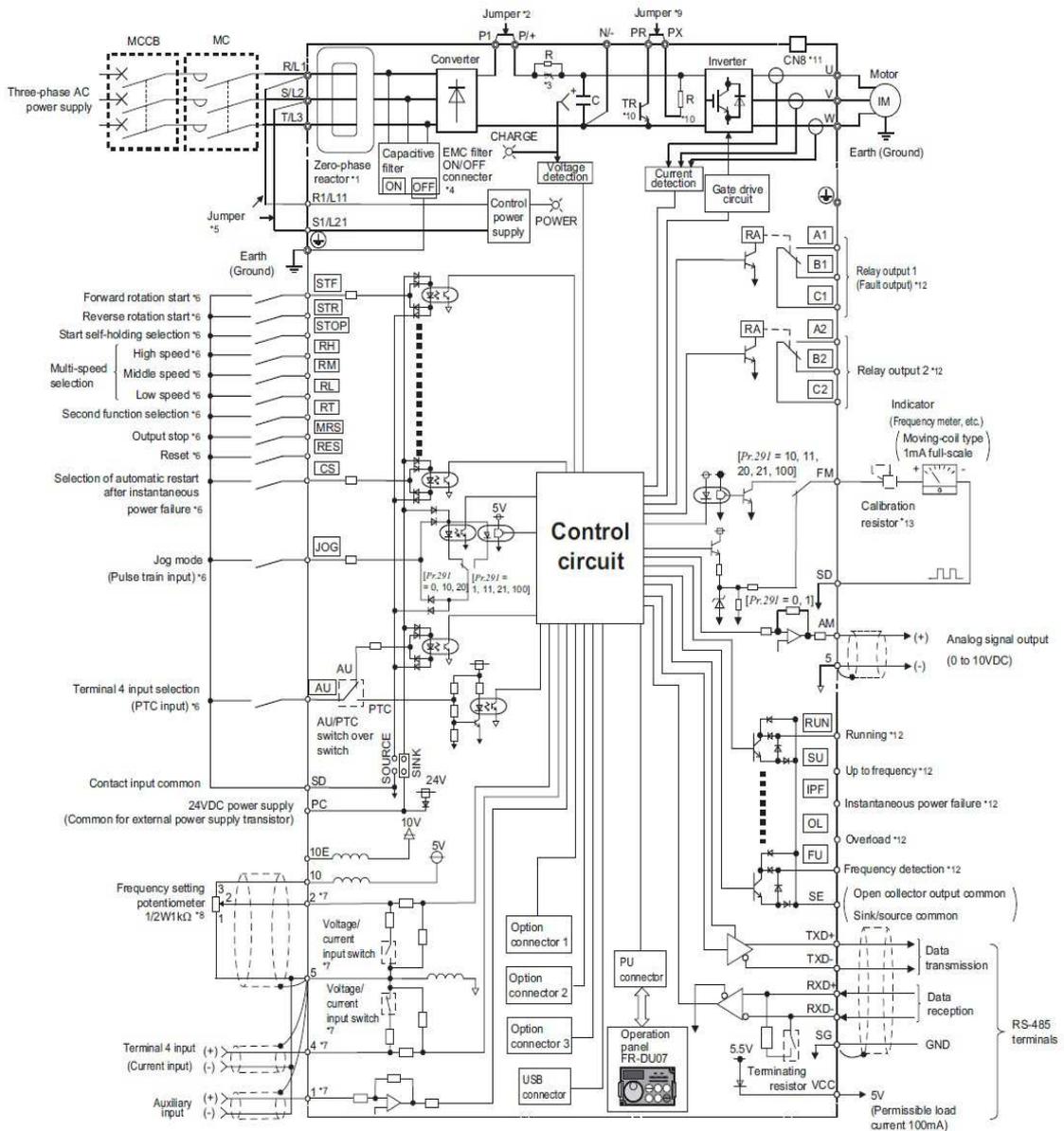


Figura B-1:

