



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO
MICROCONTROLADOR PIC®18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD
DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP**

Allan Javier Hernández Yela

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO
MICROCONTROLADOR PIC®18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD
DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALLAN JAVIER HERNÁNDEZ YELA

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PIC®18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de 5 agosto de 2013.



Allan Javier Hernández Yela

Guatemala, 11 de febrero de 2014.

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Guzmán:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PIC@18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP", desarrollado por el estudiante Allan Javier Hernández Yela con carné No. 2009-15055, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRONICO
COL. # 5898



Ref. EIME 07 2014
Guatemala, 12 de febrero 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO
UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PIC®18F4520 PARA
VARIAR LA VELOCIDAD DE MOTORES AC TRIFÁSICOS
SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP, del estudiante Allan Javier Hernández
Yela, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Area Electrónica



SRO



REF. EIME 07. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ALLAN JAVIER HERNÁNDEZ YELA titulado: DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PIC®18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 26 DE FEBRERO 2,014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PIC® 18F4520 PARA VARIAR LA VELOCIDAD DE MOTORES AC TRIFÁSICOS SÍNCRONOS DE 1 A 5 HP**, presentado por el estudiante universitario: **Allan Javier Hernández Yela**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, marzo de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el creador de todo lo que existe y ser la fuente de toda ciencia y conocimiento. Por su infinito amor logro alcanzar esta meta.
María Auxiliadora de los Cristianos	Por ser mi madre en el cielo, cuidarme siempre y ser causa de alegría e inspiración.
San Juan Bosco	Por la educación que recibí según sus enseñanzas y su constante manifestación durante la etapa universitaria.
Mi padre	Roberto Hernández Chávez, por todo el apoyo incondicional y exigencias que me hacen ser un profesional con excelencia.
Mi madre	Clara Luz Yela Reyes de Hernández, por sus atenciones, detalles y amor durante toda mi vida.
Mis hermanos	Diana, Ivette Sucelly y Roberto Hernández Yela, por la cálida compañía durante mi vida, por su apoyo y motivación durante mis etapas de estudio.

Mis sobrinos

Paula del Carmen y Diana María Mendoza Hernández, Juan Pablo y José Gabriel Rosales Hernández, por alegrar mi vida y ser motivación para continuar esforzándome.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de pertenecer a la casa de estudios superiores más prestigiosa.
Facultad de Ingeniería	Por la educación profesional, trabajo, experiencias y buenos momentos vividos en las aulas, laboratorios y demás áreas.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	A su director, catedráticos y auxiliares, por el conocimiento y experiencia profesional compartida, especialmente al Ing. Guillermo Puente e Ing. Carlos Guzmán.
Departamento de Física	A los catedráticos y auxiliares que me dieron su confianza para poder trabajar con ellos.
Mis amigos y compañeros	Por las veces que estudiamos, realizamos proyectos y compartimos buenos momentos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. FUNDAMENTOS DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS Y LOS CONTROLADORES ELECTRÓNICOS.....	1
1.1. Motores eléctricos trifásicos: fundamentos.....	1
1.1.1. Principios de operación de los motores eléctricos trifásicos	2
1.1.2. Partes de los motores eléctricos trifásicos.....	3
1.1.3. Motores eléctricos trifásicos síncronos	4
1.2. Controladores electrónicos: fundamentos	5
1.2.1. Variador de frecuencia.....	6
1.2.2. Tipos de variador de frecuencia.....	8
1.2.2.1. Onduladores o inversores.....	8
1.2.2.2. Cicloconvertidores	8
1.2.3. Funciones del variador de frecuencia	9
1.2.4. Aplicaciones.....	10
2. FUNDAMENTOS DE CICLOCONVERTIDORES Y LA UTILIZACIÓN COMO VARIADORES DE FRECUENCIA.....	11
2.1. Cicloconvertidores: generalidades.....	11

2.2.	Tipos y aplicaciones de cicloconvertidores		12
2.2.1.	Monofásico a monofásico.....		13
2.2.2.	Trifásico a monofásico.....		14
2.2.3.	Trifásico a trifásico		16
2.3.	Cicloconvertidor a utilizar como solución		17
2.4.	Unidad de control electrónico: microcontrolador		18
2.4.1.	Fundamentos del microcontrolador		19
2.4.2.	Utilización del microcontrolador como elemento de regulación electrónico.....		21
3.	DISEÑO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO.....		23
3.1.	Cicloconvertidor: trifásico a trifásico de media onda		23
3.1.1.	Dispositivos utilizados en el cicloconvertidor.....		24
3.1.2.	Diseño y análisis teórico del cicloconvertidor		27
3.2.	Sistema de adquisición de datos.....		29
3.2.1.	Dispositivos utilizados		30
3.2.2.	Diseño y análisis del transductor.....		32
3.3.	Diseño de la unidad de control y procesamiento de datos		34
3.3.1.	Microcontrolador PIC®18F4520: descripción.....		35
3.3.2.	Dispositivos utilizados		37
3.3.3.	Diseño y análisis del circuito de control y procesamiento de datos		39
3.4.	Programación del software del microcontrolador		44
3.4.1.	Lenguaje C: descripción.....		45
3.4.1.1.	Entorno de programación: MikroC® IDE		46
3.4.2.	Estructura de programa para el variador de frecuencia.....		47

4.	COMPARACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA DISEÑADO CON LOS EXISTENTES EN EL MERCADO ACTUAL DE GUATEMALA	51
4.1.	Variadores de frecuencia comerciales: descripción, marcas y características.....	52
4.2.	Comparación y análisis de características y precios de los variadores de frecuencia comerciales con el de bajo costo.....	54
4.3.	Ventajas y desventajas del variador de frecuencia de bajo costo.....	56
4.3.1.	Análisis de la eficiencia y ahorro energético al utilizar un variador de frecuencia	58
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	ANEXOS	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama trifásico fuente alterna trifásica	2
2.	Tipos de construcción de motores trifásicos síncronos	5
3.	Diagrama de bloques del variador de frecuencia	7
4.	Diagrama de bloques del cicloconvertidor.....	12
5.	Cicloconvertidor $1\phi - 1\phi$	14
6.	Cicloconvertidor $3\phi - 1\phi$: media onda.....	15
7.	Cicloconvertidor $3\phi - 1\phi$: puente.....	15
8.	Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$: media onda.....	16
9.	Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$: puente.....	17
10.	Diagrama de bloques general del microcontrolador	20
11.	Diagrama de sistema de control digital	21
12.	Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$ de media onda: solución.....	24
13.	Símbolo del SCR y construcción básica.....	25
14.	Cicloconvertidor trifásico a monofásico de media onda	27
15.	Voltaje de salida del cicloconvertidor	29
16.	Amplificador operacional	31
17.	Transductor de señal de entrada al microcontrolador	33
18.	Señal de salida del transductor	34
19.	Distribución de pines microcontrolador PIC®18F4520.....	35
20.	Interfaz microcontrolador y convertidor de ciclo positivo	40
21.	Interfaz microcontrolador y convertidor de ciclo negativo.....	40
22.	Interfaz usuario y microcontrolador: LCD.....	41
23.	Interfaz usuario y microcontrolador: pulsadores.....	42

24.	Conexión del PIC®18F4520 con dispositivos externos	43
25.	Estructura de programa para variador de frecuencia.....	48
26.	Gráfica de ejemplo de eficiencia y ahorro energético	58

TABLAS

I.	Resumen de características de memoria del PIC®18F4520	36
II.	Costos de variadores de frecuencia comerciales.....	54
III.	Detalle de precios del variador de frecuencia propuesto	55
IV.	Costos de operación anual del ventilador	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
HP	Caballos de fuerza
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
\$	Dólar estadounidense
<i>f</i>	Frecuencia
Hz	Hertz
kWh	Kilo Watt Hora
®	Marca registrada
Ω	Ohm
1φ	Onda monofásica
3φ	Onda trifásica
p	Polo
ω	Velocidad angular
V	Volt
W	Watt

GLOSARIO

ADC	Convertidor analógico a digital, circuito encargado de realizar la conversión de una señal analógica en una señal digital.
ALU	Unidad aritmético lógica, circuito digital que calcula operaciones aritméticas y lógicas entre dos números.
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, organización sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.
<i>Chopper</i>	Circuito electrónico que se usa para interrumpir una señal bajo el control de otra por medio de dispositivos de estado sólido.
Cicloconvertidor	Es un dispositivo que convierte un voltaje AC, como el suministro de conducto principal, a otro voltaje AC de voltaje y frecuencia diferentes.
CPU	Unidad Central de Procesamiento. Componente principal del microcontrolador que interpreta las instrucciones contenidas en los programas y procesa los datos

EEPROM	Memoria de sólo lectura programable y eléctricamente borrrable.
FET	Transistor de efecto de campo que se basa en el campo eléctrico para controlar la conductividad de un material semiconductor.
GTO	Interruptor de apagado por puerta. Dispositivo de estado sólido utilizado en electrónica de potencia que puede ser encendido por un solo pulso de corriente positiva en la terminal puerta y puede ser apagado al aplicar un pulso de corriente negativa en el mismo terminal.
IDE	Entorno de desarrollo integrado. Es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación que incluye un editor de código, un compilador y un depurador.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional. Es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada. Es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Impedancia	Es la medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica un voltaje en corriente alterna. Posee magnitud y fase.
LCD	Pantalla de cristal líquido. Es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora.
LED	Diodo emisor de luz. Es un dispositivo semiconductor formado de dos terminales que posee la característica de emitir luz en la unión PN al ser polarizado directamente. La longitud de onda depende del dopado del mismo.
Memoria <i>flash</i>	Tipo de memoria derivada de la EEPROM que permite la lectura y escritura de múltiples posiciones de memoria en la misma operación.
Microcontrolador	Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en la memoria. Posee en el interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida. Se utiliza para aplicaciones específicas.

Microprocesador	Es el circuito integrado central y más complejo de un sistema informático; el encargado de ejecutar instrucciones programadas en lenguaje de bajo nivel, realizando operaciones aritméticas y lógicas simples, tales como sumar, restar, multiplicar, dividir, las lógicas binarias y accesos a memoria.
MIPS	Millones de instrucciones por segundo. Es una forma de medir y expresar la potencia y velocidad de los procesadores.
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor. Es utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.
Optoacoplador	Es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. Se suelen utilizar para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles, ya que la conexión es óptica.
PDIP	Encapsulado plástico de doble línea. Se utiliza comúnmente para encapsular circuitos integrados. La forma consiste en un bloque con dos hileras paralelas de pines, la cantidad de éstos depende del circuito que encierran.

PIC	Controlador de Interfaz Periférico. Son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc.
Piezoeléctrico	Es un material (cristal) que presenta el fenómeno que al ser sometido a tensiones mecánicas adquiere una polarización eléctrica en la masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en la superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa.
PWM	Modulación de ancho de pulso. Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.
Rectificador	Circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Esto se realiza utilizando diodos rectificadores, ya sean semiconductores de estado sólido controlados o no controlados.
SAD	Sistema de adquisición de datos. Es el conjunto de dispositivos utilizado como interfaz para recolectar información de una onda de voltaje y que sea interpretada por un microcontrolador.

SCR	Rectificador controlado de silicio. Es un tipo de tiristor formado por cuatro capas de material semiconductor con estructura PNPN o bien NPNP.
Semiconductor	Es un elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.
Tiristor	Es un componente electrónico constituido por elementos semiconductores que utiliza realimentación interna para producir una conmutación. Son dispositivos unidireccionales porque solamente transmiten la corriente en un único sentido.
Transductor	Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada en otra de diferente a la salida.
TRIAC	Es un dispositivo semiconductor, de la familia de los tiristores, que posee un paso de corriente bidireccional controlado por una terminal. Es un interruptor capaz de conmutar la corriente alterna.
Variador de frecuencia	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.

RESUMEN

En la industria existen diversas aplicaciones donde pueden ser empleados los motores eléctricos para poder acelerar los procesos de producción e incrementar las ganancias. En el primer capítulo se presenta una descripción del funcionamiento de los motores trifásicos síncronos, las partes y aplicaciones, asimismo, se presentan los variadores de frecuencia y las aplicaciones, ya que en la industria se desconoce que al implementar dichos dispositivos se optimiza el rendimiento y por ende se logra una alta eficiencia energética del motor.

Los variadores de frecuencia pueden ser contruidos de diversas formas y con diferentes componentes. En el segundo capítulo se presenta una forma de construcción: el cicloconvertidor. Se expone la forma de operación y funcionamiento, así como los diseños según el tipo de voltaje a utilizar, ya sea monofásico o trifásico. Finalmente se presenta el microcontrolador, el cual es el encargado del control y manipulación de los elementos de estado sólido utilizados en la construcción del cicloconvertidor.

Actualmente en el mercado guatemalteco se tienen algunas opciones de variadores de frecuencia que presentan muchas características de control y regulación del funcionamiento de los motores eléctricos que hacen que se eleve el costo, lo que no los hace rentables ya que no son aprovechadas al máximo dichas características.

Por lo tanto, en el tercer capítulo se presenta el diseño de un variador de frecuencia que es de bajo costo. Se exponen los elementos que conforman a dicho variador de frecuencia, así como las interfaces y actuadores requeridos

para cumplir con las funciones básicas de regulación de frecuencia de operación de un motor trifásico síncrono de hasta 5 HP. Se diseñó con un sistema de control digital y elementos actuadores de estado sólido, con el objetivo de que tenga una larga vida y bajo mantenimiento.

Finalmente, en el último capítulo, se presentan tres variadores de frecuencia comerciales en el mercado guatemalteco, con el objetivo de presentar las características y los precios. Seguidamente, se realiza el desglose de precios y el precio final del variador de frecuencia presentado. Además, se analizan las ventajas y desventajas que se tienen al utilizarlo, tomando en cuenta que es un dispositivo de bajo costo. Finalmente, se presenta el análisis práctico del retorno de la inversión, del mejoramiento de la eficiencia y el ahorro energético en los sistemas que cuentan con motores eléctricos, para que de esta manera quede demostrado que es una opción viable, rentable y conveniente.

OBJETIVOS

General

Diseñar un variador de frecuencia electrónico utilizando un microcontrolador PIC®18F4520 que regule la velocidad de motores AC trifásicos síncronos de 1 a 5 HP.

Específicos

1. Exponer los fundamentos del motor AC trifásico síncrono que consume potencia constante y el control por medios electrónicos.
2. Presentar a los cicloconvertidores como sistemas para controlar y variar la frecuencia de operación de un motor trifásico.
3. Diseñar un variador de frecuencia que utilice un microcontrolador PIC®18F4520 como elemento de control digital y procesamiento de datos.
4. Realizar una comparación técnica, con base en las características del diseño propuesto, con dispositivos variadores de frecuencia y de control disponibles en el mercado nacional.

INTRODUCCIÓN

A partir del siglo XIX se desarrolló la teoría necesaria para poder describir el comportamiento de las máquinas eléctricas y con esto se logró establecer las ventajas que poseían dichos dispositivos electromecánicos sobre los demás que son similares, pero que utilizan distintas fuentes de energía para el funcionamiento. Se logró notar la versatilidad y el aprovechamiento de la energía que poseían las máquinas eléctricas, ya sea funcionando como generadores o como motores.

Desde la invención de las máquinas eléctricas, estas fueron aplicadas para la generación de energía, la automatización de procesos y sistemas de control en muchas de las industrias que comenzaban en aquellos años y que actualmente continúan operando. Al utilizar las máquinas eléctricas en la industria, se ha logrado un gran avance en la tecnología y desarrollo en todos los ámbitos de la ciencia, lo que ha impulsado social y económicamente a la población mundial, tanto a productores como a los consumidores.

Debido a las altas exigencias de los procesos y sistemas de control automatizados, se ha hecho necesaria la aplicación de la electrónica en el control de las máquinas eléctricas. Al utilizar un dispositivo de control electrónico, además de ser más confiable y eficiente, se logra un mayor alcance en la manipulación y visualización de las características de funcionamiento de dichas máquinas, esto con el fin de obtener mejores resultados que se evidencian en el desempeño y vida útil de la máquina, así como en la optimización y aprovechamiento de la energía eléctrica consumida o producida.

Por lo tanto se hace necesario el desarrollar una solución que sea confiable, eficiente y accesible económicamente. Durante el presente trabajo de graduación se diseña un variador de frecuencia para controlar la velocidad de operación de un motor trifásico síncrono, en el cual se utilizará diversos dispositivos semiconductores y un microcontrolador como la unidad de regulación y control electrónico.

Finalmente se presentan algunos variadores de frecuencia comerciales que son accesibles en el mercado guatemalteco, con el objetivo de realizar una comparación entre las funciones y precios de estos con el de bajo costo. Asimismo, se realiza un análisis de retorno de inversión, con la intención de demostrar que es una opción viable y rentable.

1. FUNDAMENTOS DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS Y LOS CONTROLADORES ELECTRÓNICOS

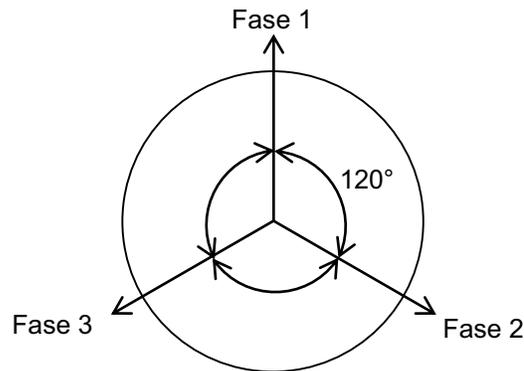
Los motores eléctricos son de gran utilidad en la vida cotidiana. Las aplicaciones pueden ser apreciadas desde el uso en bombas de agua que funcionan en el hogar para la distribución de agua hasta los motores que son de gran potencia y se utilizan en cualquier tipo de industria. Siendo los motores parte esencial del desarrollo industrial y tecnológico del ser humano es indispensable un controlador para dicho dispositivo, pues poseen características que deben ser intervenidas durante el inicio y finalización de operación, además de poder regular la velocidad. En los siguientes apartados se presentarán las generalidades y fundamentos de los motores eléctricos trifásicos síncronos, así como las características y la forma de control.

1.1. Motores eléctricos trifásicos: fundamentos

Los motores eléctricos trifásicos son máquinas eléctricas rotativas que funcionan con una fuente de corriente alterna trifásica, la cual consiste de tres fases y neutro. El desfase eléctrico entre cada línea es de 120° . El diagrama de la figura 1 ilustra la magnitud y fase del voltaje o corriente trifásica.

El motor trifásico cuenta con tres devanados separados eléctricamente por 120° , ya sea en el estator o en el rotor, los cuales se excitan con corrientes trifásicas balanceadas. El resultado es un campo magnético giratorio que es de amplitud y velocidad constante.

Figura 1. **Diagrama trifásico fuente alterna trifásica**



Fuente: elaboración propia.

1.1.1. Principios de operación de los motores eléctricos trifásicos

Los motores eléctricos trifásicos funcionan según lo descrito por el teorema de Ferraris, el cual expresa la aparición de un campo magnético giratorio que posee velocidad y amplitud constante al momento de conectar tres devanados con 120° eléctricos de separación entre ellos, así como la circulación de una corriente eléctrica trifásica desfasada a 120° en dichos devanados. El efecto resultante es análogo al de un imán permanente rotando a la velocidad de sincronismo.

El campo magnético giratorio que se produce es capaz de producir repulsión sobre un conductor por el que circula una corriente eléctrica, que regularmente se coloca como rotor, por lo tanto produce un movimiento mecánico de rotación. Dicho movimiento mecánico es proporcional a la velocidad de giro del campo magnético rotatorio.

Para generar el campo magnético del rotor, se suministra una corriente continua al devanado del campo; esto se realiza frecuentemente por medio de una excitatriz, la cual consta de un pequeño generador de corriente continua impulsado por el motor, conectado mecánicamente a él.

Para obtener un par constante en un motor eléctrico es necesario mantener los campos magnéticos del rotor y del estator, constantes el uno con relación al otro. Esto significa que el campo que rota electromagnéticamente en el estator y el campo que rota mecánicamente en el rotor se deben alinear todo el tiempo.

1.1.2. Partes de los motores eléctricos trifásicos

Los motores eléctricos trifásicos cuentan con las partes fundamentales de todas las máquinas eléctricas, las cuales son:

- Inductor (estator)
- Inducido (rotor)
- Escobillas
- Culata o carcasa
- Entrehierro
- Cojinetes
- Colector

Sin embargo, la forma de construcción de las partes del motor es la que hace la diferencia en el funcionamiento. En el caso de los motores trifásicos asíncronos, el rotor (inducido) está formado por un cilindro de barras de cobre o aluminio y se le denomina Jaula de Ardilla.

1.1.3. Motores eléctricos trifásicos síncronos

El motor trifásico síncrono posee la característica que la velocidad de rotación mecánica del rotor está relacionada estrictamente con la frecuencia de operación de la fuente de corriente alterna trifásica con la cual está siendo excitado. Asimismo, la velocidad de rotación se ve afectada por una escala que se logra conseguir con el número de polos con el que cuenta dicho motor. Se obtiene una relación de la siguiente manera:

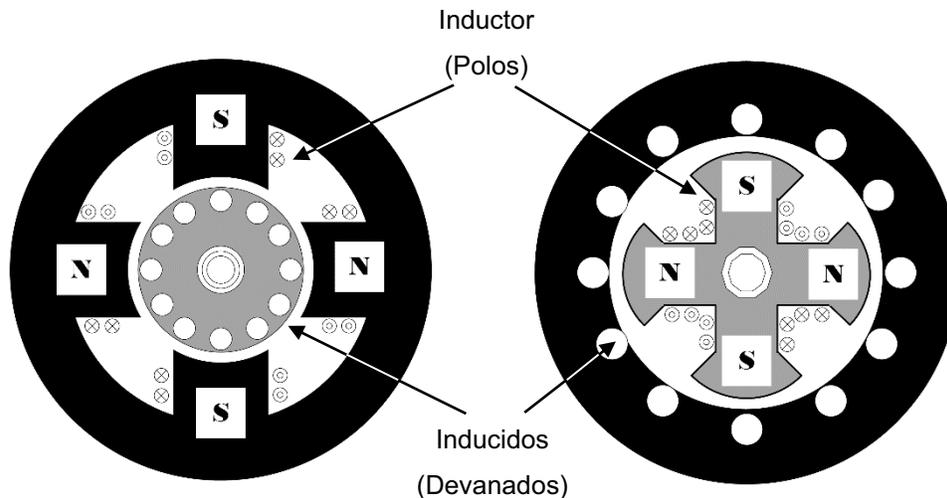
$$\omega = \frac{60 f}{p}$$

Donde ω es la velocidad de rotación en r.p.m., f es la frecuencia de operación de la fuente de energía eléctrica trifásica y p el número de polos.

En la figura 2 se ilustran los tipos de motores trifásicos síncronos según la potencia. Se diferencian por el inductor y el inducido, ya que en el caso de motores de gran potencia se tienen los devanados para que circule la corriente trifásica en el estator (inducido) y la excitación de corriente continua en el rotor (inductor). En los motores de baja potencia se tienen los devanados trifásicos en el rotor (inducido) y en el estator está el devanado para corriente continua (inductor).

Este tipo de motores se utilizan en la industria donde se requiere velocidad de rotación constante, teniendo la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular el factor de potencia con el cual trabaja. Con esto se evita colocar bancos de capacitores para reducir la potencia reactiva consumida por la implementación de dichos motores.

Figura 2. Tipos de construcción de motores trifásicos síncronos



Fuente: FRAILE, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 384.

El motor síncrono presenta la característica que puede conservar el par en un sentido único solamente cuando ya se haya sincronizado con la frecuencia de excitación eléctrica, es decir, cuando la frecuencia de giro del rotor sea la misma que la frecuencia eléctrica. Cuando el rotor está en reposo o está rotando a otra velocidad diferente a la de sincronía, el par medio que desarrolla al conectarse a la red eléctrica es nulo, por lo tanto se hace necesario utilizar dispositivos auxiliares especiales para el arranque de estos motores que por lo regular son motores asíncronos o de corriente continua. Una vez se logra la velocidad de sincronía se realiza la conexión del motor trifásico síncrono a la red eléctrica, esto se hace por medio de algún circuito de conmutación mecánico o por medio de dispositivos de estado sólido como lo son los semiconductores.

1.2. Controladores electrónicos: fundamentos

El control electrónico de los motores eléctricos es importante debido a que se utilizan para optimizar el desempeño y prolongar la vida útil tomando en cuenta

las características como la construcción física, el tipo y la aplicación. Es indispensable que se cuente con un dispositivo capaz de regular la energía eléctrica de entrada. Dicha regulación se logra utilizando circuitos electrónicos, los cuales son fabricados con materiales semiconductores que son capaces de modificar y regular los valores de algunas magnitudes eléctricas tales como el voltaje y corriente de entrada, así como la frecuencia de operación del motor.

1.2.1. Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un sistema conformado por varios dispositivos para poder modificar el valor de la frecuencia operación. En la actualidad se utilizan mayoritariamente los que son de tipo electrónico. Dichos variadores están fabricados con componentes de estado sólido tales como:

- SCR (*Silicon Controlled Rectifier*): rectificador controlado de silicio
- GTO (*Gate Turn Off Switch*): interruptor de apagado por puerta
- BJT (*Bipolar Junction Transistor*): transistor de unión bipolar
- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*): transistor bipolar de puerta aislada.
- MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*): transistor de efecto de campo de semiconductor metal-óxido.

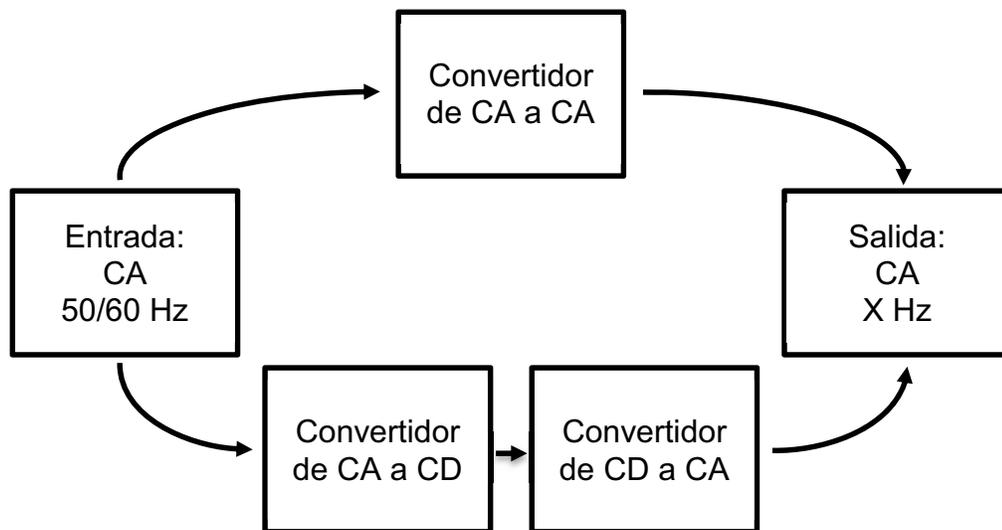
Actualmente todo circuito variador de frecuencia es controlado digitalmente por un microcontrolador o un microprocesador, ya que representan una opción de fácil implementación y un manejo efectivo, capaces de analizar y controlar el estado de múltiples semiconductores con el objeto de modificar la conversión de frecuencia de la tensión y corriente de salida.

Esta variación de frecuencia se consigue fundamentalmente mediante dos métodos. Uno de los métodos presenta una etapa de rectificación, en donde la corriente alterna es transformada en continua y una etapa de inversión, donde se genera una corriente alterna con frecuencia regulable al valor requerido. A esta última etapa se le puede denominar circuito oscilador. En este método generalmente se varía el ciclo de trabajo para regular la relación V/Hz por medio de PWM (*Pulse Width Modulation*) o modulación de ancho de pulso.

El otro método describe una variación de corriente alterna a corriente alterna sin pasar por una etapa de corriente directa, lo que significa que no se utiliza ningún circuito inversor. Este es el caso de los cicloconvertidores, los cuales varían la frecuencia por medio de rectificadores controlados.

En la figura 3 se ilustra el diagrama de bloques que presenta los métodos para la construcción del variador de frecuencia.

Figura 3. Diagrama de bloques del variador de frecuencia



Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Tipos de variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia se pueden dividir por la forma en que realizan la conversión de valores de frecuencia. De acuerdo a este criterio, se tienen dos tipos: onduladores o inversores y cicloconvertidores.

1.2.2.1. Onduladores o inversores

La función de estos conversores de C.D. a C.A. es de obtener una onda de tensión o corriente que sea alterna y que posea una frecuencia variable, según lo requerido. La forma de la onda está formada por tramos rectangulares o escalonados procedentes de una corriente directa. Este tipo de variadores de frecuencia se utiliza en aplicaciones de baja y mediana potencia. Para alta potencia es necesario realizar una mejor aproximación a la forma de onda senoidal y esto se logra por medio de un control más preciso de los pulsos utilizando métodos como modulación de ancho de pulso (PWM).

1.2.2.2. Cicloconvertidores

Estos variadores de frecuencia utilizan interruptores de estado sólido para realizar la modificación de la forma de tensión o corriente de salida sin utilizar una etapa intermedia de corriente directa. Por lo regular se utilizan rectificadores controlados monofásicos o trifásicos para obtener una forma de onda periódica alterna de frecuencia diferente a la de entrada, que por lo general es menor.

Los cicloconvertidores monofásicos son más sencillos de controlar que los trifásicos, sin embargo esta tarea se vuelve menos compleja con la implementación de un microcontrolador como elemento de control, lo cual es

tomado en cuenta para la realización del diseño correspondiente al presente trabajo de graduación.

1.2.3. Funciones del variador de frecuencia

Debido al comportamiento operativo de los motores eléctricos, al momento de utilizar variadores de frecuencia como controladores, estos son capaces de ejecutar las siguientes funciones:

- **Aceleración controlada:** la aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal. Permite elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.
- **Variación de velocidad:** un variador de velocidad puede no ser al mismo tiempo un regulador. En este caso se trata de un sistema dotado de un control con amplificación de potencia. La velocidad del motor queda determinada por una magnitud de entrada (tensión o corriente) denominada consigna o referencia.
- **Regulador de velocidad:** un regulador de velocidad es un variador con seguimiento de velocidad. Dispone de un sistema de control con amplificación de potencia. La regulación permite que la velocidad sea prácticamente insensible a las perturbaciones.
- **Deceleración controlada:** cuando se desconecta un motor, la deceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Estos dispositivos permiten controlar la deceleración mediante una rampa lineal, generalmente independiente de la rampa de aceleración. Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula
- **Inversión del sentido de giro:** la mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función. La inversión de la secuencia de fases de

alimentación del motor se realiza automáticamente o por inversión de la consigna de entrada, por una orden lógica en un borne, por la información transmitida mediante una red.

- Frenado: este frenado consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración.
- Protecciones integradas: los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como la propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo. Además, están dotados de protecciones contra cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra, sobretensiones y las caídas de tensión, desequilibrios de fases y funcionamiento en monofásico.

1.2.4. Aplicaciones

Las aplicaciones de los variadores de frecuencia abarcan un gran campo y son necesarios donde se requiere que la frecuencia de operación del motor eléctrico sea regulable, o menor que la frecuencia del suministro de energía. Algunas aplicaciones en la industria son:

- Molinos de cemento
- Barcos de propulsión
- Bobinas en minas
- Laminadores
- Trituradores de minerales
- Máquinas Scherbius de cifrado
- Líneas de producción en general

2. FUNDAMENTOS DE CICLOCONVERTIDORES Y LA UTILIZACIÓN COMO VARIADORES DE FRECUENCIA

El control electrónico de los motores eléctricos es importante debido a que se requiere optimizar el desempeño y prolongar la vida útil tomando en cuenta las características en cuanto a la construcción física, el tipo y la aplicación. A través del variador de frecuencia es posible manipular la forma de onda de voltaje de entrada por medio de rectificadores controlados, dando paso a la reconstrucción de la onda pero con diferente frecuencia. El dispositivo que se analizará y aplicará como solución en este trabajo de graduación es el cicloconvertidor. A continuación se detallan las generalidades de los cicloconvertidores y se presentan los diversos tipos disponibles para cada aplicación.

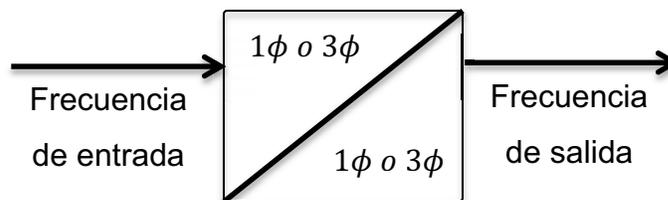
2.1. Cicloconvertidores: generalidades

Con el nombre de cicloconvertidores se designan los convertidores directos de corriente alterna a corriente alterna. A expensas de una fuente de energía eléctrica de corriente alterna, proporcionan corriente alterna mono o polifásica de amplitud y frecuencia regulables.

Tradicionalmente la conversión de C.A. a C.A. se realiza utilizando interruptores controlados que están fabricados con base en semiconductores como lo son los tiristores. Los cicloconvertidores son utilizados en aplicaciones de alta potencia controlando motores de inducción y síncronos. Los cicloconvertidores se encargan de controlar las fases involucradas en el

funcionamiento y utilizan, por lo general, los SCR para la conmutación de fase debido a la gran facilidad de control.

Figura 4. **Diagrama de bloques del cicloconvertidor**



Fuente: elaboración propia.

Las características comunes de los cicloconvertidores son el alto número de tiristores y la complejidad del circuito de mando. En este trabajo de graduación, el circuito de mando estará conformado por un microcontrolador, por lo tanto la complejidad radica en la programación del mismo. Esto se detallará en el capítulo 3.

Por su naturaleza, los cicloconvertidores solo pueden suministrar frecuencias que son menores a la de la red que alimenta la carga. Con un esquema simple, puede lograrse una frecuencia máxima igual a $1/3$ de la de entrada. Caso contrario sucede con la frecuencia mínima, ya que no existe un límite inferior.

2.2. Tipos y aplicaciones de cicloconvertidores

Los cicloconvertidores son utilizados en varios procesos, por lo general se utiliza en el control a baja velocidad de grandes motores de C.A. Como ejemplos de aplicación se puede mencionar a los controladores de mezcladores para

cemento, dispositivos de enrollado, carretes en minería, afiladores de metales, trituración de caña de azúcar y otros que requieran de bajas frecuencias, por lo regular desde los 0 hasta los 20 Hz.

A continuación se describen los tres tipos de cicloconvertidores básicos que, basándose en los principios de operación, son efectivos y de control moderadamente complejo. Se tienen los cicloconvertidores:

- Monofásico a monofásico $1\phi - 1\phi$
- Trifásico a monofásico $3\phi - 1\phi$
- Trifásico a trifásico $3\phi - 3\phi$

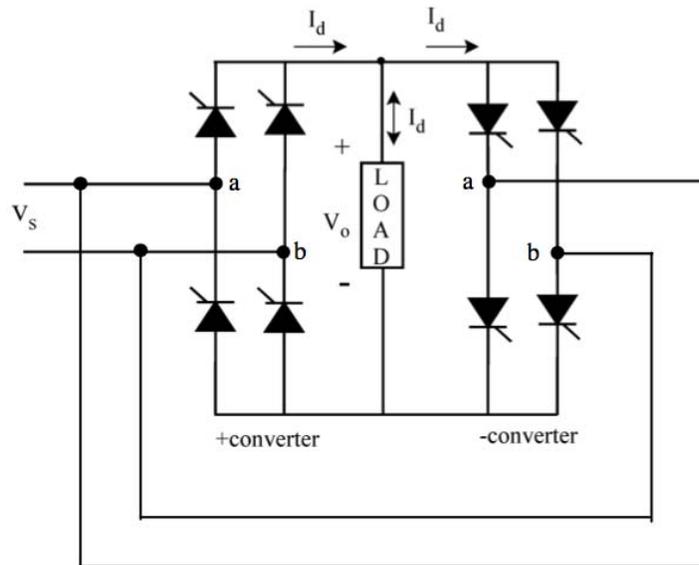
2.2.1. Monofásico a monofásico

Este tipo de cicloconvertidor utiliza dos rectificadores monofásicos controlados, los cuales se conectan a la carga. Debe controlarse el ángulo de disparo α con el que se activan los tiristores, de tal manera que solo uno de los dos rectificadores esté en funcionamiento en un determinado tiempo.

Si se considera que el cicloconvertidor debe obtener $1/4$ de la frecuencia de entrada, la acción que debe realizar dicho dispositivo es de rectificar los primeros cuatro semiciclos con la ayuda del rectificador positivo y los siguientes cuatro semiciclos con la ayuda del rectificador negativo, para obtener un voltaje eficaz que represente una onda de 4 veces el período original.

En la figura 5 se visualiza la forma de conexión de los tiristores con la fuente y el motor.

Figura 5. **Cicloconvertidor 1 ϕ – 1 ϕ**



Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 3.

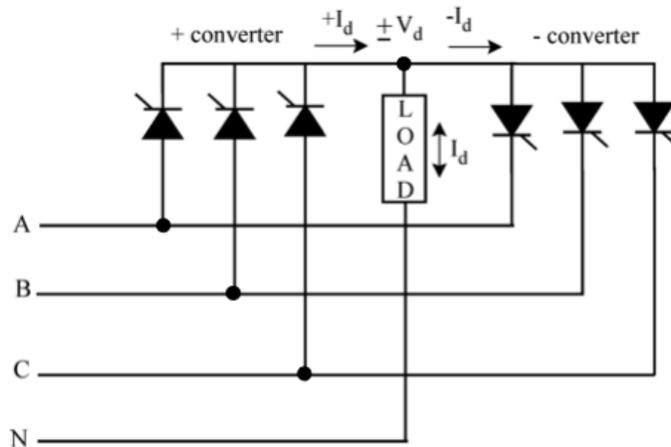
2.2.2. Trifásico a monofásico

Existen dos subtipos de cicloconvertidores trifásico a monofásico: el de media onda y el puente. Como en el caso anterior, el cicloconvertidor aplica voltaje rectificado a la carga. Los convertidores, positivo y negativo, que tienen esta configuración pueden generar voltajes en ambas polaridades, sin embargo el positivo solo puede suministrar corriente positiva y el negativo solo corriente negativa. Estas condiciones hacen que pueda funcionar en los cuatro cuadrantes.

La polaridad de la corriente determina si el convertidor positivo o negativo debe estar aplicando la potencia a la carga. La carga siempre debe estar siendo excitada por un voltaje fundamental que sea continuo, o sea que esté sin interrupciones. Por lo tanto, mientras la polaridad cambia, el voltaje promedio

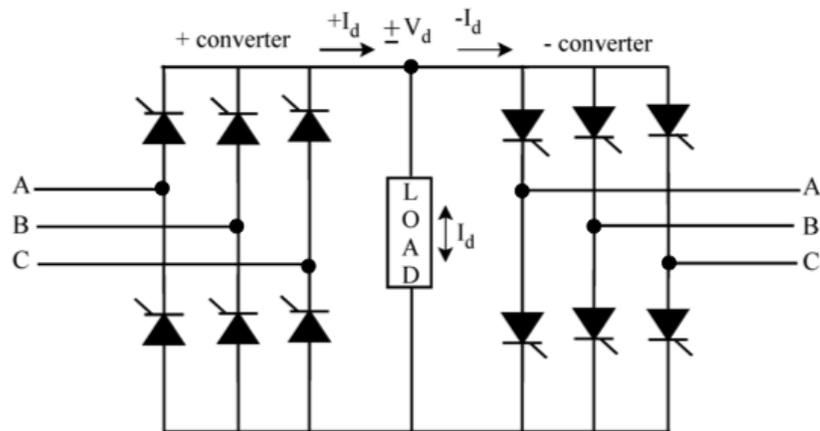
aplicado por ambos convertidores debe ser igual para evitar cambios o saltos bruscos de voltaje en la carga.

Figura 6. **Cicloconvertidor 3 ϕ – 1 ϕ : media onda**



Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 5.

Figura 7. **Cicloconvertidor 3 ϕ – 1 ϕ : puente**



F Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 5.

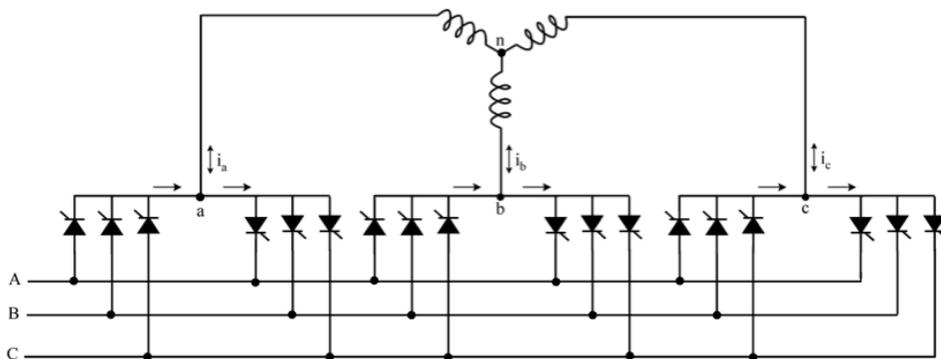
2.2.3. Trifásico a trifásico

Para obtener un cicloconvertidor trifásico a trifásico se requiere que las salidas de tres cicloconvertidores trifásico a monofásico sean conectadas a la carga trifásica, ya sea en delta o estrella, cuidando que cada una de dichas salidas tengan un desfase de 120° eléctricos entre cada una.

El resultado de la implementación de tres cicloconvertidores trifásico a monofásico es un cicloconvertidor de media onda trifásico a trifásico, con el uso de 18 tiristores. Si se tiene un cicloconvertidor puente para cada fase, se requiere el uso de 36 tiristores y se obtiene el cicloconvertidor puente trifásico a trifásico.

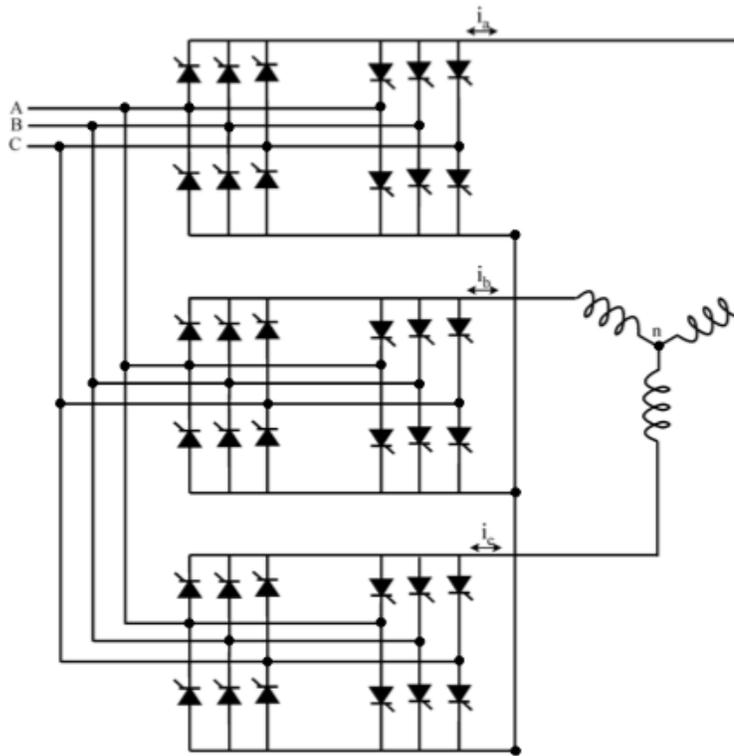
Los cicloconvertidores de este tipo son utilizados en motores trifásicos síncronos y de inducción. Presentan mejores ventajas cuando se utilizan en motores síncronos, ya que el factor de potencia de salida es mejor. El cicloconvertidor puede suministrar adelanto, atraso o la unidad en el factor de potencia, aún si la entrada siempre está en atraso.

Figura 8. **Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$: media onda**



Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 7.

Figura 9. **Cicloconvertidor 3 ϕ – 3 ϕ : puente**



Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 8.

2.3. **Cicloconvertidor a utilizar como solución**

El cicloconvertidor a utilizar es el trifásico a trifásico de media onda. Para esto se utilizarán tres cicloconvertidores trifásico a monofásico, uno para cada fase. Se utilizará dicho variador de frecuencia debido a que la conexión del neutro está disponible para la carga y la cantidad de tiristores es de seis, haciendo menos complejo el circuito de control a diferencia del cicloconvertidor puente que solo utiliza las fases sin la utilización del neutro y conlleva el control de doce tiristores, lo cual además de ser más complejo, exige mayores prestaciones en

las características del microcontrolador, tales como la capacidad de procesamiento de datos y la cantidad de pines de entrada y de salida.

En el capítulo 3 se presenta el diseño del cicloconvertidor a utilizar en el variador de frecuencia para motores trifásicos síncronos, así como su análisis.

2.4. Unidad de control electrónico: microcontrolador

Con el avance de la electrónica en los últimos años se ha simplificado el proceso de diseño de los controladores de los cicloconvertidores, ya que se utiliza la electrónica digital para regular el funcionamiento de los motores. Las ventajas que se obtienen al momento de utilizar sistemas de control basados en electrónica digital son:

- Mayor fiabilidad y estabilidad
- Mayor inmunidad al ruido
- Capacidad de almacenar configuraciones y datos importantes
- Son programables, por lo tanto muy dinámicos
- Pueden comunicarse con otros dispositivos

El microcontrolador es un sistema electrónico digital que es capaz de obtener información a través de las líneas de entrada, ya sean analógicas, por medio de un ADC (convertidor analógico a digital), o digitales y obtener algún resultado según las instrucciones indicadas, las cuales utilizan la unidad de procesamiento para ser ejecutadas. Finalmente cuenta con líneas de salida, las cuales son capaces de representar los resultados en forma de señales digitales.

Cabe agregar que el microcontrolador está diseñado para trabajar con niveles de voltaje en las líneas de entrada y de salida que van desde los 0 V a

los 5 V en corriente directa. Para manejar circuitos de electrónica de potencia se debe utilizar una interfaz que cuente con componentes que sean capaces de manejar los valores de voltaje y corriente necesarios, además que provean un aislamiento entre el circuito del microcontrolador y el circuito de potencia.

2.4.1. Fundamentos del microcontrolador

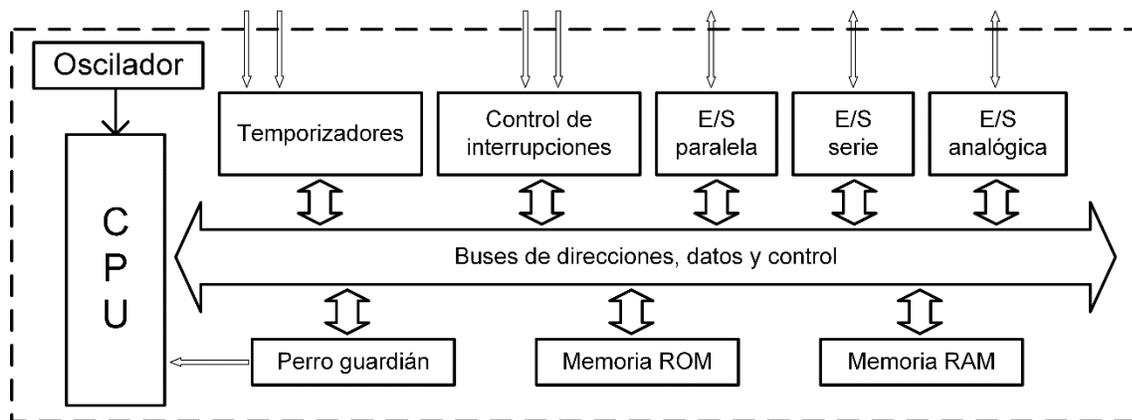
Los microcontroladores son sistemas digitales que son diseñados para aplicaciones específicas, es decir, aplicaciones donde se debe realizar un pequeño número de tareas, al menor costo posible. En estas aplicaciones, el microcontrolador ejecuta un programa almacenado en la memoria, el cual trabaja con algunos datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior a través de las líneas de entrada y salida de que dispone. El microcontrolador es parte de la aplicación, es un controlador incrustado o embebido en la aplicación.

Hay varias características que son deseables en un microcontrolador:

- Recursos de entrada y salida
- Espacio físico optimizado
- Orientado a una aplicación específica
- Estabilidad y seguridad en el funcionamiento
- Bajo consumo
- Protección contra copias

El microcontrolador combina los recursos fundamentales disponibles en un microcomputador es decir, la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria y los recursos de entrada y salida. La figura 10 muestra el diagrama de bloques general de un microcontrolador.

Figura 10. **Diagrama de bloques general del microcontrolador**



Fuente: VALDES, Fernando; PALLAS, Ramón. *Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC*. p. 14

Asimismo, los microcontroladores disponen de un oscilador que genera los pulsos que sincronizan todas las operaciones internas. El oscilador generalmente está controlado por un cristal de cuarzo debido a la gran estabilidad de frecuencia característica de los materiales piezoeléctricos. La velocidad de ejecución de las instrucciones del programa está en relación directa con la frecuencia del oscilador del microcontrolador.

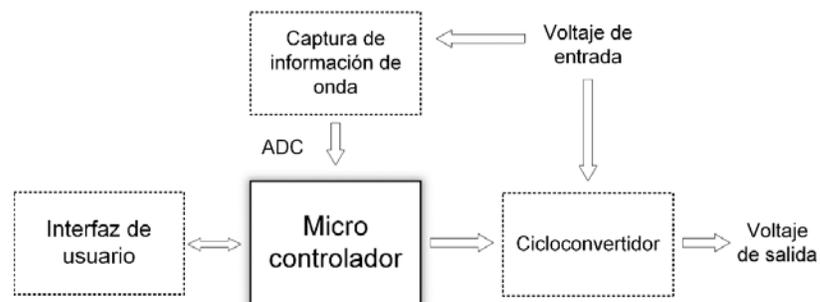
La CPU es la unidad que trae las instrucciones del programa, una a una, desde la memoria donde están almacenadas, las interpreta y hace que se ejecuten. Aquí se incluyen los circuitos de la ALU para realizar operaciones aritméticas y lógicas elementales con datos binarios.

2.4.2. Utilización del microcontrolador como elemento de regulación electrónico

Dadas las características del microcontrolador se puede notar que es un elemento que puede emplearse como controlador electrónico del variador de frecuencia que se está diseñando. Además, la particularidad que es programable lo hace un elemento que no solo regula el funcionamiento del motor según las condiciones estándares, sino que es capaz de tomar decisiones con base en circunstancias especiales.

El sistema de control digital puede ser diseñado según la figura 11. Nótese que el microcontrolador es el encargado de recopilar la información capturada por los medidores de frecuencia del voltaje aplicado al motor, también es el encargado de variar la frecuencia de voltaje de salida. Para ello modula los pulsos de disparo de los tiristores a través de una interfaz que aísla el circuito de control con el de potencia. Y por último, es el encargado de realizar la interfaz entre el usuario y el variador de frecuencia, ya que el microcontrolador recopila los datos de operación que requiere el usuario y es capaz de mostrar en una pantalla de cristal líquido (LCD) el estado actual del variador de frecuencia.

Figura 11. Diagrama de sistema de control digital



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA ELECTRÓNICO

Los motores eléctricos que utilizan controladores o variadores de frecuencia presentan grandes ventajas si son diseñados con base en electrónica digital, pues el control y regulación del funcionamiento puede ser optimizado, logrando con esto una larga vida útil de operación, una mejor eficiencia y se optimizan las características operativas del mismo. El variador de frecuencia presentado en el presente trabajo de graduación está basado en la electrónica digital, tomando como elemento básico el microcontrolador. Como todo sistema de control se disponen de elementos de entrada, elementos de salida y elementos de procesamiento de datos e interfaz con el usuario.

En los siguientes apartados se expondrán todas las partes que conforman el sistema de control utilizado como variador de frecuencia electrónico.

3.1. Cicloconvertidor: trifásico a trifásico de media onda

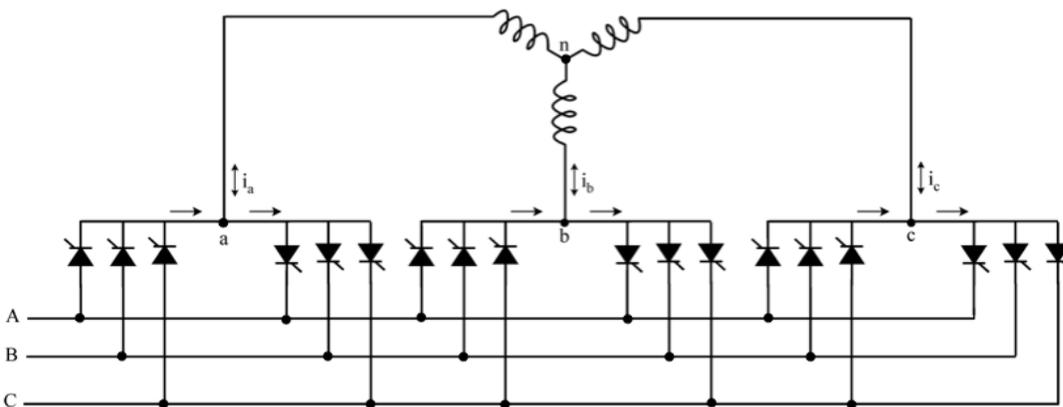
El cicloconvertidor es el actuador en el sistema de control que representa el variador de frecuencia, pues es el encargado de permitir o restringir el paso de la corriente para poder formar una nueva onda que tenga el valor de frecuencia deseado. Para la solución propuesta se utilizará el trifásico a trifásico de media onda debido a que el motor a controlar es el trifásico síncrono. Además, se utiliza el de media onda para poder optimizar el número de tiristores a utilizar.

A continuación se explicará con detalle las características de los elementos que conforman el cicloconvertidor utilizado como solución.

3.1.1. Dispositivos utilizados en el cicloconvertidor

El cicloconvertidor que se utilizará como parte del diseño del variador de frecuencia, como lo muestra la figura 12 (que es similar a la figura 8, pero que se presenta nuevamente para comodidad del lector), está constituido básicamente de tiristores, los cuales son por lo regular SCRs. También pueden utilizarse, en algunas aplicaciones, diodos rectificadores como reemplazo de los tiristores, además de que es común encontrar inductores o transformadores para la protección del motor.

Figura 12. **Cicloconvertidor $3\phi - 3\phi$ de media onda: solución**



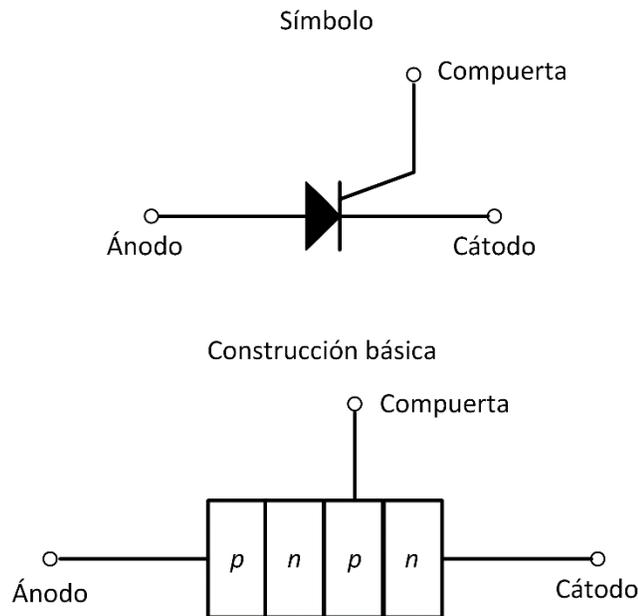
Fuente: OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon. *Cycloconverters*. University of Tennessee-Knoxville. p. 7.

Los SCRs son unos dispositivos que están dentro de la familia de dispositivos pnpn. Se presentó por primera vez en 1956 por los laboratorios Bell Telephone. En los años recientes, los SCRs se han diseñado para controlar potencias de hasta 10 MW, con valores de corriente de hasta 2 000 A con voltajes de hasta 1 800 V. El rango de frecuencia de aplicación se ha extendido hasta cerca de 50 KHz. Por estas razones, los SCRs son los indicados para la tarea

de realizar la habilitación y el bloqueo de la corriente eléctrica necesaria para la variación de frecuencia.

El SCR cuenta con una tercera terminal para efectos de control. La operación básica del SCR es distinta de la operación del diodo semiconductor fundamental de dos capas, en el hecho de que una tercera terminal, denominada compuerta, determina el momento en el que el rectificador cambia del estado de circuito abierto al de circuito cerrado. Cabe agregar que no es suficiente con simplemente polarizar de forma directa la región del ánodo al cátodo del dispositivo. En la figura 13 se muestra el símbolo del dispositivo a utilizar.

Figura 13. **Símbolo del SCR y construcción básica**



Fuente: BOYLESTAD, Robert; NASHESKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 924.

Se requiere de una corriente de compuerta mínima para que el SCR pueda permitir el paso de la corriente de ánodo a cátodo. Dicha corriente de compuerta es por lo regular mucho menor que la corriente que se permite entre el cátodo y el ánodo. Además, la temperatura y una tensión de ánodo-cátodo muy elevada, pueden producir que el SCR se desbloquee y permita el paso de la corriente.

Existen dos métodos para apagar un SCR; el primero es la interrupción de la corriente del ánodo y el segundo es la conmutación forzada. Para apagar el SCR con el primer método debe utilizar algún elemento externo tal como algún interruptor o conmutador para desviar la corriente que está atravesando el dispositivo. Cuando se utiliza el segundo método, se debe buscar la manera que la corriente pase en dirección opuesta al sentido de la corriente con la que se activa el SCR.

Para el diseño del variador de frecuencia actual no es necesario utilizar componentes adicionales al SCR, pues se busca que el variador de frecuencia sea de bajo costo, es decir, se busca optimizar la cantidad de componentes pero siempre conservando la relación entre la mejor calidad y el menor costo, sin poner en riesgo el funcionamiento eficiente del motor y controlador.

El SCR que se utilizará deberá soportar un voltaje pico máximo de 680 V, equivalente a un valor de voltaje eficaz de 480 V y una corriente pico de plena carga de 14 A, equivalente a una corriente eficaz de 10 A. Asimismo, el SCR deberá soportar una corriente de arranque, la cual es de corta duración, de hasta ocho veces la corriente a plena carga, o sea de hasta 112 A.

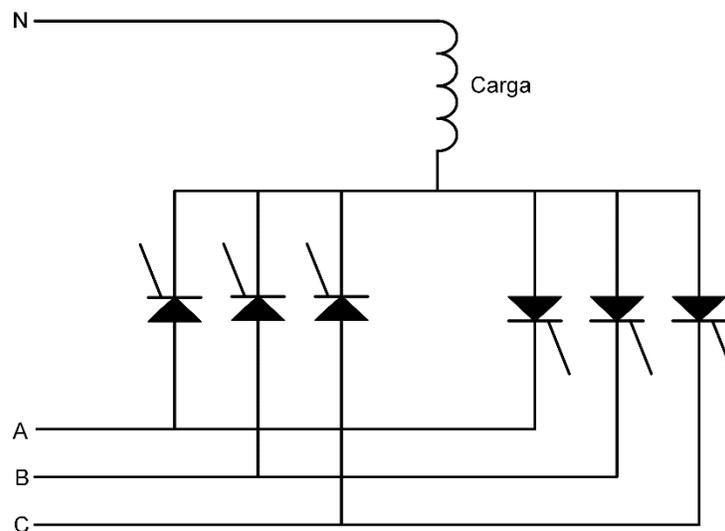
El SCR que reúne las características eléctricas máximas de operación, que debería de ser utilizado para la construcción del cicloconvertidor, es el BT151-800R de NXP Semiconductors. Dicho SCR permite un voltaje pico

máximo de 800 V y 12 A de corriente eficaz. También, el valor máximo de corriente permitido durante un ciclo de duración es de hasta 120 A y de hasta 80 A durante cinco ciclos de duración. Cabe agregar que el BT151-800R viene en un encapsulado TO-220AB, el cual permite una fácil disipación de calor. En el anexo I se presenta la hoja de datos de dicho componente.

3.1.2. Diseño y análisis teórico del cicloconvertidor

El cicloconvertidor trifásico a trifásico de media onda se puede descomponer como tres cicloconvertidores trifásico a monofásico de media onda, cuidando la relación de desfase de 120° entre cada una de las ondas de salida. Debido a esto, se analizará únicamente un cicloconvertidor trifásico a monofásico de media onda, con el objeto de simplificar el análisis. A continuación, en la figura 14, se presenta el diseño del cicloconvertidor trifásico a monofásico de media onda que forma parte del diseño del variador de frecuencia.

Figura 14. **Cicloconvertidor trifásico a monofásico de media onda**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

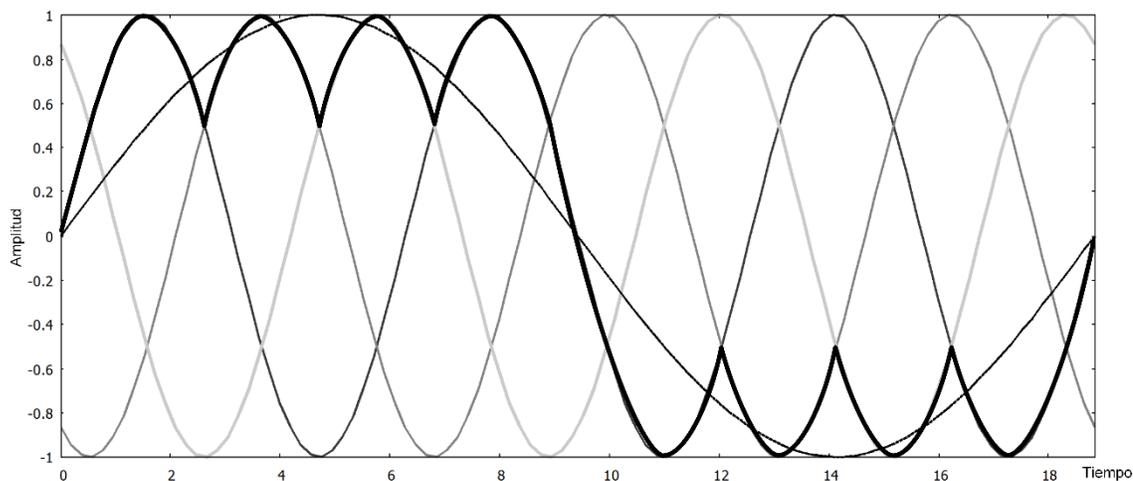
Se dispone de tres tiristores de cada lado y estos sirven para hacer los rectificadores de ciclo positivo y ciclo negativo. Debe de considerarse tener la precaución necesaria para no activar un tiristor del rectificador de ciclo positivo y otro del negativo al mismo tiempo, pues esto provocaría un corto circuito de la fuente.

Se requiere de un rectificador de ciclo positivo para que el sentido de la corriente sea positivo y el rectificador de ciclo negativo para que el sentido de la corriente sea inverso. Con este tipo de cicloconvertidor se puede trabajar en los cuatro cuadrantes, es decir, el rectificador de ciclo positivo puede trabajar con voltaje positivo y corriente positiva y voltaje positivo y corriente negativa. Además, el rectificador de ciclo negativo puede trabajar con voltaje negativo y corriente positiva y voltaje negativo y corriente negativa. Dadas estas características, se logra un control total de la corriente y voltaje aplicado al motor.

El microcontrolador será el encargado de modular los pulsos en las compuertas de control de cada tiristor para obtener un voltaje de diferente frecuencia. El voltaje que entra a la carga es, generalmente, de la manera ilustrada en la figura 15.

Se observa que el voltaje sigue la tendencia senoidal, sin embargo no es una representación fiel. Esto introduce a la red muchos armónicos indeseables, los cuales son filtrados regularmente por la inductancia de las bobinas del motor. Mientras más cercana sea la forma del voltaje de salida del cicloconvertidor a la forma de onda senoidal de frecuencia deseada, más armónicos se producen en la red. La presencia de armónicos produce pérdidas y un torque pulsante, por lo tanto deben reducirse haciendo que el voltaje de salida sea lo más parecido a la onda senoidal fundamental.

Figura 15. **Voltaje de salida del cicloconvertidor**



Fuente: elaboración propia, con programa Gnuplot.

El variador de frecuencia tomará como frecuencia fundamental o base la de 60 Hz. Los valores de frecuencia que se pueden lograr son: un tercio de la frecuencia fundamental, un cuarto y un sexto, es decir, 20 Hz, 15 Hz y 10 Hz respectivamente. No se puede utilizar el cicloconvertidor para frecuencias superiores a los 20 Hz, pues tal y como se explicó en secciones anteriores, el cicloconvertidor es efectivo teniendo un valor máximo de frecuencia de salida igual a un tercio de la frecuencia de entrada. Además, existe una gran variedad de aplicaciones que requieren estos valores de frecuencia, como se expuso anteriormente.

3.2. Sistema de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se requiere de la utilización de componentes analógicos que sean capaces de efectuar una lectura eficiente y segura, ya que

los datos directos a obtener son los valores de voltaje de entrada. Con base en estos valores se determinarán de manera indirecta, con la ayuda del microcontrolador, los valores de frecuencia y período, con la intención de poder regular y modular los pulsos que activen o desactiven los tiristores encargados de controlar el paso de la corriente aplicada al motor.

Ya que se requiere que la lectura se haga de una manera eficiente y segura, se seleccionan elementos que reúnen las características deseables, tales como alta impedancia de entrada para aislar la señal de voltaje alterno con el microcontrolador, respuesta inmediata, inmunidad al ruido y una excelente respuesta en frecuencia. En la siguiente sección se expone el elemento clave para realizar la función de transductor.

3.2.1. Dispositivos utilizados

El dispositivo utilizado en el diseño del transductor que sirve como elemento de adquisición de datos es el amplificador operacional. Este reúne las características mencionadas en la sección anterior.

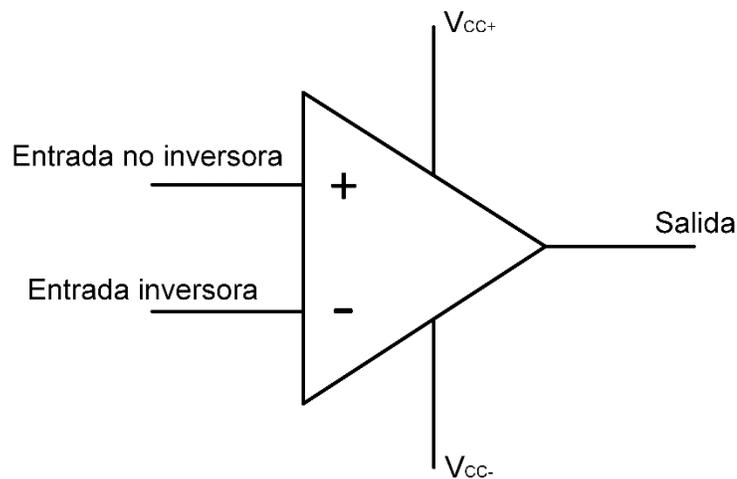
El amplificador operacional es un dispositivo activo diferencial de muy alta ganancia que posee alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Por lo general, el amplificador operacional se utiliza para proporcionar cambios en la amplitud de voltaje.

El amplificador operacional tiene una representación gráfica como se muestra en la figura 16 y se pueden visualizar las dos entradas y la salida. El amplificador operacional posee la capacidad de trabajar con un lazo de retroalimentación, que va de la salida a la entrada y puede dar una retroalimentación positiva o negativa, el cual varía la ganancia del circuito

utilizando elementos pasivos, dando de esta manera un control muy versátil y simple sobre las señales de salida. Además, la función de la ganancia del circuito puede determinarse por medio de las Leyes de Kirchhoff y la Ley de Ohm.

El amplificador operacional, según la característica de alta impedancia de entrada, tiene una característica que simplifica el análisis de los voltajes y corrientes de entrada y salida, esta es la denominada corto circuito virtual. Esto se da debido a que en la entrada del amplificador operacional no ingresan corrientes, dando paso a que la caída de voltaje entre ambas entradas sea de cero.

Figura 16. **Amplificador operacional**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

Para el diseño del transductor se aprovecha la característica de la impedancia de entrada muy elevada, pues aísla el circuito de potencia del circuito de control y procesamiento de datos. Además, al utilizar el amplificador operacional se tiene la capacidad de realizar una interface o acoplamiento utilizando un divisor de voltaje para reducir el valor de voltaje en la entrada; para la señal de entrada que será muestreada por el convertidor analógico a digital que tiene el microcontrolador, ya que sólo se le puede ingresar una señal en un rango determinado de voltaje.

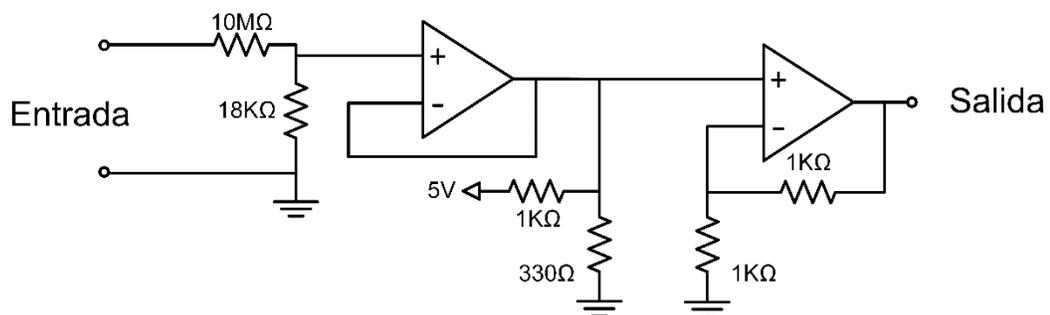
En cuanto al modelo comercial se refiere, el amplificador operacional que se utiliza es el TL084 de STMicroelectronics, ya que dicho integrado, que viene en empaquetado PDIP de 14 terminales, cuenta con cuatro amplificadores operacionales que son fabricados con transistores de efecto de campo (FET) en la entrada y que cuentan con una impedancia de entrada aproximadamente de 1 teraohms y una impedancia de salida muy baja, así como una ganancia de aproximadamente de 200 V/mV y un ancho de banda de 4 MHz. En el anexo II se presenta la hoja de datos correspondiente.

3.2.2. Diseño y análisis del transductor

El transductor será utilizado para realizar el acople entre la señal de entrada al cicloconvertidor y el microcontrolador. Además, realizará un ajuste de voltaje de 0 V a 5 V para que pueda ser leído por el convertidor analógico a digital del microcontrolador sin que sea afectado por voltajes diferentes a este rango. Ya que el voltaje será máximo de 480 V eficaces, se utilizarán valores de elementos pasivos específicamente para un valor de voltaje pico de 680 V como máximo. Cabe agregar que el transductor se requiere únicamente para detectar los cruces por cero del voltaje de entrada.

El transductor cuenta con dos etapas, la primera es un divisor de voltaje unido a un circuito seguidor de voltaje y la segunda consiste en un sumador no inversor para realizar el ajuste de la señal en un rango de 0 V a 5 V. El circuito se presenta en la figura 17.

Figura 17. **Transductor de señal de entrada al microcontrolador**



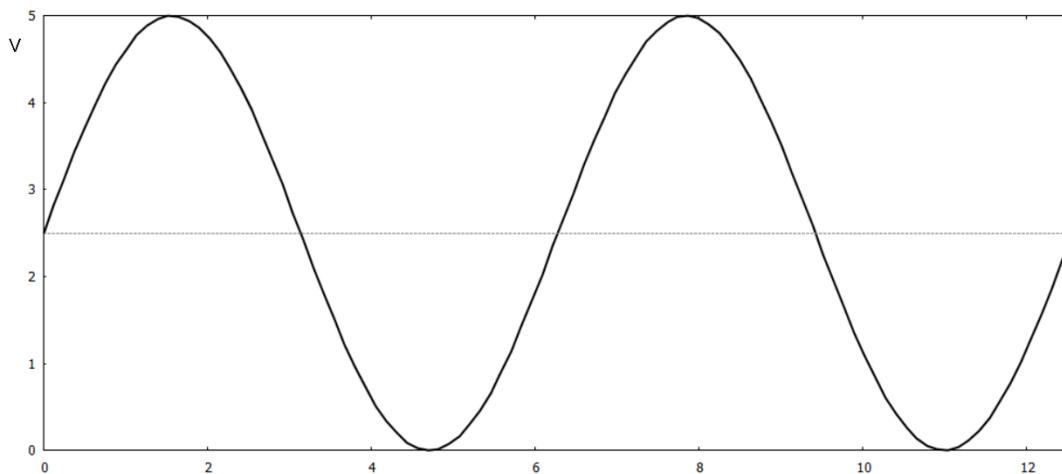
Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

En la primera etapa se puede notar que el divisor de voltaje y la entrada del amplificador operacional presentan una alta resistencia, lo cual es equivalente a un circuito abierto y por lo tanto la afectación al voltaje de entrada del cicloconvertidor es mínima. El divisor de voltaje tiene la función de reducir el valor de voltaje de 680 V a 1,25 V. Se observa que el voltaje tomado del resistor 2 se conecta al amplificador operacional configurado como seguidor de voltaje, el cual funciona como acople de impedancia y elimina el efecto de carga para poder obtener una señal fiel y guardando la relación obtenida con el divisor de voltaje.

Luego, en la segunda etapa se puede visualizar que a esta señal de salida del seguidor de voltaje se le suma un voltaje de 1,25 V para poder situar en este valor el punto de referencia para detectar el cruce por cero de la onda. A la salida de esta etapa se obtendrá la onda de voltaje adaptada en un rango de 0 V a 5 V

con un corrimiento vertical hacia arriba de 2,5 V debido a que, además de sumar, el amplificador multiplica por dos las entradas. En la figura 18 se puede observar la representación gráfica de la onda de salida, la cual se conecta a la entrada del conversor analógico a digital del microcontrolador.

Figura 18. **Señal de salida del transductor**



Fuente: elaboración propia, con programa Gnuplot.

3.3. **Diseño de la unidad de control y procesamiento de datos**

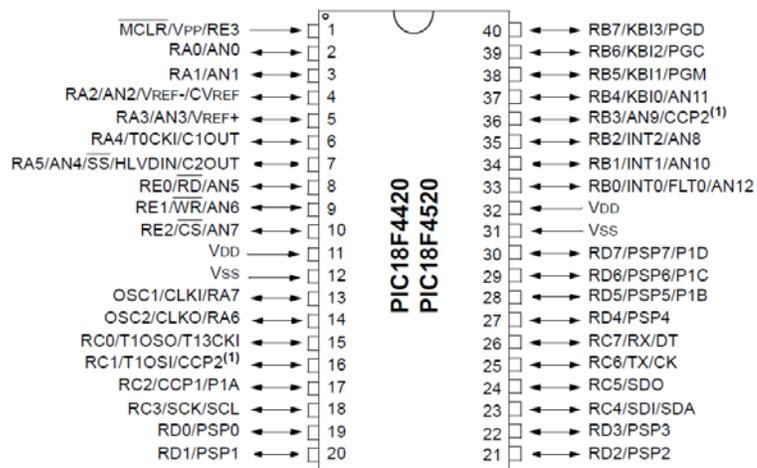
En el siguiente apartado se expone el diseño de la parte fundamental del variador de frecuencia, ya que la unidad de control y procesamiento de datos es la encargada de tomar las decisiones para poder accionar los tiristores y así modificar la frecuencia del voltaje aplicado al motor. Asimismo es la encargada de interpretar las instrucciones que le son dadas por parte del usuario y poder mostrar el estado del variador de frecuencia. Para realizar estas tareas, se utilizará el microcontrolador PIC®18F4520 de Microchip. A continuación se exponen los detalles.

3.3.1. Microcontrolador PIC®18F4520: descripción

El microcontrolador PIC®18F4520 es fabricado por la compañía Microchip Technology Inc., compañía localizada en Chandler, Arizona, EE. UU., fabricante de semiconductores analógicos, memorias y microcontroladores.

El PIC®18F4520 consiste en un microcontrolador de juego de instrucciones reducidas (RISC). Se dice que tiene un rendimiento computacional alto a un precio económico y con alta durabilidad. Además, posee una memoria *flash* mejorada para programas. La familia del microcontrolador PIC®18F4520 introduce mejoras en el diseño que hacen que sea una buena solución para cualquier aplicación de alto rendimiento y que requiera mucha sensibilidad. Este microcontrolador viene en un empaquetado PDIP de 40 pines, de los cuales 36 son utilizables únicamente, ya que se requieren 4 para la polarización del mismo. Se puede ver en la figura 19 la distribución de los pines.

Figura 19. Distribución de pines microcontrolador PIC®18F4520



Fuente: MICROCHIP. PIC18F2420/2520/4420/4520 Data Sheet. p. 2.

Las características de funcionamiento de este microcontrolador incluyen una memoria *flash* de programa mejorada que permite un ciclo de borrado/escritura de hasta 100 000 veces, un ciclo de borrado/escritura de hasta 1 000 000 para la memoria EEPROM. La duración de los datos en la *flash* y la EEPROM es de hasta 100 años. En la tabla I se pueden encontrar los datos que expresan las capacidades de memoria del microcontrolador PIC®18F4520.

Tabla I. **Resumen de características de memoria del PIC®18F4520**

Memoria de Programa		Memoria de datos	
Flash (bytes)	Número de instrucciones de palabra simple	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)
32K	16384	1536	256

Fuente: MICROCHIP. PIC18F2420/2520/4420/4520 Data Sheet. p. 1.

El microcontrolador es capaz de tener un rendimiento de hasta 10 MIPS funcionando con 3 V. El rango de voltaje de operación es de 2,0 V hasta 5,5 V, cuenta con un temporizador de perro guardián con oscilador RC independiente del oscilador interno, que maneja un rango de frecuencia desde 31 KHz hasta 8 MHz con un PLL que multiplica por 4 la frecuencia.

Todo este sistema se complementa con los periféricos tales como el Master Synchronous Serial Port (MSSP: Puerto Serial Síncrono Maestro por las siglas en inglés) que soporta SPI™ and I2C™ en modo maestro y esclavo. Además de que cuenta con un módulo EUSART, 4 temporizadores, 5 salidas PWM y 2 entradas de captura/comparación.

El PIC®18F4520 no solo es capaz de manejar señales digitales sino que también analógicas. Para estas funciones cuenta con 13 canales de convertidores analógico a digital de 10 bits con un muestreo de 100 000 muestras por segundo. Maneja un módulo de detección de bajo voltaje y un módulo de *Brown-out-Reset*, los cuales son completamente programables. Finalmente, cuentan con dos multiplexores comparadores analógicos.

3.3.2. Dispositivos utilizados

El microcontrolador requiere de ciertos dispositivos adicionales para poder lograr el resultado deseado, el cual es de obtener un variador de frecuencia. Se requieren dispositivos para realizar las interfaces usuario-microcontrolador y cicloconvertidor-microcontrolador. Sin estos dispositivos adicionales, no es posible obtener resultado alguno, pues el microcontrolador funciona con señales externas que ingresan para ser procesadas y luego obtener una señal de salida.

Para la interfaz usuario-microcontrolador es necesario contar con una LCD para el despliegue gráfico de la información y pulsadores para que el usuario pueda seleccionar opciones y modos de operación.

La pantalla de cristal líquido genérica que se utilizará con el PIC®18F4520, es un dispositivo que se compone de una pantalla delgada y plana, la cual está formada por un número preestablecido de píxeles monocromos para formar caracteres en cada línea que conforma la LCD. La pantalla que se utilizará en el diseño cuenta con dos líneas y veinte caracteres en cada una. Además, tiene 16 pines para el control con el microcontrolador.

Al momento de realizar la programación del PIC® se debe incluir la librería necesaria para poder enviar por los puertos del microcontrolador las secuencias

de pulsos correctas que hagan que se despliegue la información de manera exitosa. Asimismo, en el PIC® se deben reservar los pines para poder llevar a cabo esta operación, pues dichos pines son dedicados al control de la LCD y no pueden utilizarse de ninguna otra manera. Cabe agregar que los pines del PIC® deben estar configurados como salidas digitales.

Los pulsadores son elementos mecánicos que se encargan de permitir o restringir el paso de la corriente, de una terminal a otra, al momento de presionarlos con el dedo. Normalmente los pulsadores cuentan con una posición mientras están en reposo, la cual puede ser estar abierto o estar cerrado. Con los pulsadores se puede manipular el microcontrolador, el cual ha sido programado y configurado previamente para leer los cambios de voltaje en los pines y con esto lograr modificar el curso o seleccionar las opciones de operación que solicite el usuario. Para el diseño del controlador se utilizarán pulsadores normalmente abiertos.

Ahora, para la interfaz microcontrolador-cicloconvertidor se requiere de un opto-acoplador que sea capaz de aislar el circuito de baja potencia, el del microcontrolador, con el de alta potencia, el del cicloconvertidor. Para esta función se utilizará un opto-TRIAC, el cual posee un LED infrarrojo en la puerta que es encargado de excitar al mismo y permitir el paso de la corriente de un ánodo al otro.

Para que funcione el cicloconvertidor se conecta un pin del PIC® a una terminal del LED, para que de esta manera quede aislado completamente del circuito de potencia. Asimismo, uno de los ánodos se conecta a la fuente de energía de potencia y el otro se conecta a la compuerta del SCR. De esta forma se puede permitir o restringir el paso de la corriente a través del SCR.

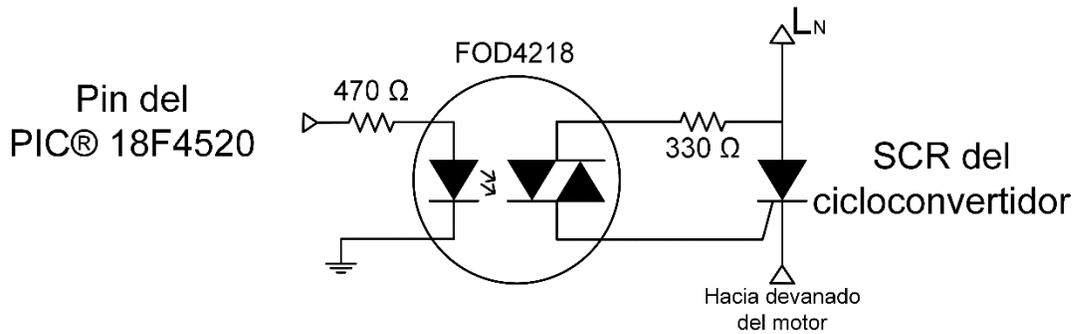
El opto-acoplador que se utilizará será el FOD4218 de Fairchild Semiconductor ya que posee las características necesarias para el correcto funcionamiento. El voltaje pico que soporta es de 800 V entre cada ánodo y la corriente del LED máxima es de 30 mA. Dichos valores son suficientes para poder llevar a cabo la función de aislamiento de circuitos. En el anexo III se presenta la hoja de datos correspondiente.

3.3.3. Diseño y análisis del circuito de control y procesamiento de datos

El circuito de control y procesamiento de datos se divide en dos partes, la primera es la interfaz microcontrolador-cicloconvertidor. Para esta interfaz se requiere la conexión de un pin del microcontrolador con el ánodo del LED que tiene el optoacoplador, así como la conexión de uno de los ánodos del TRIAC con la compuerta del tiristor, en este caso del SCR. En la figura 20 se muestra la interfaz requerida, por fase de la fuente de voltaje alterno trifásico, en la cual se cuenta con el SCR que forma parte del convertidor de ciclo positivo. En la figura 21 se muestra la interfaz que se necesita, por fase, para el convertidor de ciclo negativo.

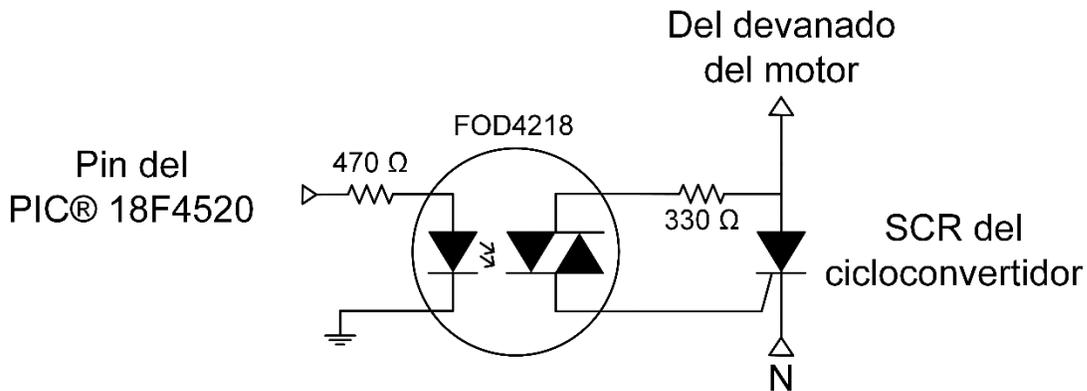
Cabe agregar que se requieren tres fases para cada devanado del motor, es decir, que se requieren 18 SCRs y 18 optoacopladores ya que el motor cuenta con tres devanados.

Figura 20. **Interfaz microcontrolador y convertidor de ciclo positivo**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft[®] Visio[®] 2013.

Figura 21. **Interfaz microcontrolador y convertidor de ciclo negativo**

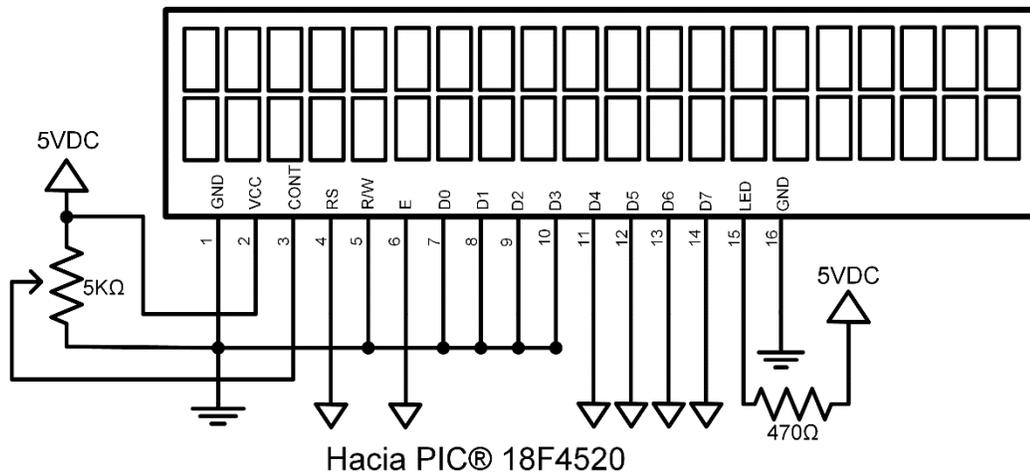


Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft[®] Visio[®] 2013.

La segunda parte del circuito de control y procesamiento de datos consta de la interfaz entre el microcontrolador y el usuario. Se requiere de esta interfaz debido a que el usuario es quien le dará las instrucciones al variador de frecuencia para que pueda operar de la manera en que sea necesario. En la figura 22 se puede observar la pantalla LCD que se utilizará para la visualización

del estado actual del variador de frecuencia. En la figura 23 se observan los pulsadores que son necesarios para que pueda interactuar el usuario.

Figura 22. **Interfaz usuario y microcontrolador: LCD**

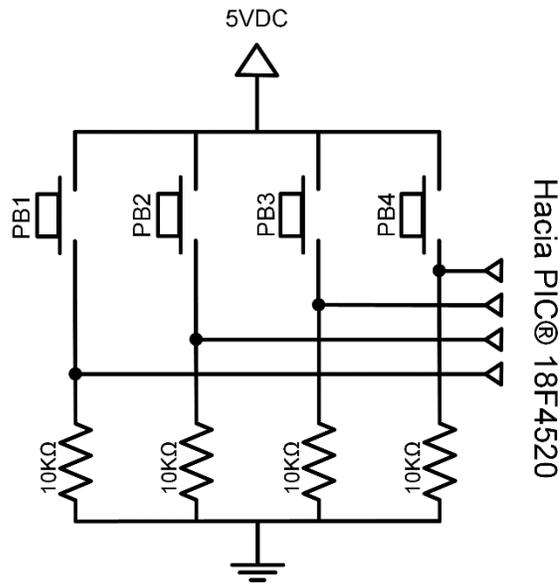


Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

La función de los pulsadores PB1 y PB2 es de navegación vertical, es decir, son capaces de desplazar hacia arriba o abajo las opciones que son mostradas en la LCD. La opción que está en la selección actual estará parpadeando. Para seleccionar la opción requerida se presiona el pulsador PB3. Para retornar al menú principal se presiona el pulsador PB4.

Finalmente, se muestra en la figura 24 el microcontrolador con todas las terminales de entrada y salida asignadas a cada uno de los dispositivos externos que serán utilizados, así como de la polarización y conexión con el oscilador externo de 20 MHz.

Figura 23. **Interfaz usuario y microcontrolador: pulsadores**



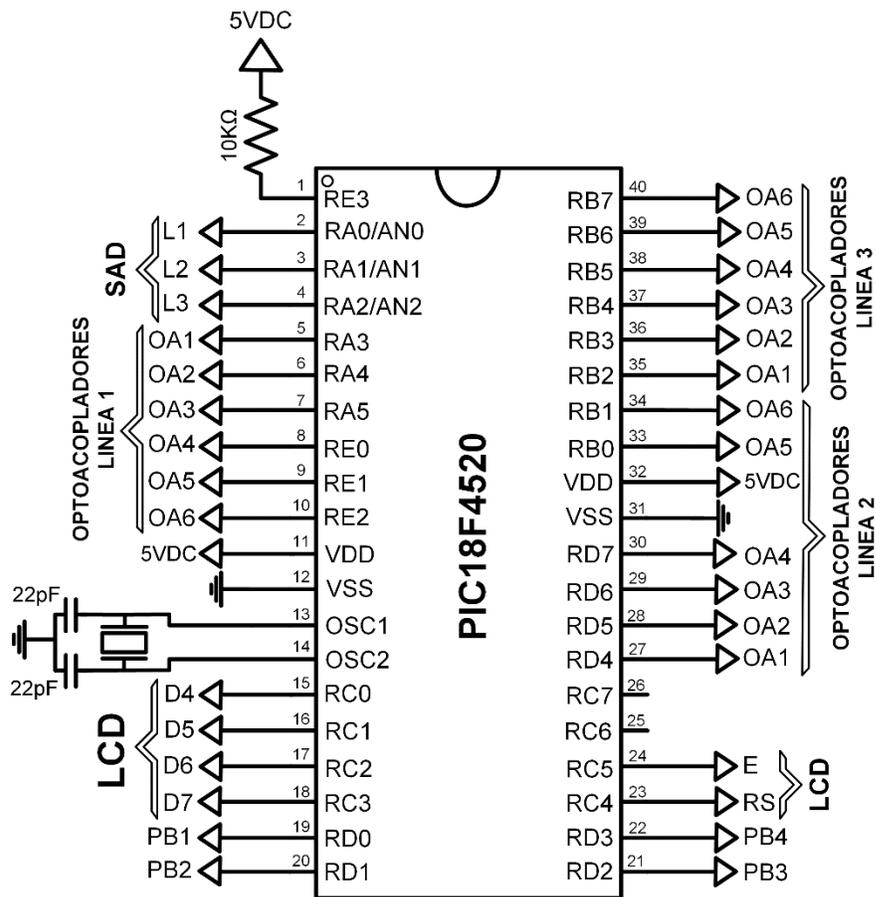
Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

En los puertos identificados como optoacopladores línea 1, 2 y 3 son las terminales en donde se conecta el optoacoplador necesario para activar o desactivar los tiristores que se utilizan para modificar la forma de onda de voltaje y así obtener una onda de frecuencia modificada. Estos pines son los que controlan el funcionamiento del cicloconvertidor y por lo tanto se completa la interfaz microcontrolador-cicloconvertidor.

También se visualizan las terminales del PIC® identificadas como LCD, las cuales sirven para la conexión de la LCD, que se muestra en la figura 22, con el microcontrolador. Adicional, se encuentran las terminales identificadas como PB1, PB2, PB3 y PB4, las cuales se conectan con el circuito de pulsadores mostrado en la figura 23. Con la conexión de estas terminales con los elementos externos se completa la interfaz microcontrolador-usuario.

Para completar la unidad de control y procesamiento de datos se requiere que la salida del circuito mostrado en la figura 17 se conecte en un pin analógico del microcontrolador. En la figura 24 se notan los pines identificados como SAD (Sistema de Adquisición de Datos), los cuales son entradas analógicas que posee el PIC® para recopilar la información necesaria de la onda de voltaje de entrada y lograr obtener el control de la frecuencia.

Figura 24. **Conexión del PIC®18F4520 con dispositivos externos**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft® Visio® 2013.

3.4. Programación del software del microcontrolador

Una de las características del microcontrolador PIC®18F4520 es que debe ser programado para que pueda funcionar de acuerdo a la aplicación específica que se requiera como solución. El programa puede ser escrito en un lenguaje de alto nivel para hacer este proceso menos complejo y complicado, de esta manera se evitan las confusiones que pueden incurrir en errores de funcionamiento del microcontrolador.

Originalmente el programa se escribía utilizando numeración binaria o hexadecimal, teniendo palabras de longitud de 16 bits como instrucciones, las cuales eran interpretadas por el procesador del microcontrolador. Al pasar el tiempo se logró desarrollar el primer lenguaje de programación que permitía programar de una manera más sencilla, utilizando el lenguaje y los símbolos comunes a la escritura, el cual fue el lenguaje ensamblador. Para poder pasar de un lenguaje de alto nivel a instrucciones hexadecimales y binarias es necesario de un compilador, el cual se encarga de dicha traducción.

Finalmente, el programa ya compilado se almacena en la memoria *flash* del microcontrolador con el objeto que pueda ser ejecutado. Para poder guardar la información del programa en la memoria *flash* se requiere de un hardware que se encargue de transferir el programa a los bloques de memoria de programa.

Condensando el proceso de crear y ejecutar un proyecto, resume los siguientes pasos:

- Crear un proyecto (nombre de proyecto, configuración de proyecto, dependencias entre archivos).
- Editar un programa.

- Compilar el programa y corrección de errores.
- Depurar (ejecutar el programa paso a paso para asegurarse de que se ejecutan las operaciones deseadas).
- Programar un microcontrolador (cargar el archivo .hex generado por el compilador en el microcontrolador utilizando el programador PICflash).

Como se ha descrito anteriormente, para poder escribir el programa que hará que el microcontrolador funcione como la unidad de control y procesamiento de datos, es necesario utilizar un entorno y lenguaje de programación adecuado, lo cual permitirá aprovechar al máximo las capacidades y prestaciones con las que cuenta el PIC®18F4520. El lenguaje para el cual está optimizado el microcontrolador utilizado en el diseño del variador de frecuencia es el lenguaje C, ya que cuenta una arquitectura específica que tiene un juego de instrucciones extendido opcional para optimizar el código que es compilado. A continuación se describe dicho lenguaje y se exponen las ventajas al utilizarlo para programar el microcontrolador.

3.4.1. Lenguaje C: descripción

El lenguaje C dispone de las siguientes ventajas de un lenguaje de programación de alto nivel:

- Varias instrucciones en ensamblador se sustituyen por una sentencia.
- El programador no tiene que conocer el conjunto de instrucciones o características del hardware del microcontrolador utilizado.
- Siempre se puede insertar en el programa una secuencia escrita en ensamblador dentro de un espacio en el código de alto nivel.

- El compilador se encarga de la traducción al lenguaje de bajo nivel y lenguaje máquina para ser copiados a la memoria de programa del microcontrolador.

Además, permite realizar algunas operaciones tanto sobre los bytes como sobre los bits.

Las características de C pueden ser muy útiles al programar los microcontroladores. Además, C está estandarizado (ANSI), es muy portable, así que el mismo código se puede utilizar muchas veces en diferentes proyectos. Lo que lo hace accesible para cualquiera que conozca este lenguaje sin reparar en el propósito de uso del microcontrolador. C es un lenguaje compilado, lo que significa que los archivos fuentes que contienen el código C se traducen a lenguaje máquina por el compilador. Todas estas características hicieron al C uno de los lenguajes de programación más populares.

3.4.1.1. Entorno de programación: MikroC® IDE

El entorno de desarrollo integrado (IDE) donde se programará el PIC® 18F4520 que se utilizará en la unidad de proceso y control del variador de frecuencia será MikroC IDE, el cual es un software con licencia, desarrollado por la compañía MikroElektronika. Dicho entorno utiliza un lenguaje propio específico para programar microcontroladores de la familia PIC® de Microchip, el cual es denominado mikroC.

MikroC es un lenguaje muy similar al C estándar, no obstante en determinados aspectos difiere del ANSI estándar en algunas características. Algunas de estas diferencias se refieren a las mejoras, destinadas a facilitar la

programación de los microcontroladores PIC®, mientras que las demás son la consecuencia de la limitación de la arquitectura del hardware de los PIC®.

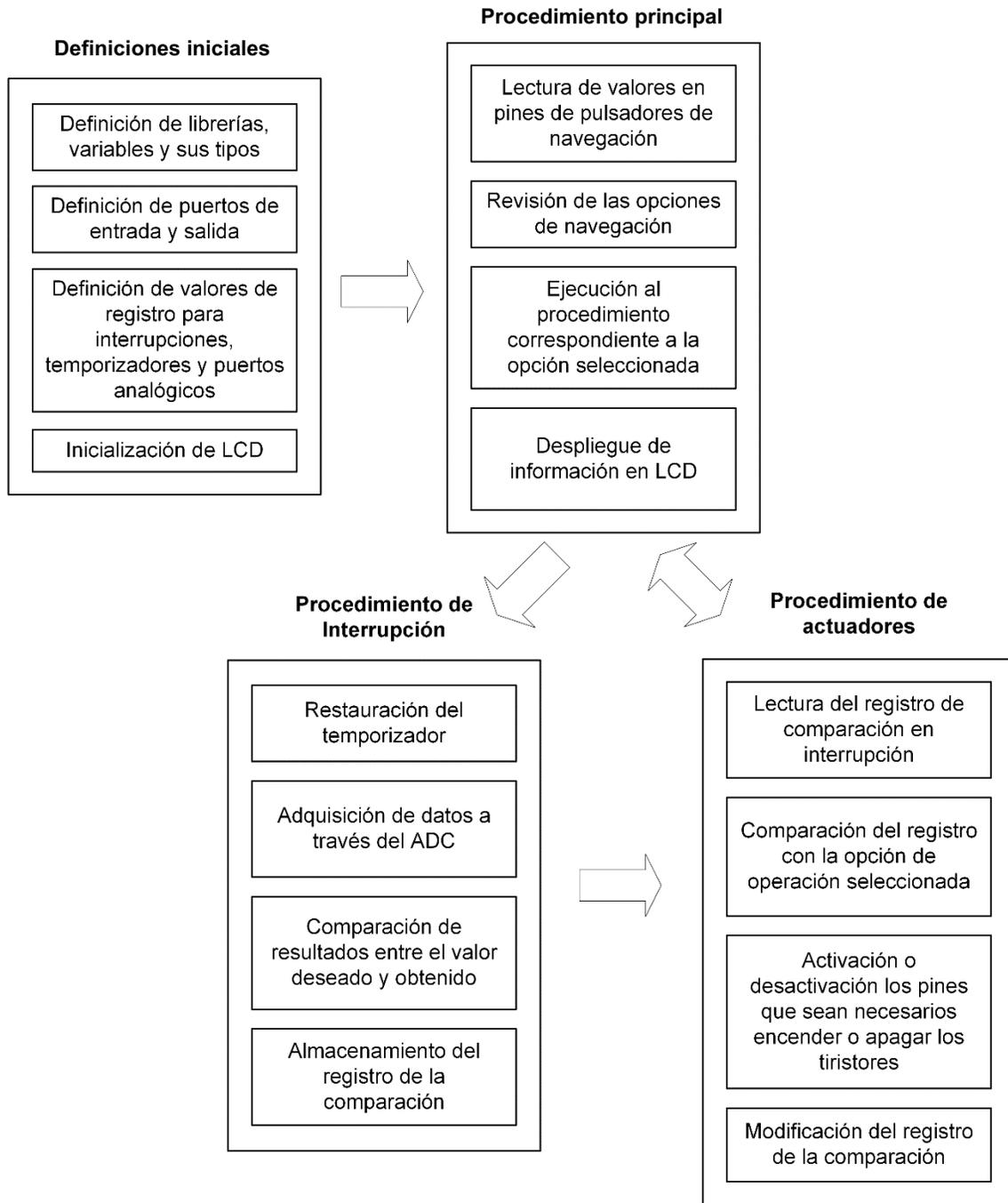
El nombre comercial del entorno de desarrollo integrado es MikroC PRO for PIC®. Aparte de todas las características comunes de cualquier IDE, MikroC PRO for PIC® contiene las informaciones de arquitectura de los microcontroladores PIC (registros, módulos de memoria, funcionamiento de circuitos particulares etc.) para compilar y generar un archivo legible por un microcontrolador PIC®. Además, incluye las herramientas específicas para programar los microcontroladores PIC®.

3.4.2. Estructura de programa para el variador de frecuencia

El programa para el variador de frecuencia consiste en una serie de pasos que deben de ser evaluados en el orden específico para poder obtener los resultados deseados. A continuación, en la figura 25, se propone una estructura de programa que maneja la interfaz de usuario y al cicloconvertidor.

La estructura consta de cuatro segmentos, los cuales se dividen en tres procedimientos y un subprocedimiento. Las definiciones iniciales son de suma importancia en la programación, pues en el lenguaje MikroC se requiere que se definan todos los parámetros iniciales y las librerías a utilizar. Asimismo, los registros que se utilizan son claves al momento de la puesta en marcha del microcontrolador. Si los registros no son definidos adecuadamente, el microcontrolador no funcionará de la manera debida.

Figura 25. Estructura de programa para variador de frecuencia



Fuente: elaboración propia.

El procedimiento principal es el primero que corre por defecto en todo programa escrito en MikroC. Aquí se realizan las lecturas de los puertos para que el usuario pueda seleccionar los modos de operación del variador de frecuencia. Asimismo, se despliega la información importante en la LCD. El procedimiento de interrupción es el que actúa cuando se activa la interrupción por temporización. El valor del temporizador viene directamente relacionado con la frecuencia de operación que el usuario haya elegido. Aquí también se guarda el registro de la secuencia y el valor de la forma de onda para la comparación, con valores fijos establecidos previamente, y de esta manera poder definir si actúan los tiristores o no.

Finalmente se encuentra el procedimiento de actuadores, el cual cumple con la función de encender o apagar los tiristores según sea necesario, con el objetivo de variar la frecuencia de voltaje en la salida del cicloconvertidor.

4. COMPARACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA DISEÑADO CON LOS EXISTENTES EN EL MERCADO ACTUAL DE GUATEMALA

En la industria guatemalteca se encuentran diversos tipos de motores eléctricos, los cuales son fundamentales para que opere cualquier línea de producción industrial y manufacturera. Incluso, la aplicación de los motores eléctricos se entiende más allá de las aplicaciones industriales y se encuentran presentes en muchos dispositivos domésticos, tales como las bombas de agua y en el mecanismo de apertura de puertas y portones automáticos.

En muchas de las aplicaciones antes descritas se utilizan variadores de frecuencia para que puedan operar según el requerimiento de la aplicación, sin embargo, en la industria es donde se percibe un mayor impacto económico, pues los variadores de frecuencia comerciales son de alto costo y por lo regular no se aprovechan todas las prestaciones y características de dichos dispositivos. Por esto es que en algunas ocasiones se opta por no utilizar ninguno, ya que debido al costo del sistema no es rentable colocarle un variador de frecuencia a un motor cuyo costo es menor que el costo de dicho variador, pues sería más fácil reemplazar el motor al momento de quedar inutilizable.

En algunos casos, se busca un variador de frecuencia que sea básico, que cumpla con las funciones elementales y que sea de bajo costo, por lo que el variador de frecuencia propuesto en este trabajo es el que comienza a considerarse como solución, debido a las prestaciones y características. A continuación se realiza la descripción de tres variadores de frecuencia que se utilizan para un tipo de aplicaciones similares con el objeto de poder realizar una

comparación, obtener ventajas y desventajas del variador de frecuencia presentado y los demás disponibles comercialmente.

4.1. Variadores de frecuencia comerciales: descripción, marcas y características

Actualmente en el mercado guatemalteco existe una gran familia de variadores de frecuencia que abarca una gran variedad de aplicaciones, donde cada modelo está diseñado específicamente para un escenario de operación. Las aplicaciones van desde el control de motores monofásicos de baja potencia hasta el control de motores trifásicos de alta potencia. Asimismo, los precios de los mismos son elevados, pues cuentan con sistemas sofisticados que tienen un circuito de control y actuadores complejos. Sin embargo, muchas veces los motores no requieren tantas prestaciones del variador de frecuencia, lo cual hace que se opte por no utilizarlo.

A continuación se presentarán tres variadores de frecuencia con los respectivos modelos, ya que son algunos de los que se utilizan frecuentemente en la industria guatemalteca. Se presentan las características de operación, las cuales serán objeto de comparación con las del variador de frecuencia de bajo costo propuesto.

- Siemens 6SE 6440 2UC24-0CA1: pertenece a la serie MICROMASTER 440, y fue diseñada especialmente para las aplicaciones que requieran una funcionalidad amplia y respuesta dinámica. Cuenta con un control vectorial, tiene una respuesta rápida y tiene la capacidad de encontrar posiciones sin utilizar un codificador de posición, adicional a esto, tiene un control de flujo de corriente. Además, cuida la relación voltaje/frecuencia y es parametrizable. También cuenta con un circuito *chopper* que sirve

como freno, incluso con rampas de frenado cortas, puede manejar potencias desde los 0,16 HP hasta los 350 HP. Cuenta con varias interfaces de comunicación que garantizan la operación con las aplicaciones de red más comunes.

- Telemecanique ATV312: es un inversor de frecuencia para motores desde 200 VAC hasta 600 VAC trifásicos. El rango de potencia va desde ¼ HP hasta 20 HP. Es compacto y fácil de utilizar. Tiene funciones preestablecidas que son fáciles de implementar en soluciones simples. Este variador de frecuencia tiene seis entradas digitales y tres analógicas, una salida digital/analógica y dos salidas de conmutador. Cuentan con una protección de motor y controlador, con rampa de aceleración lineal o especial, control local de velocidad, regulador proporcional e integral, secuencia de frenado, configuración de parada y memoria para guardar las configuraciones. El rango de frecuencia es de 0,5 Hz hasta 500 Hz.
- ABB ACS355: es un variador de frecuencia de rápida puesta en funcionamiento gracias a las macros de aplicación y a los asistentes de paneles. Cuenta con una función Safe torque off y cuenta con un control vectorial sin sensores para motores de hasta 599 Hz. Cuenta con un *chopper* de frenado integrado. Utiliza un voltaje trifásico simétrico hasta de 480 VAC. Tienen protección para corto circuito tanto en la entrada como en la salida según normas IEC y UL. La frecuencia de operación es de 0 a 600 Hz con una resolución de frecuencia de 0,01 Hz.

Como se puede notar, los variadores de frecuencia son dispositivos robustos con muchas funciones y protecciones que mejoran y optimizan el funcionamiento de los motores eléctricos, sin embargo cuentan con opciones que no se utilizan siempre en la industria, como la velocidad rápida de respuesta, la alta resolución de frecuencia de operación y las interfaces de comunicación, por lo tanto el precio es elevado en relación con la aplicación dada.

4.2. Comparación y análisis de características y precios de los variadores de frecuencia comerciales con el de bajo costo

A continuación se presentan, en la tabla II, los costos de los variadores de frecuencia de marcas comerciales en el mercado guatemalteco en el mes de enero de 2014. Con estos precios se pueden visualizar las diferencias entre las funcionalidades y prestaciones. Cabe agregar que en estos precios influye mucho el prestigio, la experiencia en fabricación y diseño, el soporte y el garantía de cada marca, lo que hace que el variador de frecuencia marca Siemens sea el más caro.

El variador de frecuencia diseñado en el presente documento está hecho con base en los componentes que poseen un costo bajo. A continuación, en la tabla III, se detalla el precio final aproximado del variador de frecuencia propuesto. Dichos precios son unitarios, por lo tanto el costo es mayor, ya que si se pudiera producir en serie, los precios bajarían por los grandes volúmenes de compra de los componentes.

Tabla II. **Costos de variadores de frecuencia comerciales**

Variador de Frecuencia	Precio (\$)
Siemens 6SE 6440 2UC24-0CA1	830,00
Telemecanique ATV312	500,00
ABB ACS355	460,00

Fuente: Grupo de ingeniería y desarrollo de Guatemala, S. A. Consulta: 10 de enero de 2014.

Tabla III. **Detalle de precios del variador de frecuencia propuesto**

Cantidad	Componente	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Microchip PIC®18F4520	4,56	4,56
2	STMicroelectronics TL084	0,59	1,18
18	NXP Semiconductors BT151-800R	0,78	14,04
18	Fairchild Semiconductor FOD4218	3,21	57,78
1	LCD de 20x2 (Genérica)	4,68	4,68
4	Pulsadores normalmente abiertos (Genéricos)	0,35	1,40
60	Resistencias varios valores (Genéricas)	0,0328	1,97
1	Cristal de 20 MHz	0,81	0,81
1	Elaboración y soldadura del circuito impreso en placa de cobre	29,99	29,99
1	Terminales de conexión (6 posiciones)	9,03	9,03
1	Fuente de poder, bipolar ± 12 V 1 A (genérica)	31,58	31,58
Total:			157,02

Fuente: Grupo de ingeniería y desarrollo de Guatemala, S. A. Consulta: 14 de enero de 2014.

Al valor total se le agrega el costo de fabricación y soporte, lo cual da un total de \$250,00. Asimismo, en este precio se incluye una garantía y soporte de 6 meses. Debe de considerarse que el costo unitario puede bajar a mayor cantidad de variadores de frecuencia fabricados.

Se puede notar que es muy marcada la diferencia entre los costos de los variadores de frecuencia comerciales con el que se presenta. Sin embargo, la decisión acerca de cuál utilizar tendría que ser basada en cuanto a la funcionalidad y la aplicación para la cual se requiera.

Según las características ya presentadas de los variadores de frecuencia comerciales, se puede decir que las características de frenado y control de torque son claves en los variadores de frecuencia comerciales, pues el presentado en este documento no cuenta con dichas funciones. Además, el variador de frecuencia propuesto en este trabajo no cuenta con saltos de frecuencia muy seguidos y las frecuencias son limitadas a 20 Hz, 15 Hz y 10 Hz. Sin embargo, estas frecuencias son ideales para aplicaciones básicas y que no requieran de controles más específicos y especiales.

4.3. Ventajas y desventajas del variador de frecuencia de bajo costo

El variador de frecuencia propuesto presenta las siguientes ventajas, tomando en cuenta el bajo precio, al momento de implementarlo como sustitución de los variadores comerciales:

- Regula, de forma sencilla, la velocidad de operación de un motor trifásico síncrono.
- Cuenta con una excelente precisión en la variación de frecuencia debido al controlador digital, el PIC®18F4520.
- Posee una interfaz fácil e intuitiva que permite que el personal técnico pueda utilizarlo sin problemas. No se requiere capacitación de larga duración para la configuración y puesta en marcha.
- Los elementos que se utilizan en la construcción del variador de frecuencia tienen una larga vida útil, debido a que son elementos de estado sólido.

- El variador de frecuencia es confiable y seguro, pues el circuito de control y procesamiento de datos se encuentra totalmente aislado del circuito de actuadores y potencia.
- El variador de frecuencia hace más eficiente al motor, lo que se traduce en un ahorro energético y de costos de operación, por lo que la recuperación de la inversión es a corto plazo.

Sin embargo, el variador de frecuencia presenta ciertas desventajas, las cuales se exponen a continuación:

- El variador de frecuencia no cuenta con un sistema de frenado especializado para detener la marcha del motor.
- La frecuencia de operación se limita a cuatro valores
- No cuenta con un sistema vectorial de posición
- No permite guardar perfiles de operación y configuración específicos para diversas aplicaciones.

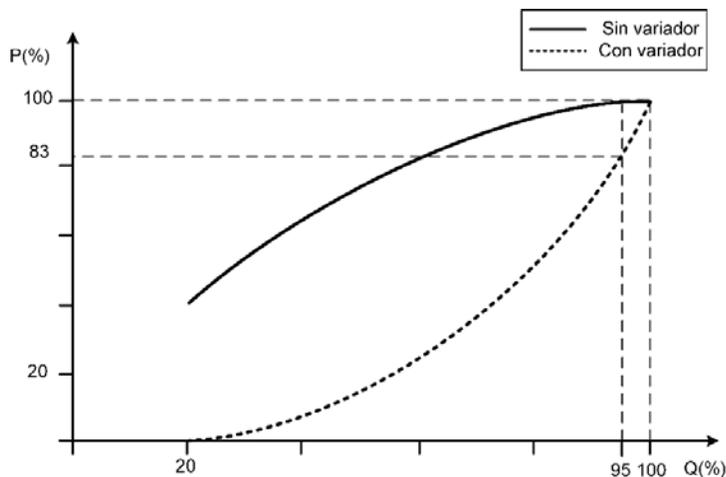
Las desventajas presentadas pueden ser compensadas por el precio que este posee, ya que el costo es mucho menor que el costo del variador de frecuencia comercial más barato. Además, el variador de frecuencia de bajo costo cuenta con todo lo necesario para poder controlar y regular básicamente el funcionamiento de un motor trifásico síncrono, por lo tanto se convierte en una excelente opción para la aplicación en las industrias pequeñas y medianas que existen en Guatemala.

4.3.1. Análisis de la eficiencia y ahorro energético al utilizar un variador de frecuencia

El variador de frecuencia ayuda a optimizar la eficiencia de un motor haciendo que pueda aprovechar de una mejor manera la energía eléctrica con la que se está alimentando. Para esto se propone el siguiente análisis, en el cual se calcula el ahorro anual en energía eléctrica que se obtiene al emplear el variador de frecuencia.

Se dispone de un motor que funciona como ventilador, el cual tiene una potencia nominal máxima de 3 HP, esto es aproximadamente 2,24 kW. La eficiencia de dicho ventilador se estima en un 0,95 a velocidad nominal. Asimismo, se tiene que el rendimiento máximo se obtiene cuando la demanda del flujo es del 95 %. La figura 26 muestra la gráfica del consumo de potencia del motor en función de la demanda del motor.

Figura 26. Gráfica de ejemplo de eficiencia y ahorro energético



Fuente: SCHNEIDER ELECTRIC. *Soluciones y ahorro de energía con variadores de velocidad.* p. 14.

Para el cálculo de la potencia real consumida sin el variador de frecuencia se utiliza la siguiente relación:

$$P_R = \frac{1}{\eta_m} \cdot P_n \cdot P(Q)$$

Donde P_R significa la potencia real consumida, η_m significa la eficiencia del motor, P_n la potencia nominal y $P(Q)$ significa la potencia en función de la demanda del flujo de trabajo del motor.

Sustituyendo los valores de η_m por 0,95, P_n por 2,24 kW y $P(Q)$ por 1, se tiene un resultado de 2,36 kW de potencia real consumida.

Ahora, para calcular la potencia real consumida al momento de utilizar el motor con el variador de frecuencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_R = \frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{1}{\eta_v} \cdot P_n \cdot P(Q)$$

Donde el término η_v significa la eficiencia del variador de frecuencia, la cual se estima en un valor de 0,97. Debido a que estos sistemas están en serie, la eficiencia del sistema motor-variador es el producto de las eficiencias individuales del motor y la del variador de frecuencia, dando como resultado la cantidad:

$$\eta_s = \eta_m \cdot \eta_v$$

Además, la cantidad $P(Q)$ se reduce al valor de 0,83, según lo que se observa en la figura 26. Finalmente se obtiene que el consumo de potencia real, utilizando el variador de frecuencia, es de 2,02 kW.

Si se toman en cuenta que el motor opera 12 horas diarias durante 1 año, se tiene que el consumo es de 10 336,8 kWh sin utilizar el variador de frecuencia y de 8 847,6 kWh con el variador de frecuencia. Para el 4 de febrero de 2014, el costo es de \$0,2255 por cada kWh consumido, dato que se obtuvo de la página web de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala. En la tabla IV se muestran los costos de operación anual.

Tabla IV. **Costos de operación anual del ventilador**

Utilización del variador de frecuencia	Costo (\$)
No	2 330,95
Si	1 995,13
Diferencia	335,82

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar, según la tabla IV, que la inversión se recupera en menos de un año, haciendo rentable el uso de este variador de frecuencia, asimismo, se nota que el ahorro energético es del 14 %. Si la demanda del motor es menor, se pueden lograr un mayor porcentaje de ahorro.

CONCLUSIONES

1. Los motores eléctricos pueden ser controlados por medio de dispositivos electrónicos que regulan la velocidad o frecuencia de operación de dichos motores.
2. Con la utilización de variadores de frecuencia se alcanza una optimización del rendimiento del motor eléctrico que controla, se prolonga la vida de operación y se obtiene un ahorro energético.
3. Los cicloconvertidores son utilizados como variadores de frecuencia con los cuales se obtienen valores de frecuencia bajos.
4. Los elementos que se utilizan en la construcción de los cicloconvertidores son dispositivos semiconductores, por lo que el control es sencillo, la vida útil es larga y el mantenimiento es bajo.
5. El microcontrolador PIC®18F4520 es un dispositivo electrónico digital que simplifica el control del cicloconvertidor utilizado en el variador de frecuencia.
6. El microcontrolador PIC®18F4520 posee una arquitectura de procesamiento digital que es programable según las necesidades de la aplicación y es capaz de procesar información a alta velocidad.

7. El microcontrolador PIC®18F4520 tiene la capacidad de manejar diferentes dispositivos periféricos de entrada y de salida con las respectivas interfaces de acoplamiento.
8. El variador de frecuencia presenta un diseño robusto que es confiable y preciso, porque utiliza un elemento de control que es digital, así como transductores de entrada, interfaces de acoplamiento y actuadores que son de estado sólido.
9. El variador de frecuencia diseñado es una excelente opción para la aplicación en la industria, ya que cuenta con las características necesarias para el control de la operación de cualquier motor trifásico síncrono de hasta 5 HP y el costo es mucho más bajo que los variadores de frecuencia comerciales disponibles en Guatemala.
10. El retorno de la inversión realizada en la aplicación del variador de frecuencia propuesto es recuperable en menos de un año, por lo que lo hace una opción muy rentable y representa un gran ahorro energético.

RECOMENDACIONES

1. En la implementación de todo proyecto debe considerarse la instalación de un variador de frecuencia con los motores requeridos, ya que el variador de frecuencia mejora el rendimiento y hace que el sistema eléctrico sea más eficiente.
2. Antes de implementar el variador de frecuencia se debe realizar un mantenimiento preventivo al motor eléctrico para asegurarse que está en buen estado y así pueda incrementarse la eficiencia y ahorro energético.
3. Antes de conectar el variador de frecuencia a la red de suministro de potencia se deben considerar los valores de voltaje y corriente máximos con los que funciona la máquina, pues si se exceden los valores permitidos por el variador de frecuencia presentado se puede causar daños irreparables al dispositivo y se pone en peligro al operador.
4. Previo a la implementación del variador de frecuencia presentado se debe verificar si el valor de frecuencia de operación requerida para el motor eléctrico coincide con algún valor de frecuencia preestablecido en el variador de frecuencia.
5. Se puede utilizar un microcontrolador de mayor rendimiento que maneje distintos protocolos de comunicación para poder establecer un enlace con el variador de frecuencia, para permitir su manipulación remota e informar acerca del estado operativo del motor que controla. Nótese que esta aplicación incrementa el costo del variador de frecuencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *User's Manuals ACS355 Drives* [en línea]. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/564c7725c9b9c655c1257b88001f39ba/\\$file/EN_ACS355_UM_Rev_B_screes.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/564c7725c9b9c655c1257b88001f39ba/$file/EN_ACS355_UM_Rev_B_screes.pdf)>. [Consulta: 11 de enero de 2014].
2. BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Mendoza, Carlos (trad.); Suárez, Agustín (rev. tec.). 8a ed. México: Pearson Educación, Prentice-Hall, 2003. 1040 p. ISBN: 970-26-0436-2
3. FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. Belza, Enrique (trad.); Enseñat, Alfonso (rev. Tec.). 2a ed. México, D.F.: Eeditia Mexicana. 1984. 587 p. ISBN 84-255-0562-3.
4. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5a ed. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003. 757 p. ISBN: 84-481-3913-5.
5. GUALDA, Juan; MARTÍNEZ, Salvador; MARTÍNEZ, Pedro. *Electrónica industrial: técnicas de potencia*. 2a ed. Barcelona, España: Alfaomega – Marcombo, S.A. 1992. 477 p. ISBN: 968-6223-82-7

6. MIKROELEKTRONIKA. *Programación de los microcontroladores - Microcontroladores PIC* [en línea]. <<http://www.mikroe.com/chapters/view/80/capitulo-2-programacion-de-los-microcontroladores>> [Consulta: 6 de enero de 2014].
7. OZPINECI, Burak; TOLBERT, Leon M. *Cycloconverters* [en línea]. Universidad de Tennessee-Knoxville, Estados Unidos. <<http://www.uv.es/~emaset/iep00/cycloconvertertutorial.pdf>> [Consulta: 14 de agosto de 2013].
8. SCHNEIDER-ELECTRIC. *Altivar 312 Variadores de velocidad* [en línea]. <<http://www.schneider-electric.com.ar/documents/local/guia-de-programacion-tv312.pdf>>. [Consulta: 11 de enero de 2014].
9. _____. *Soluciones y Ahorro de Energía con Variadores de Velocidad* [en línea]. Disponible en web: <<http://www.schneider-electric.com.co/documents/press-release/soluciones-y-ahorro-de-energia-con-variadores-de-velocidad.pdf>>. [Consulta: 5 de febrero de 2014].
10. SIEMENS. *Micromaster 420/430/440* [en línea]. <http://cache.automation.siemens.com/dnl/Tk/Tk2Mjl3NwAA_38644522_HB/mm4-combined-gsg-a5e02455414a-0309.pdf> [Consulta: 11 de enero de 2014].
11. VALDES PEREZ, Fernando; PALLAS, Ramón. *Microcontroladores: Fundamentos y Aplicaciones con PIC*. España: Alfaomega - Marcombo. 2007. 344 p.

ANEXOS

I. Hoja de datos BT151-800R

NXP Semiconductors

BT151-800R

SCR, 12 A, 15mA, 800 V, SOT78

4. Limiting values

Table 4. Limiting values
In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Max	Unit
V _{DRM}	repetitive peak off-state voltage		-	800	V
V _{RRM}	repetitive peak reverse voltage		-	800	V
I _{T(AV)}	average on-state current	half sine wave; T _{mb} ≤ 109 °C; see Figure 3	-	7.5	A
I _{T(RMS)}	RMS on-state current	half sine wave; T _{mb} ≤ 109 °C; see Figure 1; see Figure 2	-	12	A
di _T /dt	rate of rise of on-state current	I _T = 20 A; I _G = 50 mA; di _G /dt = 50 mA/μs	-	50	A/μs
I _{GM}	peak gate current		-	2	A
P _{GM}	peak gate power		-	5	W
T _{stg}	storage temperature		-40	150	°C
T _j	junction temperature		-	125	°C
I _{TSM}	non-repetitive peak on-state current	half sine wave; t _p = 8.3 ms; T _{j(initial)} = 25 °C	-	132	A
		half sine wave; t _p = 10 ms; T _{j(initial)} = 25 °C; see Figure 4; see Figure 5	-	120	A
I ² t	I ² t for fusing	t _p = 10 ms; sine-wave pulse	-	72	A ² s
P _{G(AV)}	average gate power	over any 20 ms period	-	0.5	W
V _{RGM}	peak reverse gate voltage		-	5	V

Fuente: NXP SEMICONDUCTORS. BT151-800R Datasheet.

http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT151-800R.pdf. Consulta: 20 de diciembre de 2013.

II. Hoja de datos TL-084

Symbol	Parameter	TL084/AI/AC/BI/BC			TL084C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
t_r	Rise time $V_{in} = 20 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, unity gain		0.1			0.1		μs
K_{ov}	Overshoot $V_{in} = 20 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, unity gain		10			10		%
GBP	Gain bandwidth product $V_{in} = 10 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, $F = 100 \text{ kHz}$	2.5	4		2.5	4		MHz
R_i	Input resistance		10^{12}			10^{12}		Ω
THD	Total harmonic distortion $F = 1 \text{ kHz}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, $A_v = 20 \text{ dB}$, $V_o = 2 V_{pp}$)		0.01			0.01		%
e_n	Equivalent input noise voltage $R_S = 100 \Omega$, $F = 1 \text{ kHz}$		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase margin		45			45		degrees
V_{o1}/V_{o2}	Channel separation $A_v = 100$		120			120		dB

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}	Supply voltage ⁽¹⁾	± 18	V
V_{in}	Input voltage ⁽²⁾	± 15	
V_{id}	Differential input voltage ⁽³⁾	± 30	

Fuente: STMICROELECTRONICS . TL-084 Datasheet.

<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000493.pdf>.

Consulta: 20 de diciembre de 2013.

III. Hoja de datos FOD4218

Absolute Maximum Ratings ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only.

Symbol	Parameters	Device	Value	Units
TOTAL DEVICE				
T_{STG}	Storage Temperature	All	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
T_{OPR}	Operating Temperature	All	-55 to +100	$^\circ\text{C}$
T_{SOL}	Lead Solder Temperature (Wave)	All	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
T_J	Junction Temperature Range	All	125	$^\circ\text{C}$
V_{ISO}	Isolation Test Voltage ⁽¹⁾ (rms AC voltage, 60Hz, 1 min. duration)	All	5000	Vac(rms)
P_{DTOTAL}	Total Device Power Dissipation @ 25°C Derate above 40°C	All	500	mW
			6.6	mW/ $^\circ\text{C}$
EMITTER				
I_F	Continuous Forward Current	All	30	mA
V_R	Reverse Voltage	All	6	V
P_{DE}	Total Power Dissipation 25°C Ambient Derate above 40°C	All	50	mW
			0.71	mW/ $^\circ\text{C}$
DETECTOR				
V_{DRM}	Off-State Output Terminal Voltage	FOD420, FOD4216	600	V
		FOD4208, FOD4218	800	
I_{TSM}	Peak Non-Repetitive Surge Current (single cycle 60Hz sine wave)	All	3	A
I_{TM}	Peak On-State Current	All	300	mA
P_{DDET}	Total Power Dissipation @ 25°C Ambient Derate above 40°C	All	450	mW
			5.9	mW/ $^\circ\text{C}$

Fuente: FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. FOD4218 Datasheet.

<https://www.fairchildsemi.com/ds/FO/FOD4216.pdf>. Consulta: 20 de diciembre de 2013.