



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***“DISEÑO DE LA INTERFACE GRÁFICA USANDO
LABVIEW PARA EL DRIVER DANFOSS VLT-2800”***

TESIS

**Que para obtener el Título de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

Presenta:

PABLO ZAVALA ROMERO

Asesor de Tesis:

DR. JUAN ANZUREZ MARÍN

Co-Asesor de Tesis:

M.I. SALVADOR RAMÍREZ ZAVALA

Morelia, Michoacán, Abril de 2010

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a:

A Dios por darme la oportunidad de terminar una carrera profesional.

A mis padres Sara Romero Mendoza y Pedro Zavala Velázquez por su confianza y apoyo.

A toda mi familia por su cariño y comprensión.

A mis amigos que siempre me han ayudado.

A todos mis profesores especialmente a mis asesores de tesis Dr. Juan Anzurez Marín y Salvador Ramírez Zavala.

Dedicatoria

A toda mi familia.

Resumen

En este trabajo se presenta una descripción general de los variadores de frecuencia y de los protocolos de comunicaciones industriales más importantes y populares para el control de procesos basados en topología tipo *bus*.

Se muestra un esquema de control de velocidad de la máquina de inducción trifásica. El proceso se basa en el manejo del convertidor comercial de frecuencia Danfoss VLT-2800 en dos diferentes aplicaciones; programando los parámetros del *Driver* para la operación del motor en forma local (panel frontal) y edición de la base de datos en forma remota utilizando a la PC con aplicaciones del *software* MCT-10 *Set-up*.

Se desarrolla el *software* construido bajo el entorno del lenguaje de programación gráfico LabVIEW para la comunicación con el *Driver*, que permite la modificación de la base de datos del variador de frecuencia para así poder controlar la velocidad y otros parámetros relacionados con la operación de la máquina de inducción.

Se presentan las pruebas realizadas de los efectos de depresiones de voltaje sobre la velocidad de una máquina de inducción y el sistema rectificador-inversor para posteriormente poder estudiar sus resultados y crear estrategias de prevención.

Contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas	x
Lista de Símbolos y Abreviaciones	xi

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	3
1.5 Contenido de tesis.....	3

Capítulo 2. Descripción de los variadores de frecuencia

2.1 Introducción	5
2.2 Los variadores de frecuencia	7
2.3 Principio de funcionamiento del VFD	7
2.4 Composición del VFD	8
2.5 Formas de comunicación con un VFD	10
2.6 Motor que utiliza el VFD.....	10
2.7 Ventajas de la utilización del VFD en el arranque de motores asíncronos.....	12
2.8 Inconvenientes de la utilización del VFD en el arranque de motores asíncronos	12
2.9 Algunas aplicaciones de los variadores de frecuencia.....	12
2.10 Conclusiones.....	14

Capítulo 3. Protocolos de comunicación industrial

3.1 Introducción	15
------------------------	----

3.2 <i>Bus</i> de campo	16
3.3 Tipos de <i>buses</i> más comunes	17
3.4 Protocolo Profibus	17
3.4.1 Estructura básica de Profibus	19
3.5 DeviceNet	20
3.5.1 Características de DeviceNet	21
3.6 Protocolo Modbus	22
3.6.1 Modos de petición	23
3.6.2 Tipos de transmisión	24
3.6.3 Estructura de <i>Bus</i> Modbus	28
3.7 Conclusiones	29

Capítulo 4. Modos de operación del *Driver* Danfoss VTL-2800

4.1 Introducción	30
4.2 Operación modo local del <i>Driver</i> VTL-2800	30
4.2.1 Programación local del <i>Driver</i> VTL-2800	30
4.2.2 Visualización de estados de lectura	33
4.2.3 Mensajes de estado	39
4.3 Operación modo remoto del <i>Driver</i> VTL-2800	39
4.3.1 Elementos utilizados en la interface	40
4.3.2 La interface Rs-232	40
4.3.3 La interface Rs-485	41
4.3.4 Características del <i>software</i> MTC-10 Set-up	41
4.3.5 Configuración serie	43
4.3.6. Configuración de búsqueda de dispositivos	43
4.3.7 Modificación de parámetros	44
4.3.8 Lectura de parámetros	44
4.4 Conclusiones	45

Capítulo 5. Diseño de la interface y pruebas

5.1 Introducción	46
------------------------	----

5.2 La herramienta de programación LabVIEW	46
5.2.1 Uso de LabVIEW para la comunicación PC- <i>Driver</i>	47
5.3 Pruebas y efectos de depresiones de voltaje	53
5.4 Conclusiones.....	6
 Capítulo 6. Conclusiones generales y trabajos futuros	
6.1 Conclusiones generales.....	62
6.2 Trabajos futuros	63
 Referencias	 64

Lista de Figuras

Figura 2.1 Imagen del <i>Driver</i> Danfoss VLT-2800	7
Figura 2.2 Diagrama del Variador de Frecuencia	9
Figura 2.3 Motor de inducción Jaula de Ardilla	11
Figura 2.4 Ejemplo de banda transportadora	13
Figura 2.5 Ejemplo de sistema de bombas	14
Figura 3.1 Áreas de aplicaciones de las versiones Profibus	19
Figura 3.2 Topología del <i>Bus</i> Modbus	22
Figura 3.3 Modo Único de petición del dispositivo maestro	23
Figura 3.4 Modo Difusión de petición del dispositivo maestro	24
Figura 3.5 Campos de mensaje para código; ASCII y RTU	25
Figura 4.1 Motor asíncrono controlado por <i>Driver</i> VLT-2800	30
Figura 4.2 Panel frontal del <i>Driver</i> Danfoss	31
Figura 4.3 Tipos de rampas	38
Figura 4.4 Esquema de control del <i>Driver</i> mediante la PC	40
Figura 4.5 Ventana principal del <i>software</i> MCT-10 <i>Set-up</i>	42
Figura 4.6 Ventana de configuración serie	43
Figura 4.7 Barra de herramientas <i>software</i> MCT-10 <i>Set-up</i>	43
Figura 4.8 Ventana de edición de parámetro <i>configuration mode</i>	44
Figura 4.9 Inicio de lectura de parámetros	45
Figura 4.10 Paro de lectura de parámetros	45
Figura 5.1 Diagrama de bloques de la interface	47
Figura 5.2 Diagrama de bloques del <i>software</i>	48
Figura 5.3 Casos de arranque y paro del motor	49
Figura 5.4 Caso de “Velocidad” a 50hz	49
Figura 5.5 Caso “Inicio” y el submenú Modo de Control	50
Figura 5.6 Casos “PID” y “Motor” de la estructura general	51
Figura 5.7 Caso “Serie” de le estructura general	52
Figura 5.8 Panel Frontal del <i>software</i> de control	53
Figura 5.9 Onda de voltaje de una falla tipo <i>sag</i>	54

Figura 5.10 Diagrama esquemático utilizado para realizar las pruebas	55
Figura 5.11 Curva de velocidad del motor con un tiempo de depresión de 12 ciclos	57
Figura 5.12 Corriente de la fase <i>a</i> que alimenta al motor de inducción durante la depresión de 12 ciclos.	57
Figura 5.13 Velocidad del motor bajo una depresión de 80% durante 30 ciclos	58
Figura 5.14 Velocidad del motor con una duración de depresión de 60 ciclos	58
Figura 5.15 Velocidad del motor de inducción con un <i>sag</i> de 120 ciclos	59
Figura 5.16 Velocidad del motor con un <i>sag</i> de 80% y 180 ciclos de duración	59
Figura 5.17 Velocidad del motor de inducción con un <i>sag</i> de 80% y duración 240 ciclos ..	60
Figura 5.18 Corriente de la fase <i>a</i> que alimenta al motor de inducción durante la depresión de 240 ciclos	60
Figura 5.19 Velocidad del motor de inducción con un <i>sag</i> de 80% y 300 ciclos	61

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Comparación de las tres versiones del protocolo Profibus	19
Tabla 3.2 Código de Funciones para Modbus	26
Tabla 3.3 Configuración de bits de palabra de control	27
Tabla 3.4 Cadena hexadecimal del comando arranque del motor	28
Tabla 3.5 Cadena hexadecimal del comando velocidad 60Hz	28
Tabla 5.1 Parámetros de la máquina de inducción real	56
Tabla 5.2 Parámetros del sistema mecánico acoplado a la máquina de inducción	56

Lista de Símbolos y Abreviaturas

M	Mega
G	giga
W	Watts
Hz	Hertz
t	Tiempo
KD	Ganancia derivativa
KI	Ganancia integral
KP	Ganancia proporcional
Ω	Ohms
X	Reactancia
R	Resistencia
P	Potencia real
ASD	<i>Adjustable Speed Drive</i>
CC	Corriente continúa
CA	Corriente alterna
DC	Corriente directa
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i>
AFD	<i>Adjustable Frequency Drive</i>
RPM	Revoluciones por minuto
f	Frecuencia
p	Número de polos
PC	Computadora personal
RTU	Unidad Terminal Remota
DTE	Equipo Terminal de Datos
DCE	Equipo de Comunicación de Datos
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
Seg	Segundos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PWM	<i>Pulse–Width Modulation</i>

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La historia de los variadores de frecuencia (*Drivers*) se extiende mucho antes de la invención del tiristor incluyendo los principales acontecimientos a finales del siglo XIX. De hecho muchos de los conceptos básicos y circuitos integrados de los variadores de frecuencia actuales, basan sus orígenes al periodo del inicio del tiristor. La electrónica de potencia durante la primera mitad del siglo XX se relaciona estrechamente con el desarrollo de la tecnología de la electrónica de interruptores de arco. La introducción del rectificador de arco de mercurio, el tiratrón e ignitrón [Rissik 1935] [White 1944] marcaron un punto de referencia en el desarrollo de convertidores de potencia electrónicos durante la primera mitad del siglo pasado. Sin embargo, cada uno de estos nuevos interruptores de arco también se caracterizó por limitaciones de funcionamiento importantes que redujeron su rango de utilidad.

Es difícil subestimar la importancia de las soluciones innovadoras electromecánicas que fueron desarrolladas durante la primera mitad del siglo XX para proporcionar el ajuste de velocidad para máquinas de CA sin necesidad de utilizar la electrónica. El progreso en el desarrollo de los interruptores de arco de alta potencia cambia durante el año de 1920 y más aun al establecer el escenario para un clásico enfrentamiento entre soluciones electrónicas y electromecánicas al problema del control de velocidad de máquinas de CA.

Aunque los motores de inducción rápidamente crecieron en popularidad para usos industriales durante los primeros años del siglo XX, sus características de velocidad y par limitaron su uso para velocidad constante. En la ausencia de electrónica de potencia moderna, técnicas electromecánicas dominaron el acercamiento que fueron extensamente implementados durante la primera mitad de los años 1900's. Documentos técnicos presentados por Maier y Crosby en 1911 y 1914, respectivamente, ofrecen resúmenes contemporáneos interesantes de tecnología de control de velocidad de máquina de CA durante esta era [Maier 1911] [Crosby 1914]. Varias de estas técnicas fueron extensamente usadas durante muchas décadas [Laithwaite 1964] antes de la llegada del moderno tiratrón

basado en el manejo de CA en los años 1960 y 1970.

Los descubrimientos técnicos con tubos de vacío y de interruptores de arco combinados con las limitaciones de la tecnología de los *Drivers* CA atrajeron la atención de investigadores en el área de electrónica de potencia de todo el mundo. Por consiguiente, los años entre 1910 y 1940 fueron increíblemente productivos en la definición de muchos de los componentes básicos fundamentales de tecnología electrónica de *Drivers* CA que están todavía con nosotros, apropiadamente adaptados para los *Drivers* de estado sólido. En particular, la introducción de interruptores de arco de disparo estimuló el desarrollo rápido de una amplia gama de topologías de circuitos de potencia básica y técnicas que aun son usadas en la operación de los *Drivers*. Incluso en el control de la fase, la conmutación natural, conmutación forzada, inversor de CD a CA, ciclo-conversión y muchos otros.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis es diseñar una interface usando aplicaciones del lenguaje de programación gráfico LabVIEW para el *Driver* comercial Danfoss VLT-2800, poniéndolo a prueba ante depresiones de voltaje originadas por fallas en la red eléctrica, con la finalidad de estudiar los efectos en la velocidad de una máquina de inducción controlada por el *Driver*.

Es necesario mencionar que este trabajo de Tesis forma parte del proyecto de investigación “Efectos de depresiones de voltaje en máquinas de inducción y sus controles, parte II” aprobado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

1.3 Justificación

El control de procesos, el ahorro de la energía y los efectos de la fallas en la red eléctrica sobre los variadores de frecuencia y las máquinas de inducción son algunas de las principales razones que motivan nuestro esfuerzo y dedicación en el control del *Driver* CA mediante una interface sencilla y amigable para el usuario, que permita manipular la frecuencia de la red eléctrica la cual es necesaria para alimentar los motores de inducción y así poder controlar su velocidad. Esto nos lleva a desarrollar dispositivos de control a base de computadoras (PC) que nos permitiría crear ambientes de control y monitoreo para el

usuario. Los variadores de velocidad fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero, ya que con el empleo de un variador de frecuencia para el control de un equipo, permite hacer un mejor uso de la energía.

1.4 Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de esta Tesis comienza con una investigación minuciosa de los principios de operación de los convertidores de frecuencia, además de los protocolos más importantes de comunicación industrial, después comprender la forma de programación de los parámetros que intervienen en la comunicación entre el *Driver* de CA y la herramienta de programación LabVIEW para llevar el control del funcionamiento del motor de inducción, manipulado por el convertidor de frecuencia y finalmente se analizan los efectos de las fallas en la red eléctrica sobre el variador de frecuencia y la máquina de inducción.

1.5 Contenido de la tesis

En el Capítulo 1 se muestra una breve introducción a este trabajo, se describen los antecedentes en el cual se mencionan autores que han trabajado en el desarrollo del control de motores de inducción, mediante el uso e implementación de convertidores de frecuencia, aplicando diferentes técnicas. Por último se describe el objetivo de la tesis y la metodología seguida para lograrlo.

En el Capítulo 2 se presenta una descripción general de los convertidores de frecuencia, el principio utilizado para su funcionamiento, las partes que lo conforman y algunas ventajas e inconvenientes que resultan con el uso de los convertidores de frecuencia para el control de motores.

En el Capítulo 3 se describen los protocolos de comunicaciones industriales más importantes y populares para la automatización y control de procesos basados en topología tipo bus, se mencionan algunas tecnologías en los buses de campo incluyendo ventajas y desventajas que se tiene con el uso de cada uno de estos protocolos.

En el Capítulo 4 se presentan dos modos de operación del convertidor de frecuencia, primeramente programándolo de forma local desde su panel frontal para control de

velocidad de una máquina de inducción y después manipulándolo con su propio *software* desde una PC como dispositivo maestro y el convertidor de frecuencia usado como esclavo.

En el Capítulo 5 se describe el *software* construido bajo entorno de la herramienta de programación LabVIEW para la comunicación con el *Driver*, además se muestran los resultados de las pruebas realizadas de los efectos de los *sags* de voltaje sobre el variador de frecuencia y la máquina de inducción.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de los resultados obtenidos y trabajos futuros.

Capítulo 2

Descripción de los variadores de frecuencia

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta una descripción general de los variadores de frecuencia, el principio de funcionamiento, las partes que lo conforman y algunas ventajas e inconvenientes que resultan con la utilización de los *Drivers* de CA para el control de máquinas.

La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. Un Variador de Velocidad es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como Accionamiento de Velocidad Variable (ASD, por sus siglas en inglés *Adjustable Speed Drive*) [Phipps 1997].

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua (sin ser un motor paso a paso) también puede ser designado como variador de velocidad. Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como en ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipo de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadoras, tornos y fresadoras, etc.

En términos generales, puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad: mecánicos, hidráulicos y eléctrico-electrónicos. Dentro de cada tipo pueden encontrarse más subtipos, que se detallarán a continuación. Cabe aclarar que los variadores más antiguos fueron los mecánicos, que se emplearon originalmente para controlar la velocidad de las ruedas hidráulicas de molinos, así como la velocidad de las máquinas de vapores.

Los variadores de velocidad mecánicos e hidráulicos generalmente son conocidos como transmisiones cuando se emplean en vehículos, equipo agroindustrial o algunos otros tipos de maquinaria [Phipps 1997].

Variadores mecánicos

- Variadores de paso ajustable: estos dispositivos emplean poleas y bandas en las cuales el diámetro de una o más poleas puede ser modificado.
- Variadores de tracción: transmiten potencia a través de rodillos metálicos. La relación de velocidades de entrada/salida se ajusta moviendo los rodillos para cambiar las áreas de contacto entre ellos y así la relación de transmisión.

Variadores hidráulicos

- Variador hidrostático: consta de una bomba hidráulica y un motor hidráulico (ambos de desplazamiento positivo). Una revolución de la bomba o el motor corresponde a una cantidad bien definida de volumen del fluido manejado. De esta forma la velocidad puede ser controlada mediante la regulación de una válvula de control, o bien, cambiando el desplazamiento de la bomba o el motor.
- Variador hidrodinámico: emplea aceite hidráulico para transmitir par mecánico entre un impulsor de entrada (sobre un eje de velocidad constante) y un rotor de salida (sobre un eje de velocidad ajustable). También llamado acoplador hidráulico de llenado variable.
- Variador hidrovicoso: consta de uno o más discos conectados con un eje de entrada, los cuales estarán en contacto físico (pero no conectados mecánicamente) con uno o más discos conectados al eje de salida. El par mecánico (torque) se transmite desde el eje de entrada al de salida a través de la película de aceite entre los discos. De esta forma, el par transmitido es proporcional a la presión ejercida por el cilindro hidráulico que presiona los discos.

Variadores eléctrico-electrónicos

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos para motores de CD como son:

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

2.2 Los variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia (siglas VFD, del inglés: *Variable Frequency Drive* o bien AFD *Adjustable Frequency Drive*) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como *Drivers* de frecuencia ajustable, *Drivers* de CA, microdrivers o inversores [Fraile 2008]. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia, a veces son llamados *drivers* VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia). La Figura 2.1 muestra el ejemplo de un variador de frecuencia comercial.



Figura 2.1 Imagen del *Driver* Danfoss VLT-2800.

2.3 Principio de funcionamiento del VFD

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$\eta_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

Donde:

η_s = Velocidad síncrona (Rpm)

f = Frecuencia de suministro CA

p = Número de polos

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores asíncronos son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación (2.1) resultarían en 3600 Rpm, 1800 Rpm, 1200 Rpm y 900 Rpm respectivamente para motores sincrónicos únicamente, funcionando en 60Hz y en CA.

En los motores asíncronos las revoluciones por minuto son ligeramente menores por el asincronismo que indica su nombre. En estos se produce un desfase mínimo entre la velocidad de rotación del rotor (velocidad "real" o "de salida") comparativamente con la velocidad del campo magnético del estator la cual satisface la ecuación (2.1) tanto en motores síncronos como en motores asíncronos. El campo magnético del estator adelanta siempre en velocidad al rotor, de lo contrario el motor dejaría de girar en los momentos en que sean iguales las velocidades [Fraile 2008].

2.4 Composición del VFD

Los variadores de frecuencia, entregan voltaje y frecuencia variable conforme a los requerimientos del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto, toma la alimentación eléctrica de la red, la cual tiene voltaje y frecuencia fija, la transforma en un voltaje continuo (Rectificador más Filtro) y luego lo transforma en voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un Inversor. Contando sólo con esta última etapa (Inversor) es posible también alimentar estos motores a partir de un suministro de corriente continua (por ejemplo baterías) [Fraile 2008].

El controlador del dispositivo de variación de frecuencia esta formado principalmente por dispositivos de conversión electrónicos de estado sólido. La Figura 2.2 muestra el diseño habitual en la implementación de un variador de frecuencia. La primera etapa es encargada de convertir la energía de entrada de CA en CD usando un puente rectificador

trifásico de diodos, pero también se usan rectificadores controlados, debido a que la energía es convertida en continua, muchas unidades aceptan entradas tanto monofásicas como trifásicas (actuando como un convertidor de fase, un variador de velocidad). Después la energía intermedia de CD es convertida en una señal quasi-senoidal de CA usando un circuito inversor conmutado. Tan pronto como aparecieron los interruptores semiconductores fueron introducidos en los VFD, estos han sido aplicados para los inversores de todas las tensiones que hay disponible. Actualmente, los transistores bipolares de puerta aislada (IGBTs) son usados en la mayoría de circuitos inversores en la etapa de control de los variadores de frecuencia modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etcétera.

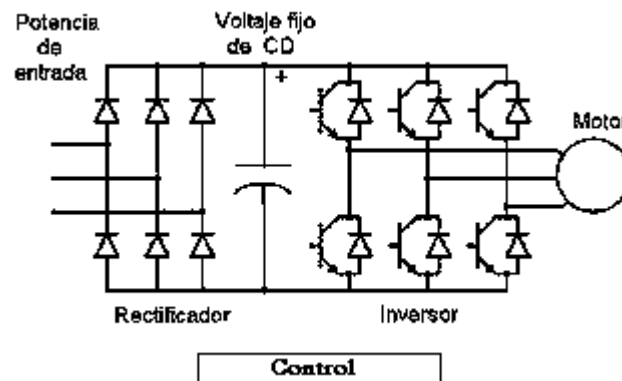


Figura 2.2 Diagrama del Variador de Frecuencia.

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre *buses* de campo) o mediante PC. Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado, etc.) pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC.

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

2.5 Formas de comunicación con un VFD

Las aplicaciones en las que se utilizan convertidores de frecuencia varían considerablemente en lo que se refiere a requisitos de control con diversas plataformas para la comunicación. Para cumplir con las distintas exigencias en la industria se han diseñado una amplia gama de variadores de frecuencia comerciales disponibles en el mercado que nos brindan grandes posibilidades de encontrar un equipo que cumpla con nuestras expectativas o necesidades. Existen compañías líderes en la fabricación de variadores de frecuencia tales como; Danfoss, ABB, Siemens, Mitsubishi y Honeywell, cada una de estas empresas incorpora varias funciones en sus equipos como, protecciones al motor, funciones de control para distintas aplicaciones por ejemplo; controles PID, controles lógicos y secuenciales. Para utilizar estas funciones encontraremos en estos dispositivos una gran cantidad de terminales de control para conectar entradas/salidas digitales y analógicas, además de puertos de comunicación para la conexión con otros equipos como por ejemplo una PC o PLC, con soporte para distintas plataformas en donde destacan los protocolos; Modbus, Profibus, DeviceNet, ControlNet y EtherNet/IP.

2.6 Motor que utiliza el VFD

El motor usado en un sistema VFD es normalmente un motor de inducción trifásico jaula de ardilla. Algunos tipos de motores monofásicos pueden ser igualmente usados, sin embargo los motores de trifásicos son normalmente preferidos. Varios tipos de motores síncronos ofrecen ventajas en algunas situaciones, pero los motores de inducción son más apropiados para la mayoría de propósitos y son generalmente la elección más económica. Los motores diseñados para trabajar a velocidad fija son usados habitualmente, pero la mejora permitida por los variadores de frecuencia consigue mejor rendimiento en los motores de inducción [Fraile 2008].

La mayoría de los sistemas eléctricos en la industria emplean motores de inducción. El más común es el motor de inducción jaula de ardilla, por su bajo costo y fiabilidad. Los motores de diferentes velocidades se consiguen variando el número de polos. Los principales elementos de un motor de inducción jaula de ardilla son el estator y el núcleo del rotor (un conjunto de láminas de hierro), un bobinado aislado del estator y los

conductores del rotor formados por una jaula de aluminio dentro del núcleo del rotor. En todos los motores de inducción cerrados como el mostrado en la Figura 2.3 el enfriamiento se realiza mediante un ventilador montado en el eje que hace circular el aire por el armazón, enfriando así sus superficies externas.

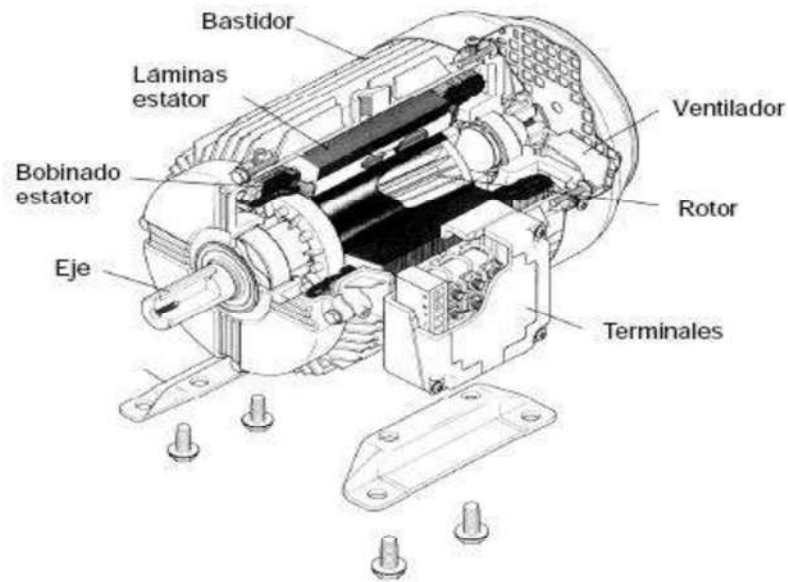


Figura 2.3 Motor de inducción Jaula de Ardilla.

Para el control de velocidad la relación frecuencia-voltaje es configurada por el usuario según la aplicación, siendo las más usuales una relación lineal, la cual produce un torque constante en todo el rango de velocidad, ó una relación cuadrática, es decir el torque disminuye a medida que baja la velocidad.

Las características del motor de CA requieren la variación proporcional del voltaje cada vez que la frecuencia es variada. Por ejemplo, si un motor esta diseñado para trabajar a 460 voltios a 60 Hz, el voltaje aplicado debe reducirse a 230 volts cuando la frecuencia es reducida a 30 Hz. Así la relación volts/hertz deben ser regulados en un valor constante ($460/60 = 7.67 \text{ V/Hz}$ en este caso). Para un funcionamiento óptimo, otros ajustes de voltaje son necesarios, pero nominalmente la constante V/Hz es la regla general. El método más novedoso y extendido en nuevas aplicaciones es el control de voltaje por PWM.

2.7 Ventajas de la utilización del VFD en el arranque de motores

asíncronos.

- El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- Controla la aceleración y el frenado progresivo.
- Limita la corriente de arranque.
- Permite el control de rampas de aceleración y desaceleración regulables en el tiempo.
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
- Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.

2.8 Inconvenientes de la utilización del VFD en el arranque de motores

asíncronos.

- Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo.
- Requiere estudio de las especificaciones del fabricante.
- Requiere un tiempo para realizar la programación.

2.9 Algunas aplicaciones de los variadores de frecuencia.

Los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas [Cowie 2001].

- Transportadoras. Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, la Figura 2.4 ilustra esta aplicación.

- Bombas y ventiladores. Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal. La Figura 2.5 ilustra el control de bombas por medio de un *Driver*.

- Ascensores y elevadores. Para arranque y parada suaves del motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.

- Prensas mecánicas y balancines. Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.

- Máquinas textiles. Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo *random* (aleatorio) para conseguir telas especiales.

- Compresores de aire. Se obtienen arranques suaves y menor consumo de energía.

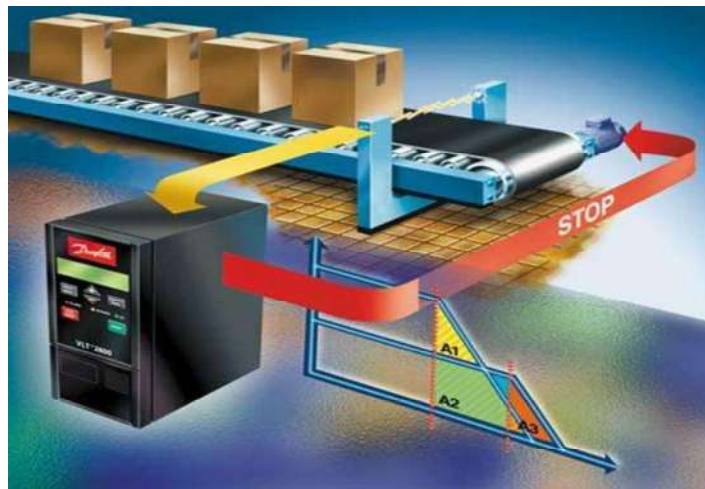


Figura 2.4 Ejemplo de banda transportadora.

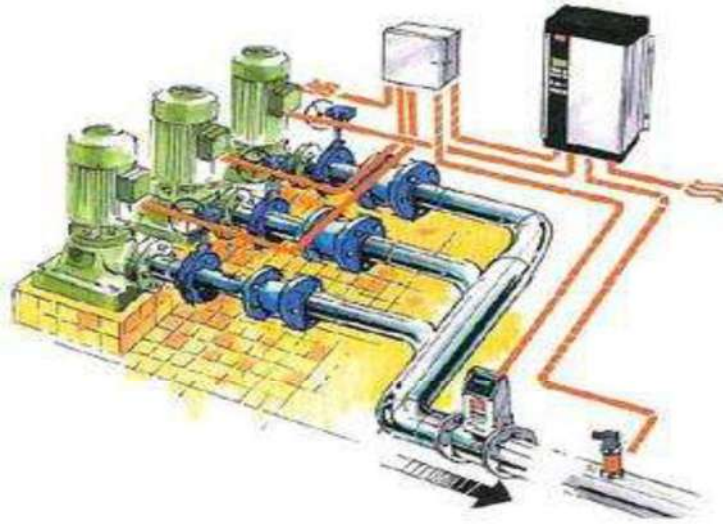


Figura 2.5 Ejemplo de sistema de bombas.

2.10 Conclusiones

El motor de inducción es hoy el motor eléctrico más económico por lo que es el más usado en la industria. Sin embargo, su empleo para algunas aplicaciones en que se requiere cambios de velocidad, es muy restringido, ya que dada la fuente de alimentación y número de polos, estos motores giran a velocidad casi constante, por tal razón se preferían otros tipos de motores menos eficientes y más caros.

La evolución de los variadores de frecuencia la impulsan diferentes agentes. Dos de los principales factores son el potencial ahorro energético y el aumento del control del comportamiento de motores. En un futuro, también será importante la demanda global de equipos con capacidad de adaptarse a herramientas de programación flexibles y la facilidad para añadir nuevas funcionalidades en la comunicación a través de diferentes protocolos de comunicación.

Capítulo 3

Protocolos de comunicación industrial

3.1 Introducción

En este capítulo se describen los protocolos de comunicaciones industriales más importantes en la industria para la automatización y control de procesos basados en topología tipo *bus*, se mencionan algunas tecnologías en los *buses* de campo incluyendo características, ventajas y desventajas que se tiene al implementar sistemas de comunicación basados en estos protocolos. Dado que el entorno de la comunicación PC-*Driver* se basa en aplicaciones del protocolo Modbus se menciona más ha profundidad sus características.

Los protocolos de comunicaciones industriales deben su origen a la fundación FieldBus (redes de campo). La fundación FieldBus, desarrolló un nuevo protocolo de comunicación, para la medición y control de procesos donde todos los instrumentos puedan comunicarse en una misma plataforma. FieldBus permite disponer de una tecnología para una nueva generación de sistemas de control y automatización, físicamente más simple, donde todo el software de regulación y control lógico, es efectuado por dispositivos de campo, otorgando la posibilidad de una arquitectura abierta donde cualquier fabricante de equipos de instrumentación pueda integrarse a la red de campo existente en una fábrica o empresa.

La gran mayoría de los fabricantes de instrumentos han anunciado la posibilidad de desarrollar productos basados en las especificaciones de la fundación FieldBus. En este momento existen los desarrollos en liderazgo por organizaciones que agrupan a ciertos fabricantes, que en algunos casos tuvieron como punto de partida estándares establecidos en algunos países.

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre los distintos dispositivos que conforman una red. Estos han tenido un proceso de evolución gradual a medida que la tecnología electrónica ha avanzado y muy en especial en lo que se refiere a los microprocesadores.

Un importante número de empresas en nuestro país presentan la existencia de islas automatizadas (células de trabajo sin comunicación entre sí), siendo en estos casos las redes y los protocolos de comunicación Industrial indispensables para realizar un enlace entre las distintas etapas que conforman el proceso.

El objetivo de un *bus* de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional lazo de corriente de 4 - 20mA o 0 a 10V CD, según corresponda. Generalmente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un *bus* serie, que conectan dispositivos de campo como PLC's, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión.

3.2 *Bus* de campo

Físicamente podemos considerar a un *bus* como un conjunto de conductores conectando conjuntamente y circuitos para permitir el intercambio de datos. Contrario a una conexión punto a punto donde sólo dos dispositivos intercambian información, un *bus* consta normalmente de un número de usuarios superior, además que generalmente un *bus* transmite datos en modo serie, a excepción de algún protocolo de *bus* particular como SCSI, o IEEE-488 utilizado para interconexión de instrumentos de medición, que no es el caso de los *buses* tratados como *buses* de campo.

Para una transmisión serie es suficiente un número de cables muy limitado, generalmente son suficientes dos o tres conductores y la debida protección contra las perturbaciones externas para permitir su tendido en ambientes de ruido industrial.

El modo más sencillo de comunicación con el *bus* es el sondeo cliente/servidor. Más eficiente pero también más costoso es el *Token bus* (IEEE 802.4), desde el punto de vista físico tenemos un *bus* lineal, desde el punto de vista lógico un *token ring*. El procedimiento *token passing* es una combinación entre cliente/servidor y *token bus*. Todo servidor inteligente puede ser en algún momento servidor.

Ventajas de un *bus* de campo

- El intercambio puede llevar a cabo por medio de un mecanismo estándar.
- Flexibilidad de extensión.
- Conexión de módulos diferentes en una misma línea.
- Posibilidad de conexión de dispositivos de diferentes procedencias.

- Distancias operativas superiores al cableado tradicional.
- Reducción masiva de cables y costo asociado.
- Simplificación de la puesta en servicio.

Desventajas de un *bus* de campo

- Necesidad de conocimientos superiores.
- Inversión de instrumentación y accesorios de diagnóstico.
- Costos globales inicialmente superiores.

3.3 Tipos de *buses* más comunes

Los *buses* de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso, reciben la denominación genérica de *buses* de campo.

Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un *bus* de campo universal.

Los *buses* de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

- 1.- Profibus
- 2.- DeviceNet
- 3.- Modbus

3.4 Protocolo Profibus

La base de la especificación del estándar Profibus fue un proyecto de investigación (1987-1990) realizado por: *ABB, AEG, Bosch, Honeywell, Moeller, Landis & Gyr, Phoenix Contact, Rheinmetall, RMP, Sauter-cumulus, Schleicher*, Siemens y cinco institutos alemanes de investigación. El resultado de este proyecto fue el primer borrador de la norma DIN 19245, el estándar Profibus, partes 1 y 2. La parte 3, Profibus-DP, se definió en 1993. Recientes estudios de mercado llevados a cabo por empresas ajenas a la Organización de Usuarios de Profibus señalan a éste como el *bus* con más futuro en el campo de los procesos industriales.

Profibus es un *bus* de campo abierto independiente del fabricante. Su área de aplicación abarca manufacturación, procesos y automatización de edificios. La

independencia del fabricante y el ser un sistema abierto esta garantizado por el estándar Profibus EN 50 170. Con Profibus los dispositivos de diferentes fabricantes pueden comunicarse sin necesidad de adaptaciones mediante interfaces especiales. Profibus puede ser empleado tanto para transmisiones de datos de alta velocidad y tiempos críticos, como para tareas intensivas de comunicación compleja [Profibus 2009].

Profibus es actualmente el líder de los sistemas basados en *buses* de campo en Europa y goza de una aceptación mundial (20% del mercado en 1999). También puede ser usado tanto para transmisión crítica de datos a alta velocidad, como para tareas de comunicaciones extensas y complejas. Esta versatilidad viene dada por las tres versiones compatibles que componen la familia Profibus. La familia Profibus consiste en tres versiones compatibles.

Profibus-DP (Periferia Descentralizada)

Optimizado para alta velocidad y costo reducido. Diseñado especialmente para la comunicación entre los sistemas de control autónomos y las entradas/salidas distribuidas en procesos de manufactura. Transferencia de pequeñas cantidades de datos. Puede ser empleado para remplazar transmisiones paralelas de señales con 24V o 0 a 20mA y tiene conexión *Plug & Play*.

Profibus-PA (Automatización de Procesos)

Básicamente es la ampliación de Profibus-DP con una tecnología apta para ambientes peligrosos y con riesgo de explosión. Está especialmente diseñado para automatización de procesos. Permite que sensores y actuadores puedan ser conectados a un *bus* común en áreas intrínsecas de seguridad. Permite comunicación de datos y transporte de energía sobre el mismo *bus* empleando tecnología de dos cables, acorde con el estándar internacional IEC 1158-2.

Profibus-FMS (*Fieldbus Message Specification*)

Diseñado para un gran número de aplicaciones y comunicaciones al nivel de célula, donde PC's y PLC's se comunican entre sí de propósito general, supervisión, configuración y transmisión de grandes cantidades de datos: programas y bloques de datos. Intercambio a cíclico de datos con tiempos no críticos, par a par (*peer to peer*), entre estaciones inteligentes. En la Tabla 3.1 se muestran la comparación entre las distintas subfamilias de Profibus.

Tabla 3.1 Comparación de las tres versiones del protocolo Profibus.

Sub-familia	Aplicación	Ventaja	Características
Profibus FMS	Automatización	Universal	Amplias aplicaciones
Profibus DP	Alta velocidad	Rápido	Eficiente y costo bajo
Profibus PA	Ambientes peligrosos	Seguro	Seguridad intrínseca

La Figura 3.1 ilustra las áreas de aplicación y los dispositivos que se emplean para cada una de las versiones del protocolo Profibus.

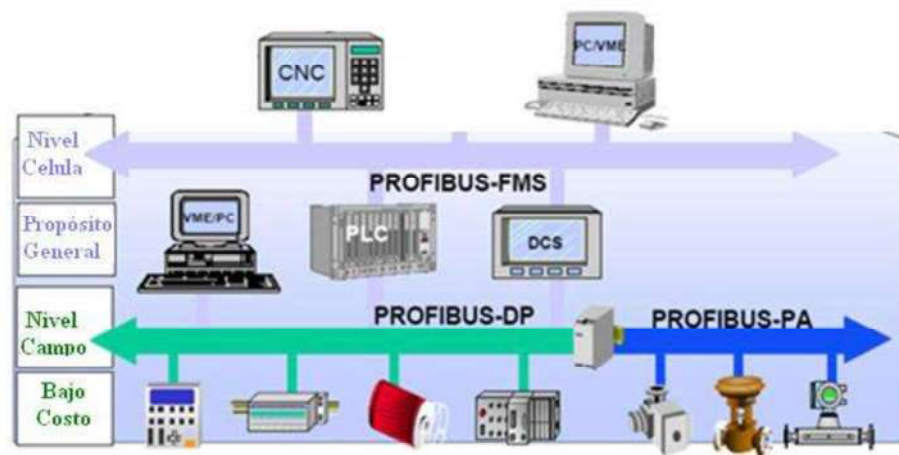


Figura 3.1 Áreas de aplicaciones de las versiones Profibus.

3.4.1 Estructura básica de Profibus

Profibus especifica las características técnicas y funcionales de un sistema basado en un *bus* de campo serie en el que controladores digitales descentralizados pueden ser conectados entre si desde el nivel de campo al nivel de control. Se distinguen los siguientes tipos de dispositivos:

- **Nodos:** Son los elementos esenciales del *bus*.
- **Dispositivos maestros:** determinan la comunicación de datos sobre el *bus*. Un maestro puede enviar mensajes sin una petición externa cuando mantiene el control de acceso al *bus* (la señal). Los maestros también se denominan estaciones activas en el protocolo Profibus.

- **Dispositivos esclavos:** son dispositivos periféricos. Los esclavos son normalmente dispositivos de E/S, válvulas, actuadores y transmisores de señal. No tienen el control de acceso al *bus* y sólo pueden recibir mensajes o enviar mensajes al maestro cuando están habilitados para ello. Los esclavos también son denominados estaciones pasivas. Por todo lo anterior sólo necesitan una parte del protocolo del *bus*, siendo su implementación particularmente económica.
- **Repetidores:** Son simples transceptores bidireccionales para regenerar la señal (amplificadores).

Profibus ofrece un amplio espectro de componentes de red para sistemas de transmisión eléctricos.

La red Profibus utiliza un cable bifilar trenzado apantallado como medio de transmisión. La interface RS 485 funciona con diferencia de tensión. Por este motivo, es más inmune a las interferencias que una interface de tensión o de corriente. En Profibus los equipos pertenecientes al *bus* están conectados a éste a través de una terminal de *bus* de conexión a *bus* (máximo 32 equipos acoplados por segmento). Los distintos segmentos se conectan a través de repetidores.

3.5 DeviceNet

Originalmente desarrollada por *Rockwell Automation* en el año 1993, DeviceNet es una de las redes de dispositivos más populares y de mayor penetración en el mercado americano, cubriendo en E.U. cerca del 60% de las redes de su tipo y en Chile sobre el 40%, encontrándose en las más diversas aplicaciones en la industria nacional. Esta plataforma fue adoptada por *Open DeviceNet Vendor Association*, OVDA, una organización no lucrativa fundada en 1995 para apoyar mundialmente la evolución de sus especificaciones, agrupando a más de 300 proveedores de dispositivos de control para automatización de plantas. Su misión es la de promover la normalización de este protocolo en todo el mundo y propiciar la mejoría de las funcionalidades de la norma con el fin de satisfacer las necesidades de conectividad de la plantas modernas [Odva 2010].

DeviceNet es un *bus* de campo económico para componentes industriales, tales como detectores de final de carrera, detectores ópticos, terminales de válvulas, convertidores de frecuencia, paneles de mando y muchos otros productos. DeviceNet se utiliza para reducir

el costoso cableado individual y para mejorar las funciones de diagnóstico específicas por componente.

Esta red se desarrolló para satisfacer las necesidades de la industria de contar con un medio de comunicación que fuera aceptado universalmente y que tuviera la capacidad de aceptar la mayoría de los dispositivos empleados en el primer nivel de la planta. Además de leer el estado de los dispositivos discretos conectados a la red, tiene algunas capacidades como; reportar temperaturas, leer la corriente de carga en un arrancador de motor, cambiar la velocidad del impulsor de un motor y contar el número de envases que han pasado en una banda transportadora durante el turno anterior.

3.5.1 Características de DeviceNet

DeviceNet es una de las redes que han adoptado el esquema maestro-esclavo (*Master/Slave*), lo que implica que la información producida por una sola fuente en la red alimenta en forma simultánea a todos los probables receptores y deja a estos la decisión de escuchar o no el mensaje recibido.

Los beneficios del esquema se reflejan en una mejor utilización del ancho de banda y la agilización en el tiempo de respuesta en la red. La red permite que los dispositivos conectados a la misma se puedan enlazar como maestro-esclavo entre pares. Este último modo de comunicación es un modelo recientemente desarrollado para las pistas de comunicación más sofisticadas, como FF FieldBus y ControlNet. Múltiples nodos consumen en forma simultánea los mismos datos generados por un productor sencillo. Así, los nodos pueden sincronizarse con facilidad, y el ancho de banda es utilizado con mayor eficiencia.

La relación maestro/esclavo es la más sencilla de entender, ya que el PLC o Scanner es el maestro y los dispositivos entrada/salida son los esclavos. El esclavo sólo habla cuando se le interroga, y únicamente hay un maestro por red.

Considérese que los nodos pueden ser eliminados o insertados sin necesidad de desconectar la energía a la red. También se dispone de fuentes de energía adicionales que se pueden conectar en cualquier lugar de la red para tener un apoyo redundante. En algunos casos se requiere energizar determinados dispositivos que consumen grandes cantidades de energía de una fuente externa, tales como arrancadores de motores y válvulas solenoides.

Las características del enlace físico para una red DeviceNet son las siguientes.

- Número máximo de nodos por red: 64 en topología de *bus* con derivaciones.
- Distancia máxima: 100 m a 500 m, hasta 6 km usando repetidores con velocidades de 125, 250 y 500 Kbps.
- Emplea dos pares trenzados: control y alimentación, con alimentación en 24 V, con opción de redundancia.
- Transmisión basada en el modelo maestro-esclavo con un empleo eficiente de ancho de banda y con mensajes desde 1 *byte* hasta largos ilimitados.
- Reemplazo Automático de nodos, no requiere de programación y elevado nivel de diagnósticos.

3.6 Protocolo Modbus

El estándar Modbus define un protocolo ubicado en la capa de aplicación del modelo OSI, que provee mediante un esquema cliente/servidor, el envío de mensajes entre dispositivos en diferentes tipos de *buses* o redes. La Figura 3.2 nos muestra una topología convencional de éste protocolo.

Modbus define una estructura de mensaje que los controladores reconocerán y usarán, independiente del tipo de redes sobre la que se comunique. Este protocolo, describe el proceso que usa un controlador para pedir acceso a otro dispositivo, como responderá a las peticiones desde otros dispositivos y como se detectaran y notificaran los errores.

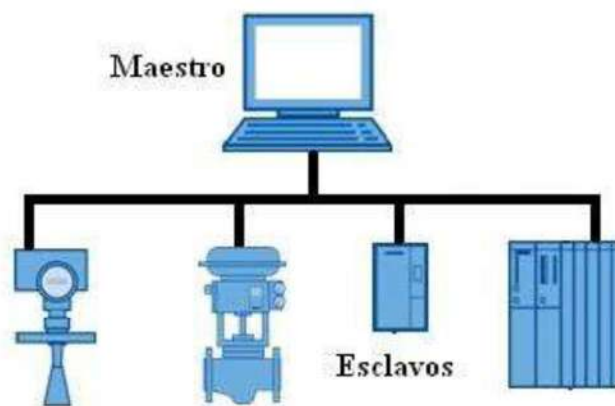


Figura 3.2 Topología del *Bus* Modbus.

El protocolo Modbus es un protocolo de línea serie maestro/esclavo. En donde sólo un maestro es conectado al *bus*, y uno o más nodos esclavos son conectados al mismo *bus* serie. Una comunicación Modbus es iniciada siempre por el maestro, y por esto los nodos esclavos nunca podrán transmitir datos sin recibir una petición por el nodo maestro. Además, los nodos esclavos no pueden comunicarse entre sí, es decir, que en ese *bus* sólo habrá una comunicación y solamente podrá ser entre maestro y uno de los esclavos [NI 2009].

3.6.1 Modos de petición

El nodo maestro emite una petición Modbus al nodo esclavo en dos modos:

Modo Único

El maestro se dirige a un esclavo individual que después de recibir y procesar la petición, el esclavo devuelve un mensaje o respuesta al maestro, como se ilustra en la Figura 3.3.

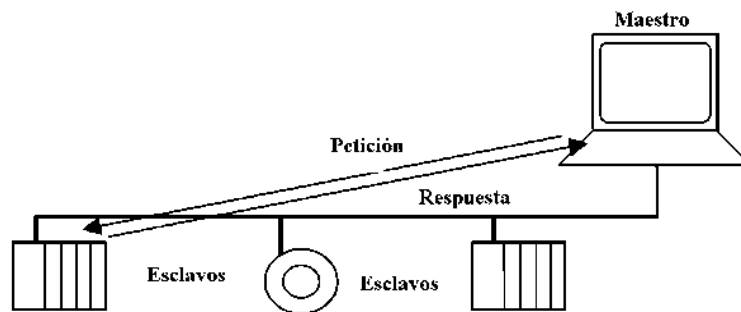


Figura 3.3 Modo Único de petición del dispositivo maestro.

Modo Difusión

El maestro envía una petición a todos los esclavos y estos no responden. Estos mensajes son comandos de escritura y todos los esclavos deben obligatoriamente aceptar la difusión para la función de escritura, la Figura 3.4 ilustra este modo.

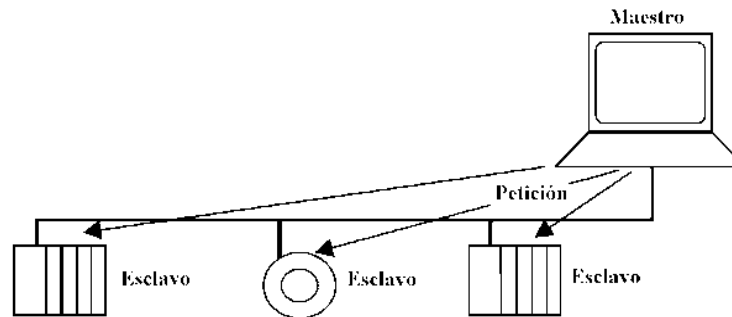


Figura 3.4 Modo Difusión de petición del dispositivo maestro.

3.6.2 Tipos de transmisión

Los controladores pueden ser configurados para comunicarse sobre redes estándar Modbus utilizando cualquiera de los dos modos de transmisión: ASCII o RTU. Los usuarios seleccionan al nodo deseado, junto con los parámetros de comunicación del puerto serie (velocidad, paridad, etc.) durante la configuración de cada controlador. El modo y parámetros serie deben ser los mismos para todos los dispositivos conectados a una [Modbustools 2009].

Modo ASCII

Cuando los controladores se configuran para comunicarse con una red Modbus según el modo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), cada *byte* (8 *bits*) en un mensaje se envía como dos caracteres ASCII. La principal ventaja de este modo es que permite intervalos de tiempo de hasta un segundo entre caracteres sin dar lugar a error.

Modo RTU

Cuando los controladores son configurados para comunicarse en una red Modbus usando el modo RTU (*Remote Terminal Unit*), cada *byte* en un mensaje contiene dos dígitos hexadecimales de 4 *bits*. La principal ventaja de este modo es que su mayor densidad de caracteres permite mejor rendimiento que el modo ASCII para la misma velocidad. Cada mensaje debe ser transmitido en un flujo continuo.

A continuación se da una descripción de cada uno de los campos del mensaje RTU propios para el variador de frecuencia Danfoss VLT-2800, la Figura 3.5 muestra los campos del mensaje Modbus ASCII y RTU.

N° Esclavo	Código de Operación	Subfunciones, Datos	LRC(16) H L	CR	LF
---------------	------------------------	---------------------	----------------	----	----

Codificación ASCII

N° Esclavo	Código de Operación	Subfunciones, Datos	CRC(P16) H L
---------------	------------------------	---------------------	-----------------

Codificación RTU

Figura 3.5 Campos de mensaje para código; ASCII y RTU.

Campo número de esclavo (1 *byte*)

El dispositivo maestro puede enviar mensajes al dispositivo esclavo, colocando en el campo de número de esclavo del mensaje un rango de direcciones del 1 al 127. El número 0 se reserva para los mensajes difundidos o *broadcast*.

Campo código de operación o función (1 *byte*)

Cada función permite transmitir datos u ordenes al esclavo. Existen dos tipos básicos de ordenes:

- 1.- Ordenes de lectura/escritura de datos en los registros o en la memoria del esclavo.
- 2.- Ordenes de control del esclavo y el propio sistema de comunicaciones (arranque/paro, carga y descarga de programas).

El estándar Modbus, maneja una serie de comandos o códigos de función para la interacción entre maestro y esclavo. La Tabla 3.2 muestra la lista de funciones disponibles en el protocolo Modbus para el *Driver* (VLT-2800) con sus correspondientes códigos de operación.

Campo de subfunciones o datos (n *bytes*)

Este campo suele contener, en primer lugar, los parámetros necesarios para ejecutar la función indicada por el *byte* anterior. Estos parámetros podrán ser códigos de subfunciones en el caso de ordenes de control o direcciones del primer *bit* o *byte*, número de *bits* o palabras a leer o escribir, valor del *bit* o palabra en caso de escritura, etc.

Tabla 3.2 Código de Funciones para Modbus.

Código	Función
01 _H	Leer estado de bobina
03 _H	Leer valor de registro
05 _H	Forzar una bobina
06 _H	Modificar un registro
0F _H	Forzar múltiples bobinas

Campo CRC

El mensaje incluye la comprobación de error que es basado en el método CRC (*Cyclic Redundancy Check*). El campo CRC contiene 16 *bits* binarios (2 *bytes*). Este par de *bytes* necesarios para el envío de ordenes al esclavo, se calculó mediante una calculadora electrónica en línea que se encuentra en la referencia [Modbus 2009].

Direccionamiento de Registros y Bobinas.

En un telegrama de mensaje Modbus, todos los datos son referenciados a la dirección 0. Cuando deseamos dirigirnos a la bobina 1 en un controlador programable debemos usar la dirección bobina 0 en el campo de datos del mensaje. Por ejemplo para direccionar la bobina 127 lo haremos a la dirección 007E_{Hex} (126 decimal).

De igual manera, cuando nos queremos referir a un registro específico lo debemos multiplicar diez y restarle uno. Por ejemplo, si queremos modificar o leer el registro número 104, lo haremos; $104 \times 10 = 1040 - 1 = 1039 = 040F_{Hex}$.

Cuando se quiere modificar el valor de parámetro de la base de datos del dispositivo esclavo (*Driver* VLT-2800), se debe de multiplicar por un factor particular para cada uno de los diferentes números de parámetros. Por ejemplo si queremos modificar el valor del Parámetro 201 Frecuencia Mínima, a un valor de 10 Hz lo debemos multiplicar por 10 ya que el factor de conversión del parámetro es de 1, entonces quedaría $10 \times 10 = 100$ decimal o 64_{Hex}.

Descripción de palabra de control.

La palabra de control, es usada para enviar comandos al variador de frecuencia como; inicio, *reset* y paro del motor. La Tabla 3.3 muestra el mapa de *bits* para configuración del tipo de orden de control que se desea enviar.

Tabla 3.3 Configuración de *bits* de palabra de control.

No. <i>Bit</i>	<i>Bit</i> = 0	<i>Bit</i> = 1
0		Modificar ref. <i>lsb</i>
1		Modificar ref. <i>msb</i>
2	Freno CD	
3	Alto, despacio	
4	Alto, rápido	
5	Congelar salida	
6	Alto con rampa	Inicio
7		<i>Reset</i>
8		<i>Jog</i>
9	Rampa 1	Rampa 2
10	Dato no valido	Dato valido
11	No función	No función
12	No función	Salid. Dig. Term.46
13	Selecc. Conf. <i>Lsb</i>	
14	Selecc. Conf. <i>Msb</i>	
15		Inverso

A continuación se muestra un par de ejemplos, de las cadenas que debe tener el mensaje Modbus para enviar las ordenes al *Driver* de arranque de motor y modificación de velocidad del motor a 1800 rpm. Las cadenas que producen estas acciones se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5 respectivamente.

La Tabla 3.4 nos muestra la cadena completa correspondiente al arranque del motor, primeramente comienza por la dirección del dispositivo en el *bus*, que en este caso es 01_H (*byte* 0), después el tipo de función 0F_H (“Forzar múltiples bobinas”) utilizada para enviar la orden de modificar múltiples bobinas (*byte* 1), seguido de la dirección y número de bobinas referenciadas (*bytes* 2,3,4,5 y 6), luego se conforma la palabra de control (*bytes* 7 y 8) de acuerdo con la Tabla 3.3, se añade después el estado del motor de 100% (*bytes* 9 y 10) y por último se incluyen el valor CRC (*bytes* 11 y 12), calculado para la cadena de *bytes* anteriores.

Tabla 3.4 Cadena hexadecimal del comando arranque del motor.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
Dirección	Función	Bo. Hi	Bo. Lo	No. Bo. Hi	No. Bo. Lo	Byte Cont.	Forzar Dat. Hi
01	0F	00	00	00	20	04	7C
Byte 8		Byte 9		Byte 10		Byte 11	Byte 12
Forzar Dat. Lo		Forzar Datos Bo. Hi		Forzar Datos Bobinas. Hi		CRC Hi	CRC Lo
04		00		40		37	43

La Tabla 3.5 muestra el ejemplo de la cadena de *bytes* necesarios para modificar la velocidad del motor a 1800 rpm, dado que la velocidad es dependiente de la frecuencia, lo que se hace es cambiar el valor de la frecuencia a 60Hz del Parámetro 104 Frecuencia del Motor.

Considerando ahora que la dirección del dispositivo esclavo (*byte* 0) es 12 decimal o 0C_H, el siguiente *byte*, contiene el tipo de función, en este caso, como queremos modificar sólo un registro, se utiliza la función 06_H (Modificar un registro). Después se incluyen la dirección del registro que se quiere modificar (*bytes* 2 y 3), seguido del valor que se desea de frecuencia (*bytes* 4 y 5) y por último el valor del CRC (*bytes* 6 y 7) calculado para los *bytes* anteriores.

Tabla 3.5 Cadena hexadecimal del comando velocidad 60Hz.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6 + 7
Dirección	Función	Registros. Dirección. Hi	Registros. Dirección. Lo	Modifi. Hi	Modifi. Lo	CRC
0C	06	04	0F	00	3C	B8 E8

3.6.3 Estructura de *Bus* Modbus

El medio físico de conexión puede ser un *bus* semidúplex (*half duplex*) (RS-485 o fibra óptica) o dúplex (*full duplex*) (RS-422, BC 0-20mA o fibra óptica). La comunicación es asíncrona y las velocidades de transmisión previstas van desde los 75 *bauds* a 19,200 *bauds*. La máxima distancia entre estaciones depende del nivel físico, pudiendo alcanzar hasta 1,200 m sin repetidores.

La estructura lógica es del tipo maestro-esclavo, con acceso al medio controlado por el maestro. El número máximo de estaciones previsto es de 63 esclavos más una estación maestra. Los intercambios de mensajes pueden ser de dos tipos:

- Intercambios punto a punto, que comportan siempre dos mensajes: una demanda del maestro y una respuesta del esclavo puede ser simplemente un reconocimiento (*acknowledge*).
- Mensajes difundidos. Estos consisten en una comunicación unidireccional del maestro a todos los esclavos. Este tipo de mensajes no tiene respuesta por parte de los esclavos y se suelen emplear para mandar datos comunes de configuración, *reset*, etc.

3.7 Conclusiones

Hoy en día las tecnologías que triunfan en el mercado son aquellas que ofrecen las mejores ventajas y seguridad a los clientes, cada vez se está acabando con tecnologías cerradas; que en un mundo en proceso de globalización, es imposible que sobrevivan.

Gracias al estudio de las características de los protocolos de comunicación, nos permite elegir el sistema más adecuado para nuestro propósito en la comunicación PC-Driver.

A nivel industrial se está dando un gran cambio, ya que no sólo se pretende trabajar con la especificidad de la instrumentación y el control automático, sino que existe la necesidad de mantener históricamente información de todos los procesos, además que esta información este también en tiempo real y que sirva para la toma de decisiones y se pueda así mejorar la calidad de los procesos.

Las condiciones extremas a nivel industrial requieren de equipos capaces de soportar elevadas temperaturas, ruido excesivo, polvo, humedad y demás condiciones adversas; pero además requiere de personal capaz de ver globalmente el sistema de control y automatización industrial junto con el sistema de red digital de datos.

Capítulo 4

Modos de operación del *Driver* Danfoss

VLT-2800

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan dos aplicaciones del convertidor de frecuencia, utilizándolo como controlador para un motor de velocidad asíncrona, manipulando los parámetros del *Driver* con las teclas de la unidad de control local. La otra aplicación se refiere a la operación del *Driver* pero ahora con el uso de una PC como dispositivo maestro y el convertidor de frecuencia utilizado como esclavo.

4.2 Operación modo local del *Driver* VLT-2800

La Figura 4.1 muestra la conexión en bloques del convertidor de frecuencia (VLT-2800) utilizada para la programación en modo local, en donde se conecta un motor asíncrono trifásico.



Figura 4.1 Motor asíncrono controlado por *Driver* VLT-2800.

4.2.1 Programación local del *Driver* VLT-2800

A continuación se muestran las partes que conforman el panel frontal del variador y la

programación básica del *Driver* necesaria para operar un motor de inducción. El *Driver* cuenta con una lista bastante amplia de parámetros para su funcionamiento, en seguida sólo se muestran los más importantes [Danfoss 2009].

Unidad de control

En la parte delantera del convertidor de frecuencia hay un panel de control. Este panel de control está dividido en nueve grupos de funciones, como se observa en la Figura 4.2.

1. Pantalla de LED's de seis dígitos.
2. Teclas para modificar los parámetros y cambiar las funciones de la pantalla.
3. Luces indicadoras.
4. Teclas para el funcionamiento local.
5. Conector D-Sub, en donde es posible conectar una unidad de control LCP 2.
6. Terminales de control para entradas/salidas analógicas y digitales (comunicación serie RS-485).
7. Alimentación para el *Driver* de la red eléctrica, terminales 91, 92 y 93.
8. Terminales para conexión de freno de CD para el motor, terminales 81 y 82.
9. Salidas para alimentación al motor, terminales 96, 97 y 98.



Figura 4.2 Panel frontal del *Driver* Danfoss.

Todos los datos se visualizan en la pantalla de LED's de seis dígitos que puede mostrar un elemento de dato continuamente durante el funcionamiento normal. Como complemento de la pantalla, hay tres luces indicadoras para la conexión al suministro de red (*ON*), las advertencias (*WARNING*) y las alarmas (*ALARM*).

Teclas de control

(*QUICK MENU*)



Proporciona acceso a los parámetros del Menú rápido. La tecla menú rápido (*QUICK MENU*) también se utiliza cuando no deben modificarse valores de parámetro.

(*CHANGE DATA*)



La tecla cambiar ajustes (*CHANGE DATA*) también sirve para confirmar un cambio en los ajustes de parámetro. (+) / (-) se utilizan para seleccionar parámetros y cambiar sus valores. Esta tecla también se utiliza en el modo de *Display* para seleccionar la visualización de un valor de funcionamiento.

(*QUICK MENU*) + (+)



Las teclas (*QUICK MENU*) + (+) deben pulsarse a la vez para acceder a todos los parámetros.

(*STOP/RESET*)



La función Alto/Reinicio, tecla (*STOP/RESET*) permite realizar una acción de paro local si el parámetro 014 Parada local está activo, en caso contrario debemos desconectar el

equipo de la red.

(START)



La función Inicio (*START*) se utiliza para arrancar el convertidor de frecuencia. Siempre está activada, aunque la tecla (*START*) no puede anular un comando de parada. La función *STOP* tiene prioridad sobre la función *START*.

4.2.2 Visualización de estados de lectura

Modo *Display*



En funcionamiento normal es posible ver continuamente el elemento de dato que elija el operador. Con las teclas (+/-) es posible seleccionar estas opciones en el modo de *Display*:

- Frecuencia de salida Hz
- Intensidad de salida A
- Tensión de salida V
- Tensión del circuito intermedio V
- Potencia de salida kW

Modo de Menú



Para acceder al modo de Menú, las teclas (*QUICK MENU*) + (+) debe pulsarse a la vez. En el modo de Menú es posible cambiar todos los parámetros del convertidor de frecuencia. Puede desplazarse por los parámetros con las teclas (+/-). Al desplazarse por el modo de Menú, destellan los números de parámetro. Por ejemplo el parámetro 102 que trata del ajuste de potencia del motor PM,N es 0,75. Para cambiar el valor de 0,75 es necesario pulsar primero la tecla (*CHANGE DATA*) y después podrá modificarse este valor con las teclas (+/-). Si con un parámetro determinado la pantalla muestra tres puntos a la derecha,

significa que el valor de parámetro tiene más de tres cifras. Para ver el valor, pulse la tecla (*CHANGE DATA*).

Menú Rápido



Con la tecla (*QUICK MENU*), es posible acceder a las 12 funciones más importantes del convertidor de frecuencia. Después de la programación, en la mayoría de los casos el convertidor de frecuencia estará preparado para funcionar. Cuando se pulsa la tecla (*QUICK MENU*) en el modo de *Display*, se inicia el Menú rápido. Puede desplazarse por el Menú rápido con las teclas (+/-) y cambiar los valores de dato si pulsa primero la tecla (*CHANGE DATA*), y después cambia los valores con (+/-).

Los parámetros del Menú rápido son los siguientes:

- Parámetro. 102 Potencia del motor PM,N
- Parámetro. 103 Tensión del motor UM,N
- Parámetro. 104 Frecuencia del motor fM,N
- Parámetro. 105 Intensidad del motor IM,N
- Parámetro. 106 Velocidad nominal del motor nM,N
- Parámetro. 107 Adaptación automática del motor.
- Parámetro. 204 Referencia mínima RefMIN
- Parámetro. 205 Referencia máxima RefMAX
- Parámetro. 207 Tiempo de rampa de aceleración
- Parámetro. 208 Tiempo de rampa de desaceleración
- Parámetro. 002 Control local/remoto
- Parámetro. 003 Referencia local

Los valores de los parámetros 102 - 106 se pueden encontrar en la placa de características del motor.

A continuación se muestra la forma de configurar los parámetros más importantes en el control local de convertidor de frecuencia, para utilizar éste como controlador para un motor de velocidad asíncrona.

• Parámetro. 002 Control local y remoto

Control remoto

[0]

Control local [1]

Función:

El convertidor cuenta con dos modos de funcionamiento distinto; Control remoto [0] o Control local [1].

Descripción de opciones:

Si se selecciona Control remoto [0], el convertidor de frecuencia se controla mediante, las terminales de control o la comunicación serie. Si se selecciona Control local [1], el convertidor de frecuencia puede controlarse mediante, la tecla (*START*) y las teclas (*STOP/RESET*).

• **Parámetro. 102 Potencia del motor PM,N**

Valor:

0,25 - 11 kW Depende de la unidad

Función:

Aquí se debe ajustar el valor de potencia (kW) PM,N, que corresponde a la potencia nominal del motor. En fábrica, se habrá establecido un valor de potencia nominal (kW) PM,N, que depende del tipo de motor.

Descripción de opciones:

Ajuste el valor que corresponde al dato de la placa de características del motor. También pueden servir los valores de tamaño inmediatamente inferior y superior al ajuste de fábrica.

• **Parámetro. 103 Tensión del motor UM,N**

Valor:

Para unidades de 200 V 50 - 999 V (230v)

Para unidades de 400 V 50 - 999 V (400v)

Función:

En este parámetro se ajusta la tensión nominal del motor UM,N para su conexión en estrella o delta.

Descripción de opciones:

Seleccione un valor que corresponda a los datos de la placa de características del motor, independientemente de la tensión de red del convertidor de frecuencia.

• **Parámetro. 104 Frecuencia del motor fM,N**

Valor:

24-1000 Hz (60Hz)

Función:

Aquí es donde se selecciona la frecuencia nominal $f_{M,N}$ del motor.

Descripción de opciones:

Seleccione el valor que corresponde a los datos de la placa de características del motor.

• Parámetro. 105 Intensidad del motor IM,N **Valor:**

0,01 - IMAX Depende del motor seleccionado

Función:

La intensidad nominal IM,N del motor forma parte de los cálculos que realiza el convertidor de frecuencia de funciones como el par y la protección térmica de dicho motor.

Descripción de opciones:

Seleccione el valor que corresponde a los datos de la placa de características del motor. Ajuste la intensidad IM,N del motor tomando en cuenta si está conectado en estrella o en delta.

• Parámetro. 106 Velocidad nominal del motor $n_{M,N}$ **Valor:**

100 - $f_{M,N} \times 60$ (máx. 60.000 rpm)

Depende del parámetro 102 Potencia del motor, PM,N

Función:

Aquí se selecciona el valor que corresponde a la velocidad nominal del motor $n_{M,N}$, en la placa de características del mismo.

Descripción de opciones:

Seleccione el valor que corresponde a los datos de la placa de características del motor.

• Parámetro. 201 Frecuencia mínima, f_{MIN} **Valor:**

0,0 - f_{MAX} 0,0 Hz

Función:

Mediante este parámetro, puede seleccionarse un límite de frecuencia mínima de motor que corresponda a la velocidad mínima a que puede funcionar este. Si se han seleccionado

Ambos sentidos en el parámetro 200 Rango de frecuencia de salida, la frecuencia mínima no tendrá importancia.

Descripción de opciones:

El valor elegido puede estar entre 0,0 Hz y la frecuencia ajustada en el parámetro 202 Frecuencia máxima, fMAX .

• Parámetro. 202 Frecuencia máxima, fMAX**Valor:**

fMIN - 132/1000 Hz (parám. 200 Rango de frecuencia de salida) 132 Hz

Función:

En este parámetro, puede seleccionarse un límite máximo de frecuencia de salida, que corresponda a la velocidad más alta a que puede funcionar el motor. La frecuencia de salida del convertidor de frecuencia nunca puede tener un valor más alto que 1/10 de la frecuencia de conmutación.

• Parámetro. 206 Tipo de Rampa**Valor:**

Lineal (LINEAL) [0]

Curvado en S (S1) [1]

Forma 2 senoidal (S 2) [2]

Función:

Se puede elegir entre un proceso de rampa lineal, curvado en S o senoidal S2.

Descripción de opciones:

Seleccione el tipo de rampa según el proceso de aceleración/deceleración requerido, para indicar esto se muestra en la Figura 4.3.

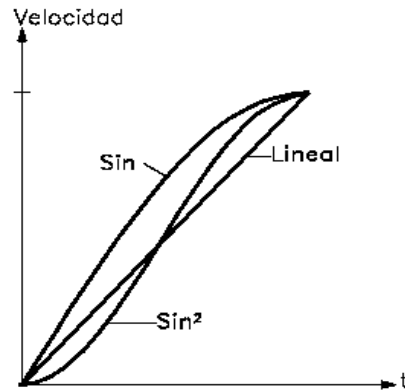


Figura 4.3 Tipos de rampas.

• **Parámetro. 207 Tiempo de rampa de aceleración**

Valor:

0,02 - 3600,00 seg 3,00 seg

Función:

El tiempo de rampa de aceleración es el tiempo que se tarda en acelerar de 0 Hz hasta la frecuencia nominal del motor $f_{M,N}$ (parámetro 104 Frecuencia del motor, $f_{M,N}$). Se asume que la intensidad de salida no alcanza el límite de intensidad (ajustado en el parámetro 221 Límite de intensidad ILIM).

Descripción de opciones:

Ajuste el tiempo de aceleración requerido.

• **Parámetro. 208 Tiempo de rampa de desaceleración**

Valor:

0,02 - 3600,00 seg 3,00 seg

Función:

El tiempo de rampa de desaceleración es el tiempo que se tarda en desacelerar desde la frecuencia nominal del motor $f_{M,N}$ (parámetro 104 Frecuencia del motor, $f_{M,N}$) hasta 0 Hz, siempre que no surja una sobretensión en el inversor debido al funcionamiento regenerativo del motor.

Descripción de opciones:

Ajuste el tiempo de deceleración requerido.

4.2.3 Mensajes de estado

Durante la operación del convertidor de frecuencia, es necesario tener en cuenta algunos mensajes de estado que se puedan presentar en la pantalla.

F r

El convertidor muestra la frecuencia de salida actual en (Hz).

I o

El convertidor muestra la intensidad de salida actual en amperios (A).

U o

El convertidor muestra la tensión de salida actual en voltios (V).

U d

El convertidor muestra la tensión del circuito intermedio en voltios (V).

P o

El convertidor muestra la potencia de salida calculada en kilovatios (kW).

n o t r u n

Este mensaje aparece si se intenta modificar un valor de parámetro mientras el motor está en funcionamiento. Pare el motor si desea cambiar un valor de parámetro.

L C P

Este mensaje aparece si se ha instalado un panel de control LCP 2 y se ha activado la tecla (*QUICK MENU*) o (*CHANGE DATA*). Con un panel LCP 2 instalado, sólo es posible cambiar los parámetros mediante dicho panel.

E r r.

Las advertencias y alarmas se muestran mediante un código de dígitos en la pantalla, por ejemplo, Err 13. Las advertencias se muestran en el pantalla hasta que se ha corregido la falla, y las alarmas destellarán hasta que se active (*RESET*).

4.3 Operación modo remoto del *Driver* VLT-2800

En esta aplicación el convertidor de frecuencia es controlado en forma remota mediante una PC con aplicaciones del *software* MCT-10 perteneciente al grupo Danfoss.

El esquema es basado en el modelo maestro/esclavo, donde el dispositivo maestro es la computadora y el convertidor de frecuencia como elemento esclavo y este último alimentando a un motor de inducción. La Figura 4.4 ilustra esta aplicación.

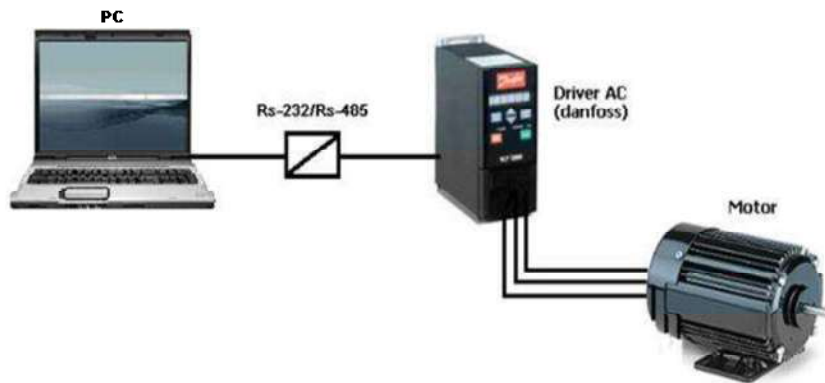


Figura 4.4 Esquema de control del *Driver* mediante la PC.

4.3.1 Elementos utilizados en la interface.

Se puede observar de la Figura 4.4 las herramientas utilizadas en la interface que son; computadora, convertidor Rs232/Rs485, convertidor de frecuencia (VLT-2800) y motor asíncrono.

La comunicación utiliza el puerto serie (Rs-232) de la computadora para comunicarse con el *Driver*, pero este último no soporta la interface RS-232 si no el protocolo Rs-485, por este motivo es necesario un convertidor Rs-232 a Rs-485 para que el convertidor de frecuencia y la computadora trabajen en la misma plataforma y exista un intercambio de información exitoso.

4.3.2 La interface Rs-232

El RS-232 es una interface que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios entre un DTE (Equipo terminal de datos) y un DCE (Equipo de Comunicación de datos). El RS-232 consiste en un conector tipo DB-25 (de 25 pines), aunque es normal encontrar la versión de 9 pines (DE-9), más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos. RS-232 está limitado a conexiones punto a punto entre puertos series y está diseñada para distancias cortas, de hasta 15 metros con velocidades de comunicación bajas, de no más de 20 Kilobytes/segundo. La interface puede trabajar en comunicación asíncrona o síncrona (*half duplex* o *full duplex*).

En un canal simiduplex (*half duplex*) los datos siempre viajarán en una dirección, por ejemplo desde DCE a DTE, los datos pueden viajar en una u otra dirección, pero sólo durante un determinado periodo de tiempo; luego la línea debe ser conmutada antes que los datos puedan viajar en la otra dirección. En un canal duplex (*full duplex*) los datos pueden viajar en ambos sentidos simultáneamente.

4.3.3 La interface Rs-485

RS-485 o también conocido como EIA-485. Es un estándar de comunicaciones en bus de la capa física del Modelo OSI. Está definido como un sistema en bus de transmisión multipunto diferencial, es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias (35 Mbps hasta 10 metros y 100 Kbps en 1,200 metros) y a través de canales ruidosos, ya que reduce los ruidos que aparecen en los voltajes producidos en la línea de transmisión. La inmunidad al ruido y la gran capacidad, hacen que RS-485 sea la conexión serie preferida en aplicaciones industriales que requieren diversos dispositivos distribuidos en red a una PC. El medio físico de transmisión es un par entrelazado que admite hasta 32 estaciones en dos hilos, con una longitud máxima de 1,200 metros operando entre 300 y 19,200 bps. La transmisión diferencial permite múltiples estaciones dando la posibilidad de una configuración multipunto. Al tratarse de un estándar bastante abierto permite muchas diferentes configuraciones y utilizaciones [National 2010].

Desde 2003 está siendo administrado por la *Telecommunications Industry Association* (TIA) y titulado como TIA-485. Se utiliza mucho en la automatización de los edificios pues el cableado simple del bus y la longitud de cable es larga por lo que son ideales para comunicar los dispositivos que se encuentran alejados.

4.3.4 Características del *software* MCT-10 *Set-up*

La computadora empleada como dispositivo maestro, para realizar el control del convertidor de frecuencia, utiliza la aplicación *MCT-10 Set-up software* para la comunicación serie PC-*Driver*. Este *software* es una herramienta diseñada para el manejo, configuración, documentación y monitoreo de la base de datos de una forma rápida y sencilla de los *Drivers* marca Danfoss, facilitando el mantenimiento preventivo al sistema.

Pantalla.

El MCT-10 *Set-up software* es mostrado en tres partes; izquierda, derecha y barra de herramientas.

Barra de herramientas.

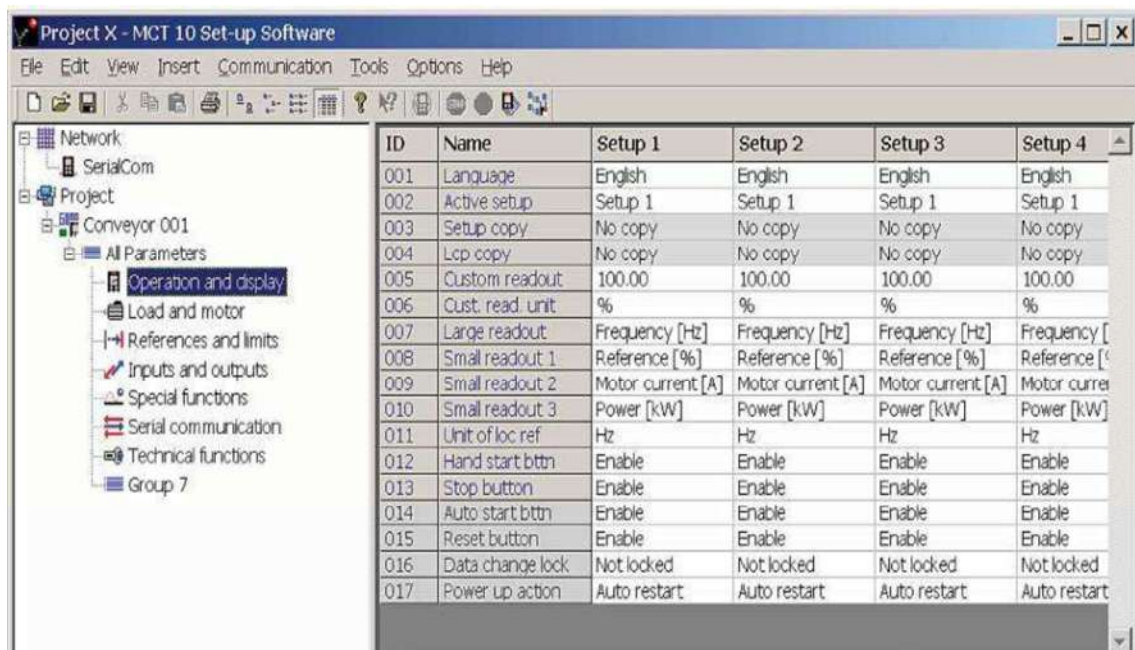
En la barra de herramientas se encuentran los iconos más comúnmente utilizados en el control del proceso.

Parte izquierda

En la parte izquierda nos muestra la red y los proyectos utilizados. En esta parte podemos ver las nuevas carpetas, configurar un proyecto y elementos agregados, también el usuario puede guardar cambios hechos en tiempo real, de esta manera almacenar cambios de la simulación para ser usados posteriormente.

Parte derecha.

La parte derecha muestra detalles de los parámetros seleccionados en la parte izquierda. En esta parte los elementos del convertidor de frecuencia pueden ser programados. En la Figura 4.5 ilustra detalladamente las partes que conforman el *software*. Además se incluyen cuatro tipos de configuraciones distintas, que nos ayudan a manejar diferentes grupos de valores de parámetros para distintos modos de operación de un motor.



The screenshot shows the 'Project X - MCT 10 Set-up Software' window. On the left is a tree view with 'Network' (SerialCom) and 'Project' (Conveyor 001) containing 'All Parameters'. The 'Operation and display' folder is selected. On the right is a table with 17 rows of parameters and 4 columns for Setup 1 through Setup 4.

ID	Name	Setup 1	Setup 2	Setup 3	Setup 4
001	Language	English	English	English	English
002	Active setup	Setup 1	Setup 1	Setup 1	Setup 1
003	Setup copy	No copy	No copy	No copy	No copy
004	Lcp copy	No copy	No copy	No copy	No copy
005	Custom readout	100.00	100.00	100.00	100.00
006	Cust. read. unit	%	%	%	%
007	Large readout	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]	Frequency [Hz]
008	Small readout 1	Reference [%]	Reference [%]	Reference [%]	Reference [%]
009	Small readout 2	Motor current [A]	Motor current [A]	Motor current [A]	Motor current [A]
010	Small readout 3	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]
011	Unit of loc ref	Hz	Hz	Hz	Hz
012	Hand start btn	Enable	Enable	Enable	Enable
013	Stop button	Enable	Enable	Enable	Enable
014	Auto start btn	Enable	Enable	Enable	Enable
015	Reset button	Enable	Enable	Enable	Enable
016	Data change lock	Not locked	Not locked	Not locked	Not locked
017	Power up action	Auto restart	Auto restart	Auto restart	Auto restart

Figura 4.5 Ventana principal del *software* MCT-10 *Set-up*.

4.3.5 Configuración serie

Todos los valores de arranque del puerto serie están puesto para trabajar a una velocidad de 9600 *bauds*, pero pueden también ser configurados a 300, 1200, 4800, 19200, 38400 o 115200 *baud*, como se muestra en la Figura 4.6. La configuración serie es siempre establecida a 8 bits de datos, 1 bit de parada y no paridad.



Figura 4.6 Ventana de configuración serie.

El número de puerto COM debe ser seleccionado apropiadamente de acuerdo al número que le asigna la PC al dispositivo conectado. La velocidad dependerá de las necesidades del dispositivo maestro que se ha conectado.

4.3.6 Configuración de búsqueda de dispositivos

Se puede ingresar un rango para preferencias de búsqueda de un dispositivo en el bus. Esto es posible dando *click* al icono “*scan network*”. El programa emite una solicitud para que los dispositivos esclavos respondan con su dirección individual en el bus, para que después el dispositivo maestro inicie la comunicación, siempre y cuando pertenezca al rango antes establecido.



Figura 4.7 Barra de herramientas *software* MCT-10 *Set-up*.

4.3.7 Modificación de parámetros.

Los parámetros están organizados dentro de grupos funcionales. Un parámetro puede ser modificado simplemente dando doble *click* al parámetro deseado, el resultado es una ventana como la de la Figura 4.8 con las opciones que puede tener ese parámetro, a menos que sea de un valor opcional aparecerá flechas hacia arriba y hacia abajo para colocar el valor deseado.

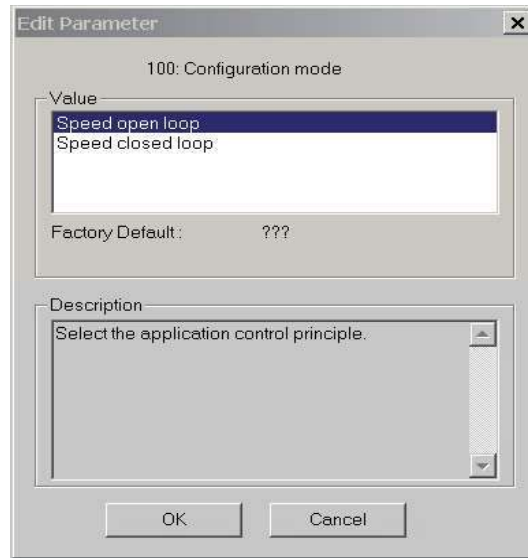


Figura 4.8 Ventana de edición de parámetro *configuration mode*.

Una vez que sabemos editar los parámetros y manejar los pasos antes mencionados que son los principales para realizar la comunicación entre el *Driver* y la PC, es importante también iniciar y detener la lectura de la base de datos del variador de frecuencia que se explica a continuación.

4.3.8 Lectura de parámetros

Para comenzar a leer los parámetros actuales del convertidor de frecuencia basta con dar *click* al icono "*Resume Polling Icon*" en la Figura 4.9 se muestra la barra que lo contiene.

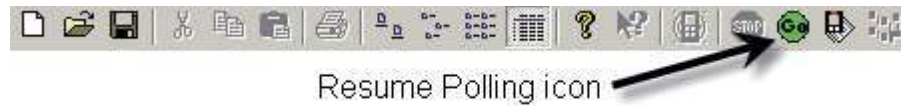


Figura 4.9 Inicio de lectura de parámetros.

La forma de detener la lectura de los parámetros es presionando el icono llamado “*Stop polling icon*”, la Figura 4.10 muestra la barra que contiene este icono. El paro de lectura puede ser por motivos de terminación de sesión o para analizar los valores antes capturados.



Figura 4.10 Paro de lectura de parámetros.

4.4 Conclusiones

Un convertidor de frecuencia rectifica la tensión alterna de la red en una señal continua, luego la tensión continua la convierte en señal alterna de amplitud y frecuencia variable, dependientes de las necesidades requeridas.

De los modos de operación del convertidor de frecuencia mencionados en este capítulo, se deduce que son simples y necesarias para el control de las máquinas de inducción, ya que con el uso de los *Drivers* de CA se obtienen beneficios importantes hacia los motores como; limitar las corrientes elevadas en bajas frecuencias, detecta la falla o falta de fase en la alimentación, entre muchos otros.

El sistema de control en modo remoto para el *Driver* implementado por el *software* MCT-10, tiene la capacidad para poder realizar un monitoreo y diagnóstico a distancias lejanas al sistema en proceso, así como cambios en la configuración de los parámetros de operación del variador de frecuencia. En conjunto con lo anterior, se puede concluir que con la implementación de estas plataformas de modos de operación se puede optimizar el uso, el manejo y la manera de dar servicio técnico a un sistema de control de velocidad de un motor de inducción trifásico.

Capítulo 5

Diseño de la interface y pruebas

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta el *software* construido con el lenguaje de programación gráfico LabVIEW, que permite la comunicación con el variador de frecuencia. También se incluye una explicación del diseño y del funcionamiento del *software* que permite la modificación de los parámetros del variador de frecuencia para el control de velocidad de un motor de inducción jaula de ardilla trifásico. Además se presentan las pruebas y resultados de la aplicación de depresiones de voltaje sobre el sistema rectificador-inversor para poder estudiar los efectos sobre la operación de la máquina de inducción.

5.2 La herramienta de programación LabVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico (lenguaje G), esto quiere decir que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones, a diferencia de la programación basada en las líneas de código para determinar la ejecución de un programa, utiliza programación de flujo de datos, donde el flujo determina la ejecución. Es altamente eficaz para sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control, además nos brinda una capacidad de crear una interface de interacción con el usuario [Lajara 2007].

La palabra LabVIEW viene de las siglas en ingles de: *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*. Este programa fue creado por *National Instruments* en 1976 para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas *Windows*, *UNIX*, *MAC* y *Linux*.

La interface con el usuario es conocida como panel frontal (*Front Panel*), este se construye con una serie de herramientas y objetos. El código se agrega usando una representación gráfica de funciones para controlar los objetos del panel frontal, el diagrama de bloques (*Block Diagram*) contiene la estructura del código. Los programas de LabVIEW son llamados Instrumentos Virtuales VI's porque su apariencia y operación imita un instrumento físico, como osciloscopio y multímetro.

Su principal característica es la facilidad de uso y rapidez para diseñar *software*, válidos para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos del lenguaje. Presenta facilidades para el manejo de Interfaces de comunicaciones: puerto serie, puerto paralelo, GPIB, TCP/IP, *bluetooth*, USB etc. Además cuenta con capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones como; *Multisim*, *.NET*, *ActiveX* y *Matlab/Simulink*. LabVIEW es también usado principalmente por ingenieros y científicos para algunas tareas como:

- Adquisición de datos y análisis matemático
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante
- Automatización industrial y programación de PACs (Controlador de Automatización Programable)

5.2.1 Uso de LabVIEW para la comunicación PC-Driver

En esta sección se muestra y explica el *software* de LabVIEW utilizado para la comunicación con el variador de frecuencia, en la Figura 5.1 muestra el diagrama de bloques utilizado para la interface.

Para la interacción entre la PC y variador de frecuencia, en el presente trabajo se utilizaron las propiedades del protocolo de comunicación industrial Modbus, por medio del puerto serie RS-232 de la computadora, como se mencionó anteriormente es necesario un convertidor RS-232/RS-485 ya que el variador de frecuencia cuenta para comunicación serie sólo con el puerto RS-485.

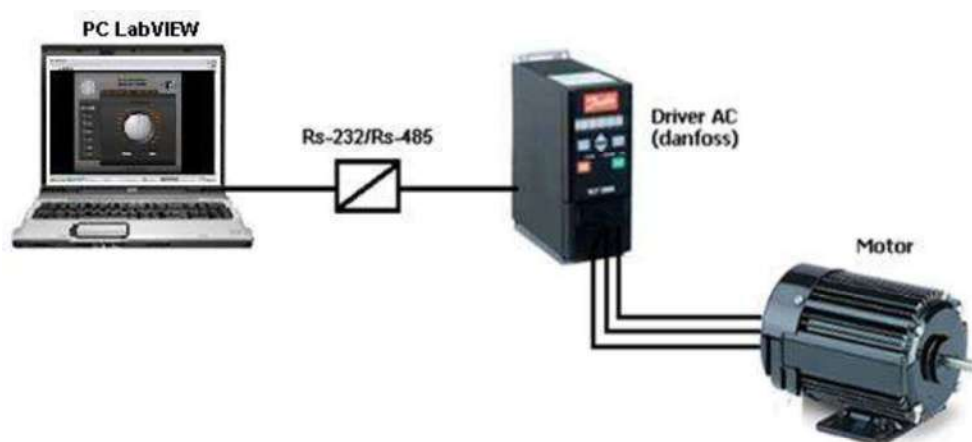


Figura 5.1 Diagrama de bloques de la interface.

La Figura 5.2 muestra el diagrama de bloques completo, usado para la comunicación serie, en el que se pueden observar cuatro secciones de programa más importantes A, B, C y D.

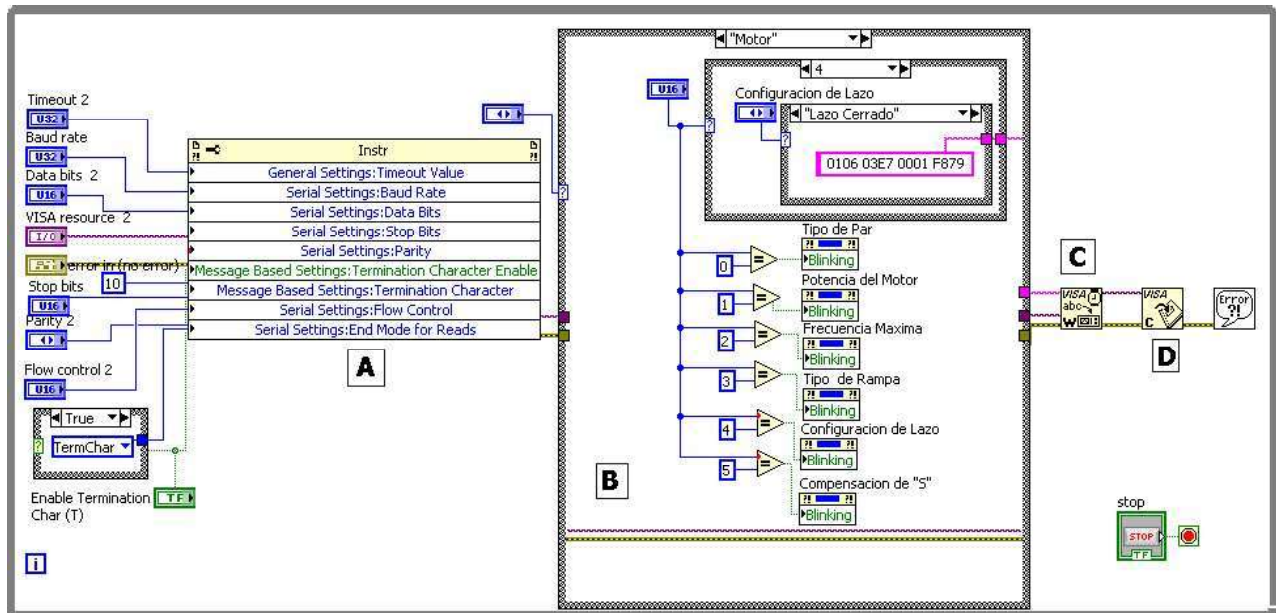


Figura 5.2 Diagrama de bloques del *software*.

La **SECCIÓN “A”**, esta parte del programa es encargada de inicializar el puerto serie, con los valores de los parámetros adecuados correspondientes a la interface serie.

La **SECCIÓN “B”**, esta parte del programa contiene una estructura que almacena seis subestructuras que son; “Arranque/Paro”, “Velocidad”, “Inicio”, “Motor”, “PID” y “Serie”.

El caso “Arranque/Paro”, este utiliza un control booleano, por lo tanto hay dos posibles respuestas (*true*, *false*) una para el inicio del motor y la otra para el paro. Al seleccionar el caso *true* se envía la cadena hexadecimal (010F00000020047C0499193743) correspondiente al comando de arranque del motor, como se indicó en la sección 3.6.2. Al seleccionar el caso *false* se ordena el paro del motor mediante la cadena hexadecimal (010F00000020043C0400008919). La Figura 5.3 muestra el bloque de la estructura para ambos casos.

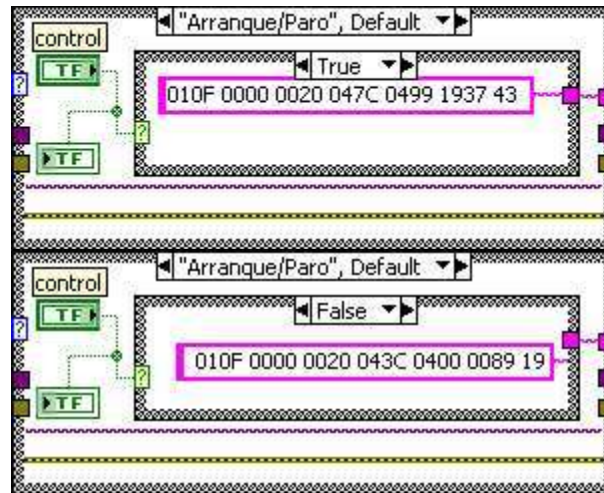


Figura 5.3 Casos de arranque y paro del motor.

El caso “**Velocidad**”, dentro de este hay otra subestructura formada por 60 diferentes casos, correspondientes a la frecuencia del motor de 1hz a 60hz, como sabemos la velocidad es dependiente de la frecuencia suministrada al motor, por lo tanto al modificar la frecuencia elegimos la velocidad. Cada cadena hexadecimal elegida mediante la perilla de control del panel frontal, ordena al variador de frecuencia la velocidad deseada para el motor. Como se muestra en la Figura 5.4.

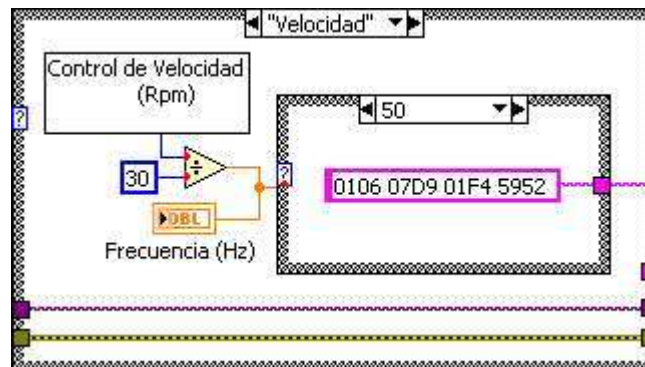


Figura 5.4 Caso de “Velocidad” a 50hz.

El caso “**Inicio**”, incluye un menú con cuatro parámetros a modificar en el variador de frecuencia; Modo de control, Programa Activo, Parada Local y Bloqueo de Parámetros, cada uno de éstos también contiene opciones a modificar; por ejemplo el parámetro Modo de Control muestra dos opciones de funcionamiento del convertidor de frecuencia que son;

Control Local o Remoto, donde el variador se controla con su panel integrado si se elige control local, o de lo contrario si se selecciona control remoto, el variador se puede controlar con la comunicación serie que en este caso sería mediante la PC y aplicaciones de LabVIEW. La Figura 5.5 muestra el caso “Inicio”.

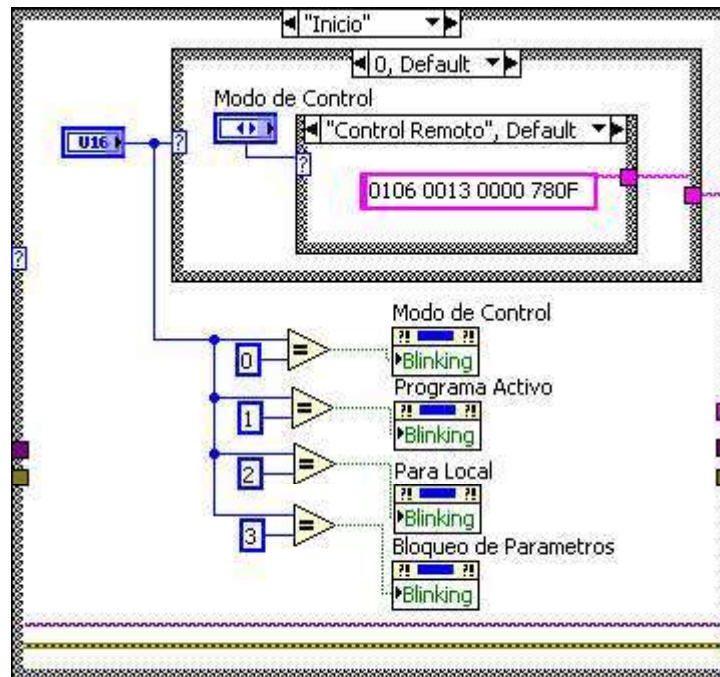


Figura 5.5 Caso “Inicio” y el submenú Modo de Control.

El caso “**Motor**” incluye parámetros relacionados con el funcionamiento del motor, éste caso contiene un menú en el que se pueden modificar los siguientes parámetros; Tipo de Par, Tipo de Rampa, Configuración de Lazo, Potencia del Motor y Compensación de Deslizamiento. Por ejemplo el menú Configuración de Lazo muestra dos opciones que son Lazo Abierto o Cerrado. La Figura 5.6 parte derecha ejemplifica lo mencionado.

En el Caso “**PID**” se agregan los parámetros relacionados con las funciones de las entradas digitales como la terminal 53 y 60 del *Driver*. Además se incluyen controles para modificar valores del controlador PID. Los parámetros que se pueden modificar en este caso son; Ganancia Proporcional PID, Tipo de Regulación, Filtro PID, Escalón Terminal 60 y 53. La Figura 5.6 parte izquierda muestra este caso de la estructura.

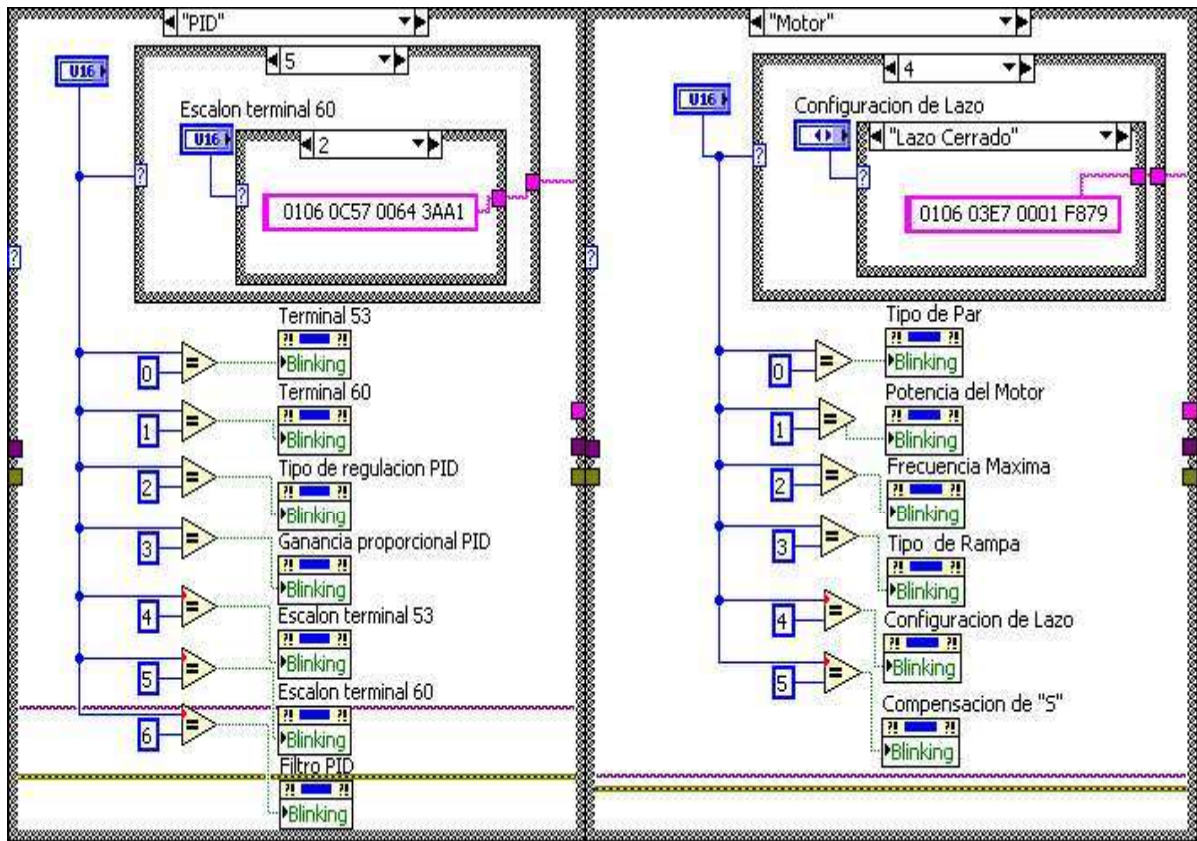


Figura 5.6 Casos "PID" y "Motor" de la estructura general.

El caso "**Serie**" maneja parámetros relacionados con los valores de la comunicación serie y opciones de trabajo con diferentes protocolos así como tipos de telegramas utilizados en la comunicación. Los menús incluidos en este caso son; Protocolo, *Baudrate* y *Timeout*. La Figura 5.7 muestra el caso "serie" y el submenú que selecciona la velocidad de comunicación.

La **SECCIÓN "C"**, contiene la función "*VISA WRITE*" predefinida en LabVIEW que permite la escritura de datos hacia el puerto serie.

La **SECCIÓN “D”**, es el complemento de la sección “C” necesaria cuando se trabaja con el protocolo de comunicación serie, la cual cierra el puerto serie cuando se ha terminado la escritura de cada cadena de caracteres, además mostrará un mensaje de error si se produjo alguno durante el proceso.

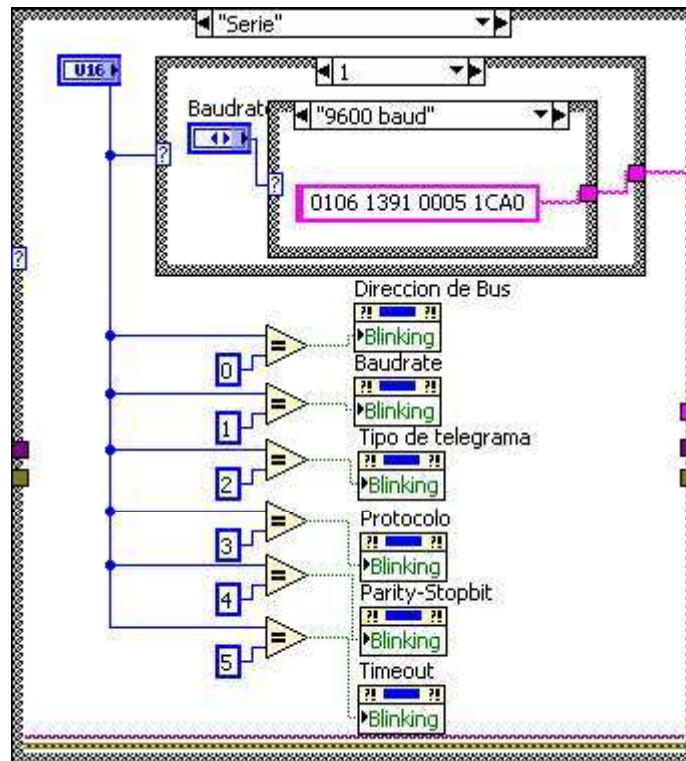


Figura 5.7 Caso “Serie” de la estructura general.

En la Figura 5.8 muestra la interface con el usuario (*Front Panel*) del *software* de control, dentro del cual se distinguen los controles para el control de velocidad del motor y los valores para iniciar cesión con el puerto serie los cuales son; *timeout* 100, *baudrate* 9600, *databits* 8, *parity* none, *flow control* none y *stopbits* 1. Además se pueden ver las “pestañas” correspondientes a cada caso (Arranque/Paro, Velocidad, Inicio, Motor, PID y Serie) dentro de las cuales se puede modificar los parámetros propios para cada estructura.



Figura 5.8 Panel Frontal del *software* de control.

5.3 Pruebas y efectos de depresiones de voltaje

En esta sección se presenta las pruebas implementadas físicamente y resultados de los efectos de depresiones de voltaje en la operación de una máquina de inducción real con un sistema rectificador-inversor (*Driver*) para el control de velocidad.

Debido al incremento continuo de equipos electrónicos y su sensibilidad a las fluctuaciones de tensión, así como las perturbaciones de distorsión de la red debido a las cargas no lineales; se han generado ciertas perturbaciones en las señales de voltaje y corriente, que es lo que se define como fenómenos asociados a la calidad de potencia, tales como; *sags*, *swells*, armónicos y transitorios. La aparición de estos fenómenos ha hecho que surjan ciertos riesgos para los usuarios de las redes eléctricas tales como el daño de equipos, caída de base de datos y otros problemas que representan pérdidas millonarias.

Entre las perturbaciones más frecuentes que pueden aparecer en la red eléctrica y que tienen efectos sobre los equipos y dispositivos del sistema que destacan por ser más frecuentes son las depresiones de tensión (*sags*) y subidas de tensión (*swells*). En particular, las depresiones de voltaje, pueden tener efectos perjudiciales sobre los variadores de velocidad, las máquinas eléctricas, las fuentes interrumpidas de potencia, los sistemas de iluminación y otras cargas, o producir la actuación indebida de los dispositivos de protección del sistema o acciones erráticas de los sistemas de control. Un *sag* de voltaje es la reducción de corta duración en el voltaje rms de alimentación [IEEE 2000]. Según el estándar IEEE 1159, es la reducción del valor eficaz de la tensión entre el 10% y 90% de su valor nominal, durante 0.5 ciclos a 3600 ciclos [IEEE 1995]. En la Figura 5.9, se ilustra la onda de tensión de un *sag*.

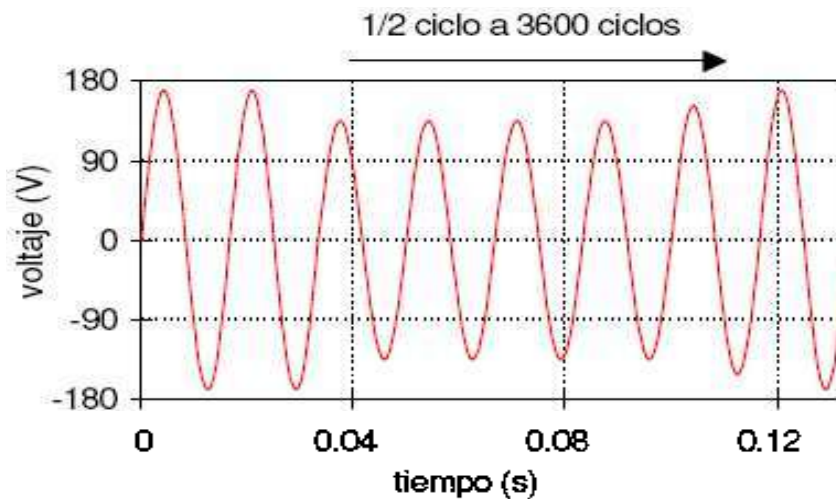


Figura 5.9 Onda de voltaje de un *sag*.

En la Figura 5.10 se muestra el esquema utilizado para realizar las pruebas de laboratorio, similar al de la Figura 5.1 pero ahora se omitió la parte de la PC y del convertidor RS-232/RS485 por un arreglo de resistencias e interruptores que nos permitirán producir perturbación eléctrica *sag* necesaria para el estudio del comportamiento del sistema.

El objetivo de la prueba de laboratorio es observar el comportamiento de la máquina de inducción ante *sags* de voltaje, para generar dichos *sags* en la red eléctrica se utilizan tres interruptores sincronizados con un PLC Siemens Logo-230RC que abren y cierran el

circuito por un tiempo corto determinado, los tres a un mismo tiempo. Como se observa en la Figura 5.10 cuando los interruptores están abiertos hay una caída de voltaje en las resistencias y por lo tanto una reducción en el voltaje de alimentación al *Driver*, este cambio afecta directamente a la velocidad nominal de operación de la máquina de inducción. Cuando los interruptores se encuentran cerrados, no existe ninguna falla, entonces el sistema se encuentra operando en condiciones normales.



Figura 5.10 Diagrama esquemático utilizado para realizar las pruebas.

La Tabla 5.1 muestra los parámetros de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla, con la que se realizan las pruebas al sistema, que corresponde a una máquina de inducción del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica [Suárez 2009].

Para el desarrollo de la prueba es necesario acoplar a la máquina de inducción una carga cuyas características se muestran en la Tabla 5.2, de acuerdo a la fuente [Suárez 2009].

El *Driver* fue configurado para suministrar al motor de inducción, con los valores de los parámetros correspondientes a la Tabla 5.1 que son los datos nominales de operación del motor.

Tabla 5.1 Parámetros de la máquina de inducción real.

Parámetro	Simbología	Magnitud
Potencia nominal	P_n	2000W
Voltaje (entre líneas)	V	220V
Frecuencia	f	60Hz
Numero de polos	P	4
Resistencia del estator	R_s	0.8Ω
Resistencia del rotor	R_r'	0.1978Ω
Inductancia del estator	L_{ls}'	3.1266E-3H
Inductancia del rotor	L_{lr}'	2.9162E-3H
Inductancia mutua	L_m	67.7267E-3H

Tabla 5.2 Parámetros del sistema mecánico acoplado a la máquina de inducción.

Parámetro	Parámetro	Magnitud
Coefficiente de amortiguamiento	D	3.285E-3Nms/Rad
Momento de inercia	J	0.1651Kgm ²
Velocidad angular inicial	W	186.5Rad/Seg
Par de carga	T	-10Nm

Es importante mencionar que una prueba inicial efectuada durante el desarrollo de la tesis fue realizada con la máquina de inducción en vacío, observando que no hay variación de velocidad ante las diferentes duraciones de los *sags*.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las depresiones de voltaje, con una profundidad de 80%, duración variable y con carga nominal.

La Figura 5.11 muestra la velocidad del motor de inducción sometido a una depresión de voltaje de 80% de duración de 12 ciclos con el motor a una frecuencia de 60Hz. Se observa una disminución de velocidad a partir del instante que ocurre el *sag*.

La Figura 5.12 muestra el efecto de la depresión de voltaje de 80% con duración de 12 ciclos sobre la corriente de la fase *a* que alimenta al motor, donde se observa que se presentan sobrecorrientes que pueden ocasionar algún daño a la máquina de inducción, ya

que se registraron valores pico de aproximadamente 30 A.

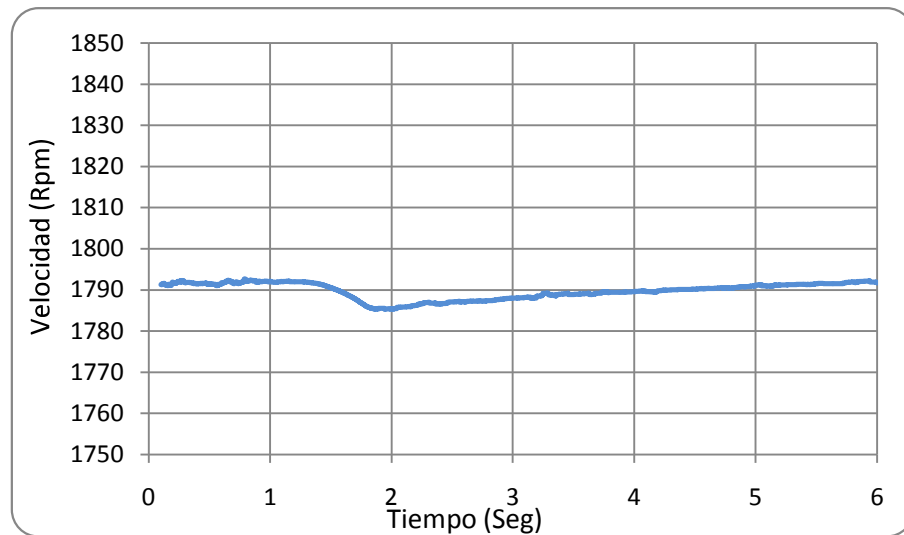


Figura 5.11 Curva de velocidad del motor con un tiempo de depresión de 12 ciclos.

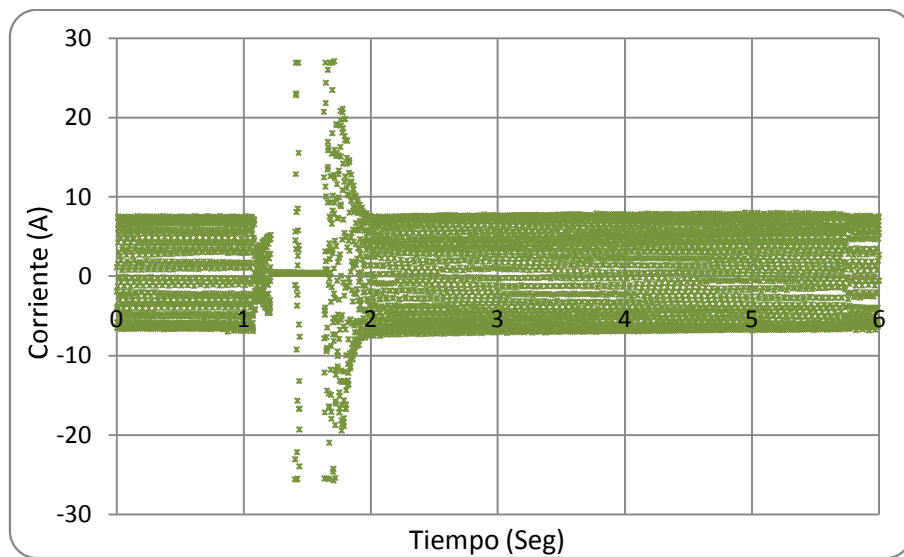


Figura 5.12 Corriente de la fase a que alimenta al motor de inducción durante la depresión de 12 ciclos.

La Figura 5.13 ilustra la velocidad del motor con una depresión de voltaje de 80% y duración de 30 ciclos. Se observa también de esta figura comparada con la Figura 5.11, que no cambia demasiado la respuesta de la velocidad de máquina ya que es una diferencia de 0.3 segundos.

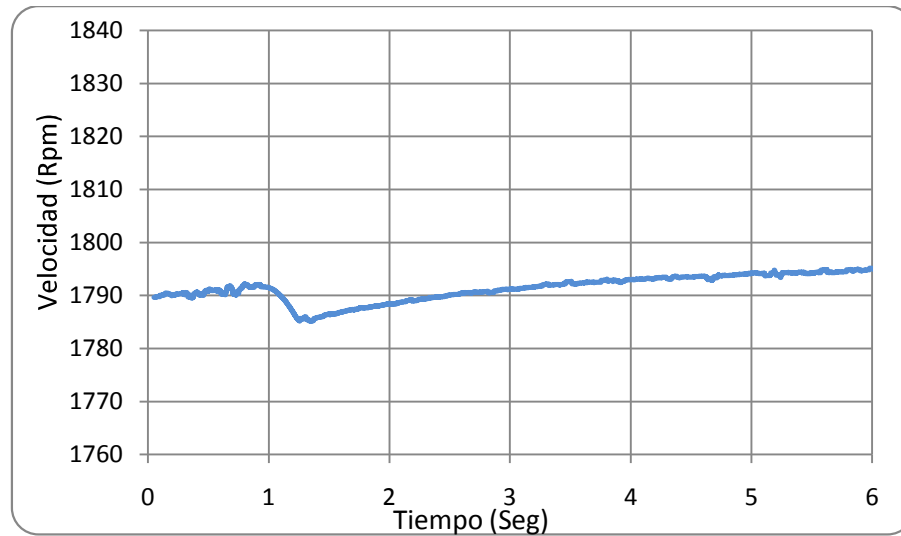


Figura 5.13 Velocidad del motor bajo una depresión de 80% durante 30 ciclos.

La Figura 5.14 muestra la respuesta de la velocidad de la máquina de inducción bajo una depresión de voltaje de 80% con una duración de 60 ciclos, nos ilustra también una disminución un poco más clara y considerable de velocidad, aproximadamente 1490 rpm ya que se aumentó al doble la duración del *sag*.

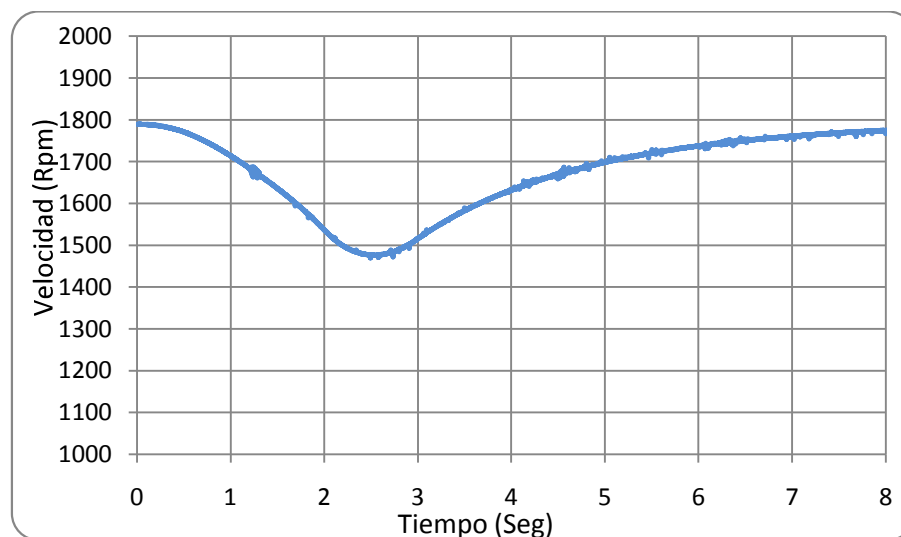


Figura 5.14 Velocidad del motor con una duración de depresión de 60 ciclos.

La Figura 5.15 ilustra la velocidad de la máquina de inducción cuando se aplica una depresión de voltaje de 80% con duración de 120 ciclos, además se distingue si la comparamos con la Figura 5.14 que en este tiempo un poco más grande de *sag* la velocidad

de la máquina se reduce aproximadamente 1420 rpm.

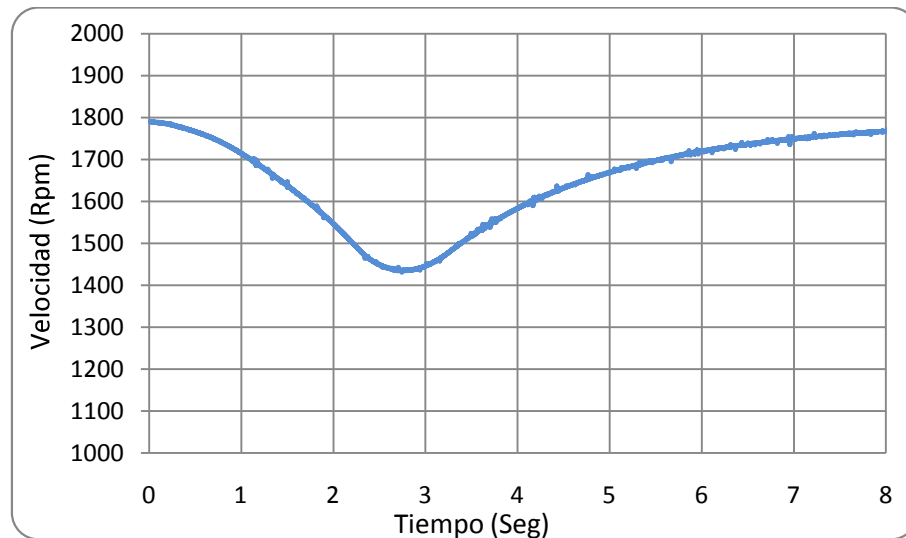


Figura 5.15 Velocidad del motor de inducción con un *sag* de 120 ciclos.

La Figura 5.16 nos muestra la curva de velocidad del motor de inducción cuando está sometido a un *sag* de duración de 180 ciclos y 80% de profundidad.

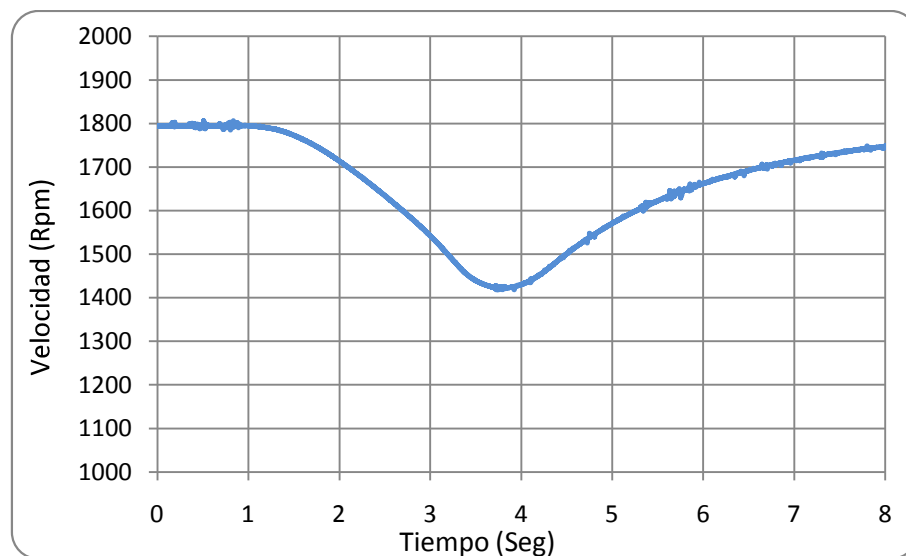


Figura 5.16 Velocidad del motor con un *sag* de 80% y 180 ciclos de duración.

La Figura 5.17 nos muestra la velocidad de motor de inducción bajo a una depresión de voltaje de 80% con duración de 240 ciclos. De igual manera la Figura 5.18 muestra la

corriente de la fase *a* que alimenta al motor cuando el sometido a una depresión de 80% con duración de 240 ciclos.

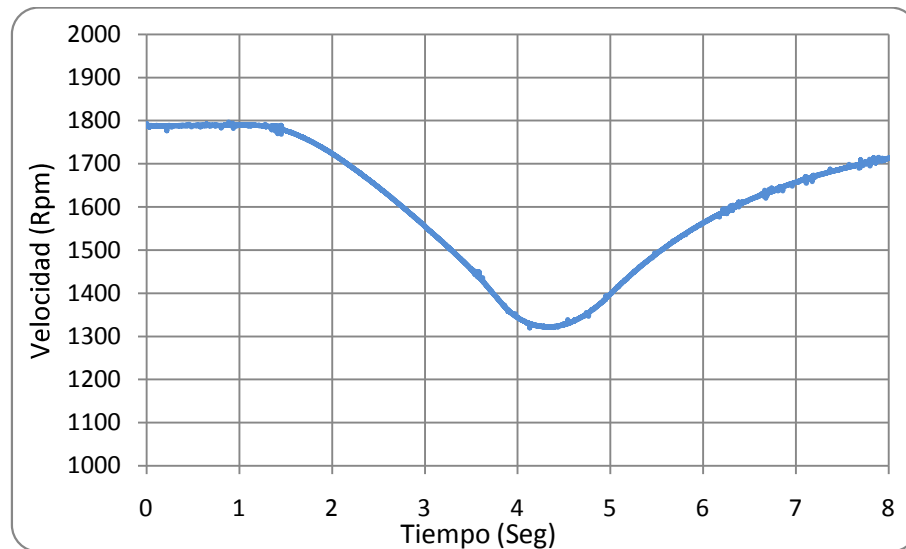


Figura 5.17 Velocidad del motor de inducción con un *sag* de 80% y duración 240 ciclos.

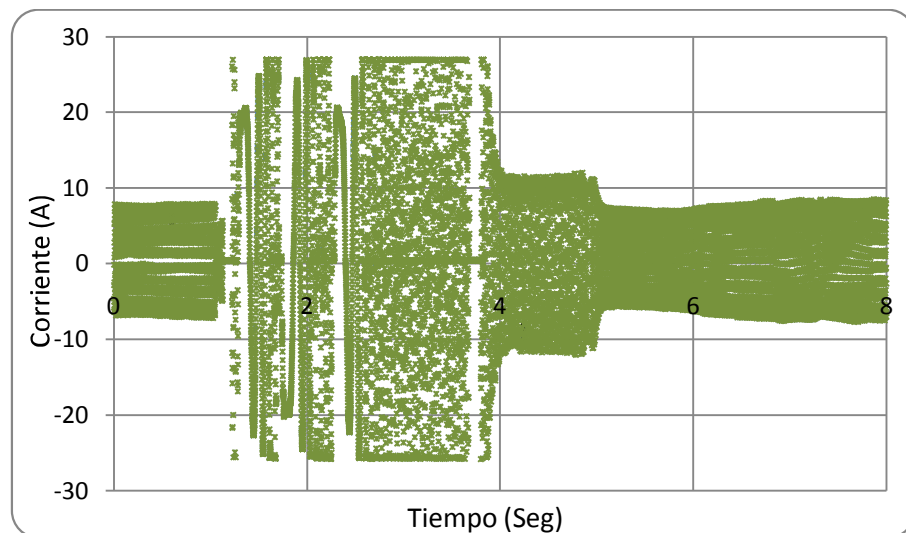


Figura 5.18 Corriente de la fase *a* que alimenta al motor de inducción durante la depresión de 240 ciclos.

La Figura 5.19 muestra la curva de la velocidad del motor cuando se aplica una depresión con profundidad 80% y duración de 300 ciclos. Se puede observar que bajo estas circunstancias de falla severa el motor de inducción no se recupera e interrumpe su

funcionamiento hasta llegar a una velocidad de 0 rpm.

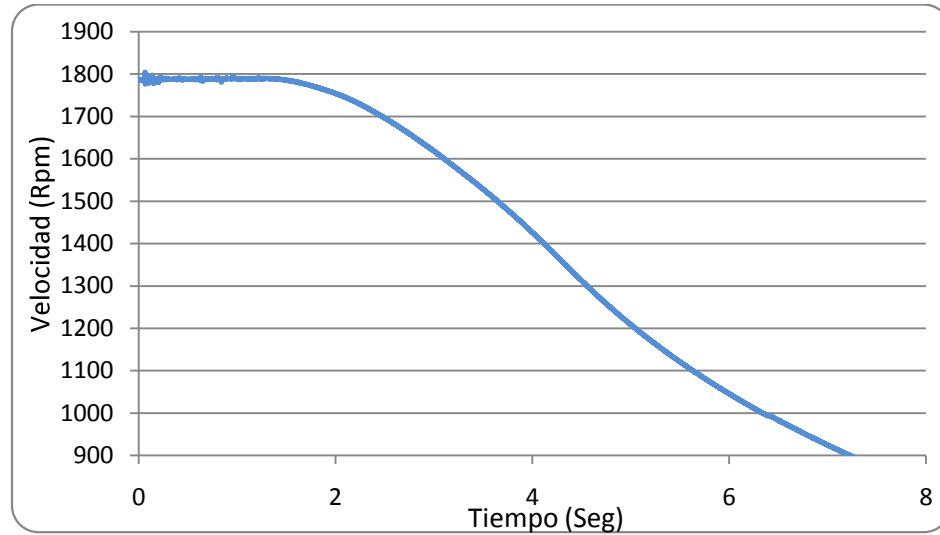


Figura 5.19 Velocidad del motor de inducción con un *sag* de 80% y duración de 300 ciclos.

5.4 Conclusiones

Mediante el uso de la interface creada con el entorno del lenguaje de programación gráfico LabVIEW, se obtiene ventajas importantes sobre la comunicación entre la PC y la base de datos del *Driver*. Algunas de las mejoras de la interface son; se reduce el tiempo entre las aplicaciones sobre la configuración de los parámetros del variador de frecuencia, se mejora la flexibilidad al sistema permitiendo cambios y actualizaciones en tiempo real, no es necesario tener gran conocimiento en la programación ya que el *software* desarrollado es muy fácil e intuitivo para su operación.

El efecto de los *sags* en máquinas de inducción dependerá de su duración, magnitud y distancia donde ocurrió la falla en el sistema de distribución. Durante las pruebas realizadas se aplicaron *sags* con diferente duración, donde se observa que existe una pérdida de velocidad de la máquina de inducción durante la falla, además de una elevación en la magnitud de la corriente durante la depresión de voltaje.

Capítulo 6

Conclusiones generales y trabajos futuros

6.1 Conclusiones generales

El software diseñado que se presenta en este trabajo bajo el entorno del lenguaje de programación LabVIEW para comunicación con el *Driver*, permite la modificación de la base de datos del variador de frecuencia para así poder controlar la velocidad y otros parámetros de operación de la máquina de inducción. Si bien se pueden modificar desde los controles propios de su panel frontal, la ventaja de este software es que crea una interfaz mucho más fácil y amigable de manejar por cualquier usuario sin la necesidad de tener un amplio conocimiento en la programación. Reduce también considerablemente el tiempo entre la comunicación PC-*Driver* del sistema, permite además realizar el control del sistema en áreas distintas a la planta, gracias a que proporciona comunicación a distancias lejanas entre el dispositivo maestro y los esclavos, permitiendo así seguridad al personal de operación.

Las depresiones de voltaje son un problema de gran importancia que afecta la economía de las industrias debido a que provocan un funcionamiento inadecuado del sistema, incluso la interrupción temporal del funcionamiento de maquinaria eléctrica de gran potencia que se traduce en pérdidas de tiempo, producción, daños al equipo y hasta daños físicos al personal. Por este motivo es de gran interés conocer la respuesta de la máquina de inducción bajo efectos de disturbios presentes en la red eléctrica, para poder así hacerles frente planteando estrategias que permitan minimizar las consecuencias.

Se aplicaron *sags* de voltaje con la misma profundidad y distinta duración al sistema en estudio, permitiendo observar los efectos producidos de pérdida de velocidad en el motor, dependiendo la duración del *sag* así es la caída de velocidad, es decir, entre más largo es el tiempo de la depresión de voltaje, mayor es la caída de velocidad de la máquina. Además se observó que estas fallas producen picos de intensidad en el inicio y fin de la falla que pueden producir daños físicos en el motor de inducción o bien, en la disminución de su vida útil.

Los resultados de los pruebas de depresiones de voltaje presentados en esta Tesis fueron comparados con estudios semejantes reportados en la Tesis “Estudio del efecto de depresiones de voltaje en máquinas de inducción y en su control de velocidad de frecuencia variable” donde se observaron resultados satisfactorios a los conseguidos previamente en simulación.

6.2 Trabajos futuros

El trabajo realizado en la presente tesis sirve de base para desarrollar trabajos futuros que puede culminar en proyectos de tesis basados en alguno de los siguientes temas:

- Integrando sensores y circuitos de acondicionamiento de señal para operar en modo de lazo cerrado el *Driver*.
- Desarrollar esquemas para el funcionamiento con un control PID para *Driver*.
- Monitoreo, documentación y análisis de los parámetros en motores de inducción de un sistema industrial.
- Diagnóstico y prevención de fallas en la operación de motores de inducción.

Referencias

- [Chapman 2005] Chapman Stephen. “*Máquinas eléctricas*”. McGrawHill, 2005.
- [Cowie 2001] Cowie, Charles J. “*Adjustable Frequency Drive Application Training*”, 2001.
- [Crosby 1914] F. B. Crosby, “*Speed control of polyphase motors*”, *General Elect. Rev.*, vol. 17, pp. 589–599, 1914.
- [Danfoss 2009] Danfoss. Frequency Converters. Estados Unidos. Diciembre 2009. <http://www.danfoss.com>
- [Fraile 2008] Fraile Mora Jesus. “*Máquinas Eléctricas*”. McGraw-Hill, 2008.
- [IEEE 1995] IEEE std 1564, 1995. *IEEE “Voltage Sags indices”*.
- [IEEE 1996] B.K. Bose. “*Power Electronics and Variable Frequency Drives. Technology and Applications*”. IEEE Press, ISBN 0-7803-1084-5, 1996.
- [IEEE 2000] M. H. J BOLLEN “*Understanding power quality problems. Voltage Sags and Interruptions*”, IEEE PRESS. New York, 2000.
- [Laithwaite 1964] E. R. Laithwaite, “*Electrical variable-speed drives*”, *Eng. Dig.*, vol. 25, no. 10, pp. 115–164, Oct. 1964.

- [Lajara 2007] José Rafael Lajara Vizcaíno “*LabVIEW. Entorno gráfico de programación*” Marcombos S.A. 2007
- [National 2010] National Semiconductor. Interface Standards. Estados Unidos. Enero 2010. <http://www.national.com>
- [NI 2009] National Instruments. NI Modbus. Estados Unidos. Octubre 2009. <http://zone.ni.com>
- [Maier 1911] G. A. Maier, “*Methods of varying the speed of alternating-current motors*” *AIEE Trans.* Dec. 1911.
- [Modbus 2009] Modbus. CRC-Calculation. Estados Unidos. Septiembre 2009. www.lammertbries.nl/comm/info/crc-calculation.html
- [Modbustools 2009] Modbustools. Protocol Description. Estados Unidos. 2009 Septiembre 2009. <http://www.modbustools.com>
- [Odva 2010] Odva. DeviceNet Technology. Estados Unidos. Enero 2010. <http://www.odva.org>
- [Phipps. 1997] Phipps, Clarence A. “*Variable Speed Drive Fundamentals*”. The Fairmont Press, Inc. 1997.
- [Profibus 2009] Profibus. Profibus One Fieldbus. Estados Unidos. Octubre de 2009. <http://www.profibus.com>
- [Rissik 1935] H. Rissik, “*Mercury-Arc Current Convertors*”. London, U.K.: Pitman, 1935.

- [Spitzer 1990] Spitzer, David W. “*Variable Speed Drives*”. Instrument Society of America. 1990.
- [Shepherd 1996] W. Shepherd. And L Hulley. “*Power Electronics and motor control*”. Cambridge University Press. 1996.
- [Siemens 1997] Siemens, Simatic Net. Redes de Comunicaciones Industriales Catálogo IK 10, 1997.
- [Suárez 2009] Suárez Duarte J. César. “*Estudio del efecto de depresiones de voltaje en máquinas de inducción y en su control de velocidad de frecuencia variable*”. Morelia Mich. Julio 2009.
- [White 1944] W. C. White, “*Mercury-arc rectifier*” *General Elect. Rev.*, vol. 47, pp. 9–13, June 1944.