ANEXO C

UNIDAD DE CONTROL FR-A7AP

Estructura de la unidad de control FR-A7AP

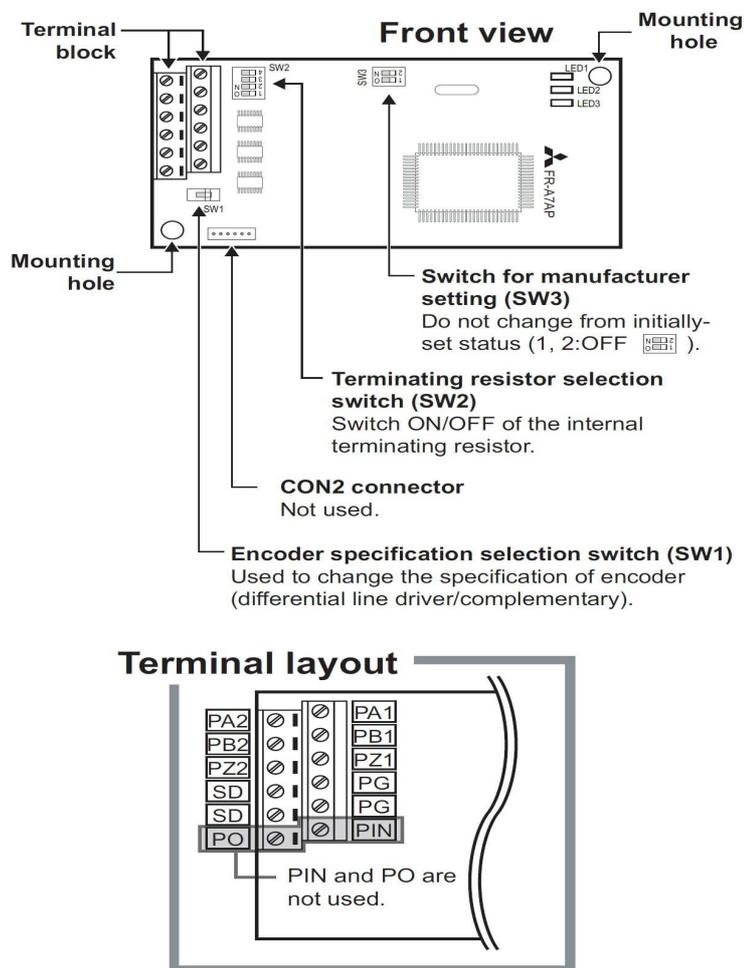


Figura C-1:

ANEXO D

CARACTERÍSTICAS DE HARDWARE EMPLEADO

Motor Dedong

El motor Dedong es el dispositivo a controlar y consiste en un motor trifásico de inducción, de jaula de ardilla y conexión delta.



Figura D-1:

Datos nominales de chapa:

- Corriente 9.6 A.
- Potencia 2.2 kW
- Voltaje 220 V.
- Velocidad angular 940 rpm.
- Frecuencia 50 Hz.
- Incremento del voltaje y la frecuencia juntos en el arranque.
- Se puede monitorear durante la operación del motor: voltaje, corriente, frecuencia, velocidad de giro.

Encoder *NEMICON OEW2-0512-2MHC*

El encoder es del tipo incremental de colector abierto de alto voltaje. Posee una resolución de 512 pulsos/revolución y desfase entre las señales A y B de 90 grados.



Figura D-2:

Tarjeta de adquisición de datos **HUMUSOFT MF 614**

La tarjeta de adquisición de datos está diseñada para conectarse directamente a los Slots de la PC, lo cual permite una rápida transferencia de los datos a la memoria para su uso sin necesidad de utilizar protocolos de comunicación.



Figura D-3:

Características generales:

- Arquitectura de 32 bits.
- 8 canales de entrada en modo simple con un rango de voltaje de entrada de $\pm 10V$.
- 8 convertidores D/A con 14 bits de resolución y rango de salida de $\pm 10V$.
- Entradas para encoder con interfaz diferencial o simple.
- Canales de contadores/temporizadores de 32 bits con resolución de 20ns.
- Puertos de entrada y salida digitales de 8 bits compatibles con TTL.
- Requiere un slot PCI 2.3 y uno opcional para un segundo conector.
- Puede ser usado en conectores de 5V o 3.3V.
- Consumo de potencia 500mA para +5V, 150mA para $\pm 12V$.
- Temperatura de operación de $0 \sim 70 \text{ }^{\circ}C$.
- Temperatura ambiente $-10 \sim +50 \text{ }^{\circ}C$.

ANEXO E

CONTROL DE VELOCIDAD POR CONTROL VECTORIAL SIN SENSORES EN TIEMPO REAL

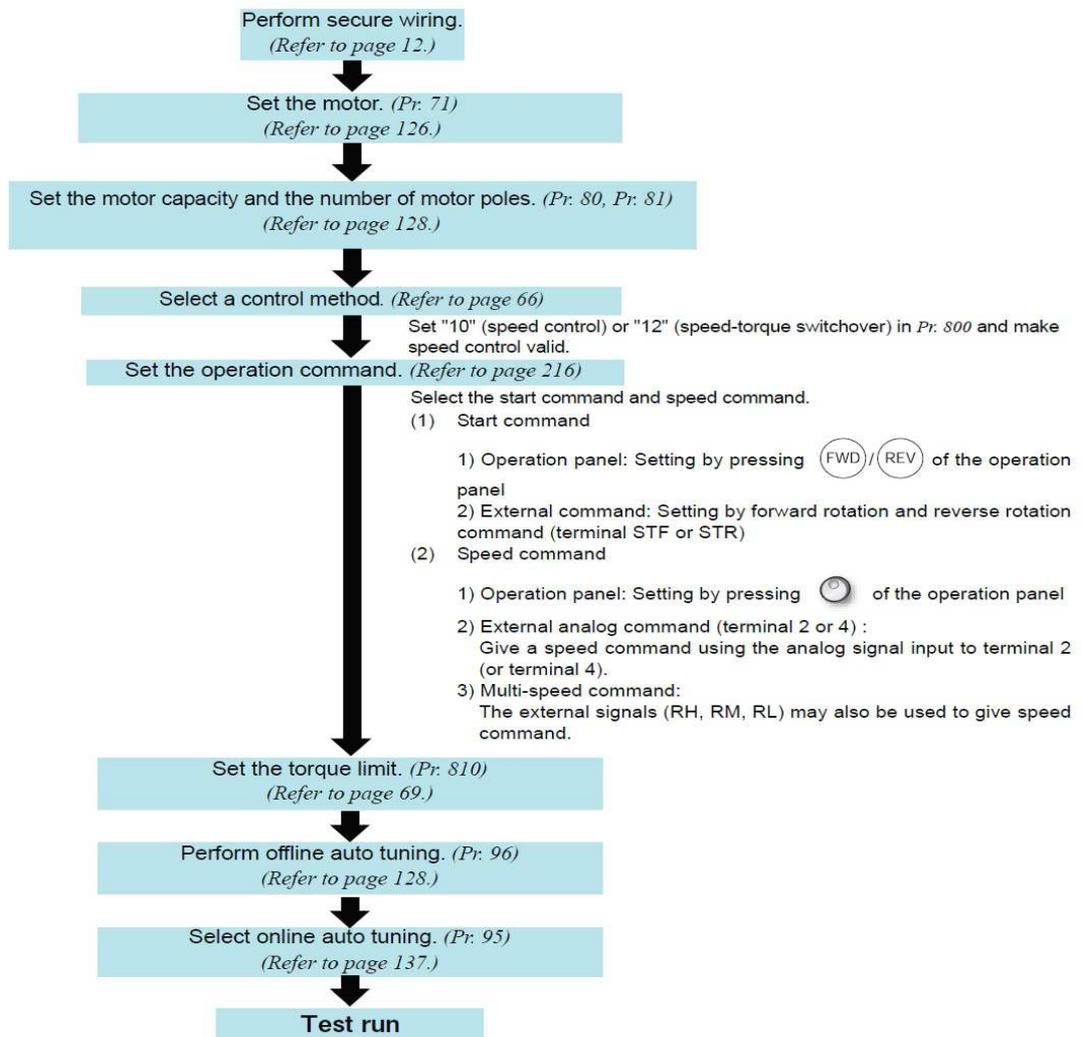


Figura E-1: