



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA
ELECTRICA

DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL DE
UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS
EN CONEXION ESTRELLA UTILIZANDO UN
MICROCONTROLADOR

TRABAJO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA

IVAN MARTINEZ BARRIENTOS

ASESOR

ING. FELIX JIMENEZ PEREZ

MORELIA, MICHOACAN, ENERO DE 2009



AGRADECIMIENTOS

A dios por permitirme llegar hasta donde estoy y permitir superarme y terminar mi carrera.

A mis padres, hermanos y toda mi familia por el apoyo que me han brindado desde el día que llegue a esta institución, a ellos les dedico este trabajo.

A mi asesor el Ing. Félix Jiménez Pérez por la paciencia y el apoyo para llevar a cabo este trabajo.

A la U.M.S.N.H. por educarme y crear en mi el espíritu nicolaita.

A mi esposa Gabriela Juárez González por ser un pilar y un apoyo en la toma de mis decisiones.

RESUMEN

Al inicio del trabajo se hace una comparación entre los motores de combustión interna y los motores eléctricos, para mencionar algunas de las ventajas y desventajas que tienen unos sobre otros.

El motor de corriente directa sin escobillas en la actualidad son los motores utilizados en las unidades de discos compactos y DVD de las computadoras, son utilizados para pequeños ventiladores, como motores auxiliares en vehículos híbridos y en pequeños aeroplanos, además de estar ganando popularidad en otras áreas.

Debido a lo anterior es que surgió la inquietud de llevar a cabo una investigación para obtener información de su funcionamiento y realizar un prototipo que lleve a cabo un control adecuado del mismo.

La forma de llevar a cabo el control del motor será mediante un microcontrolador el cual controla un inversor trifásico que alimenta al motor además de que a través de los sensores de efecto Hall llevara a cabo la conmutación adecuada.

El microcontrolador que se utiliza será el PIC16F877 el cual cumple con los requerimientos para el prototipo además de ser barato y fácil de conseguir.

La forma de llegar al prototipo final fue mediante la acumulación de información del motor y posteriormente aplicando pruebas para corroborar la información obtenida en la investigación.

Al final del trabajo se muestra la figura en la que se puede observar como quedo el prototipo al final de las pruebas y es la que se quedara en el laboratorio de electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la U.M.S.N.H.

CONTENIDO

Resumen	ii
----------------	---------

Capítulo 1

Introducción

1.1	Antecedentes, Descripción General del Problema.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Justificación	2
1.4	Metodología	3
1.5	Contenido de la tesis	3

Capítulo 2

Tipos de motores

2.1	Motores de combustión interna	4
2.1.1	Cámara de combustión	4
2.1.2	Encendido	4
2.1.3	Refrigeración	5
2.1.4	Sistema de arranque	5
2.2	Diferentes tipos de motores de combustión interna	5
2.2.1	Motor convencional tipo Otto	6
2.2.2	Motor Diesel	6
2.2.3	Motor Wankel	7
2.3	Motores eléctricos	8
2.3.1	Principio de Funcionamiento de un motor eléctrico.....	8
2.3.2	Ventajas sobre los motores de combustión interna	9
2.4	Clasificación de los motores Eléctricos	10
2.4.1	Motor asíncrono (de Inducción).....	10
2.4.2	Maquina síncrona.....	12
2.4.3	Motor de CD	14

Capítulo 3

Motor BLDC y elementos auxiliares

3.1	Teoría de operación del BLDC	19
3.2	Características Par/Velocidad del motor BLDC.....	25
3.3	Comparación del BLDC con otros motores	25
3.4	Inversores	27
3.4.1	Parámetros de rendimiento	28
3.4.2	Inversores trifásicos.....	29
3.4.2.1	Conducción a 180 ⁰	30
3.4.2.2	Conducción a 120 ⁰	30
3.5	Efecto Hall	31
3.5.1	Sensores efecto Hall	32
3.6	El microcontrolador PIC16F877	33
3.6.1	La familia del PIC16F877.....	33
3.6.2	Variantes principales	34
3.6.3	Empaquetados	34
3.6.4	Características generales del PIC16f877	35
3.6.5	Periféricos	36
3.6.5.1	El PORTA y registro TRISA	37
3.6.5.2	El PORTC y registro TRISC	38
3.6.5.3	El PORTD y registro TRISD.....	39
3.6.5.4	El PORTE y registro TRISE	40
3.6.6	Modulo convertidor analógico a digital(A/D)	41
3.6.7	Diagrama de bloques del PIC16F877	42
3.7	Modo PWM del Microcontrolador	43
3.7.1	Modulación del ancho de pulso (PWM).....	43

Capítulo 4

Sistema desarrollado y pruebas efectuadas

4.1	Prueba 1 Alimentación de las bobinas mediante 3 interruptores de 3 estados.....	44
4.2	Prueba 2 Alimentación de las bobinas del motor utilizando el microcontrolador.....	48
4.3	Prueba 3 Pruebas aplicadas a los sensores efecto Hall.....	51
4.4	Prueba 4 Prueba final conjuntando todos los elementos del control.....	54

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1	Conclusiones.....	64
5.2	Trabajos futuros.....	65

APÉNDICES

APÉNDICE A: CODIGO DE LA PRUEBA 2.....	66
APÉNDICE B: CODIGO PRUEBA FINAL	67
APÉNDICE C: HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR TIP 120.....	70
APÉNDICE D: HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR TIP 125.....	71
APÉNDICE E: DIAGRAMA LÓGICO DEL CIRCUITO TC4469.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73

LISTA DE FIGURAS

2.1 Rotor del motor Wankel.....	7
2.2 Dirección de la fuerza que actúa sobre el conductor.....	9
2.3 Fuerza en ángulos rectos.....	9
2.4 Motor jaula de ardilla.....	11
2.5 Partes del motor síncrono.....	13
2.6 Construcción del motor de CD.....	15
2.7 Diferentes tipos de de devanados.....	15
2.8 Formas de conexión de la maquina de CD.....	16
2.9 Esquema del motor de CD.....	17
3.1 Diagrama simplificado del BLDC y conexión de sus bobinas.....	20
3.2 Fotografía del motor utilizado y de sus bobinas.....	20
3.3 Diagrama a bloques del control del motor BLDC.....	21
3.4 Esquema de conexión del motor BLDC y el conmutador electrónico.....	21
3.5 Circuito equivalente del motor BLDC.....	23
3.6 Diagrama que muestra la secuencia de la alimentación de las bobinas, salida de los sensores, corriente de fase, Par generado y FEM de cada bobina.....	24
3.7 Características Par/Velocidad del BLDC.....	25
3.8 Inversor trifásico.....	30
3.9 Ejemplo de la agrupación de portadores de carga en un material conductor debido al efecto Hall.....	32
3.10 Diferentes empaquetados de los microcontroladores.....	35
3.11 Diagrama a bloques del microcontrolador PIC16F877.....	42

3.12	Variación de ancho de pulso a diferentes ciclos de trabajo.....	43
4.1	Paso 1 de la secuencia para que el motor gire en sentido horario.....	45
4.2	Paso 2 de la secuencia de alimentación.....	45
4.3	Paso 3 de la secuencia de alimentación.....	46
4.4	Alimentación de las bobinas C hacia A.....	46
4.5	Paso 5 en la secuencia de alimentación en el orden correcto.....	47
4.6	Ultimo paso en la secuencia de alimentación.....	47
4.7	Diagrama de los <i>drivers</i> de los transistores.....	48
4.8	Diagrama simplificado de la programación del microcontrolador para la prueba 2.....	50
4.9	Diagrama esquemático de acondicionamiento de la señal.....	52
4.10	Señales de los sensores de efecto Hall monitoreadas por el osciloscopio.....	53
4.11	Circuito auxiliar de los sensores efecto Hall.....	53
4.12	Salidas monitoreadas por el osciloscopio entregadas por el circuito implementado para los sensores.....	54
4.13	Patitas utilizadas del microcontrolador.....	55
4.14	Diagrama esquemático del circuito de potencia para el control del motor....	56
4.15	Forma física del circuito para realizar las pruebas al motor.....	57
4.16	Diagrama a bloques simplificado del programa implementado para el microcontrolador.....	58
4.17	Conexión total mediante la cual se llevo a cabo la prueba.....	59
4.18	Diagrama físico de las conexiones del motor antes de funcionar.....	60
4.19	Diagrama físico y conexiones con el sistema funcionando.....	60

4.20	Señales monitoreadas con un osciloscopio con el sistema en funcionamiento.....	61
4.21	Deformación en la tira de aluminio debido a la velocidad.....	62
4.22	Prototipo terminado.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Comparación entre el BLDC y el motor de CD con escobillas.....	26
Tabla 2 Comparación entre el BLDC y el motor de inducción	26
Tabla 3 subfamilias del Microcontrolador.....	34
Tabla 4 Funciones del PORTA.....	37
Tabla 5 Funciones del PORTC.....	38
Tabla 6 Funciones del PORTD.....	39
Tabla 7 Funciones del PORTE.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

B	Magnitud de la densidad de flujo magnético
$BLDC$	Motor de corriente directa sin escobillas (Brushless DC)
$CD-ROM$	Disco compacto
DF	Factor de distorsión
F	Fuerza
f	Frecuencia de línea(60 Hz)
FEM	Fuerza contra electromotriz
HF_n	Factor armónico correspondiente a la n -ésima armónica
I	Corriente
I_a	Corriente de armadura
I_f	Corriente de campo
i_a	Corriente de armadura instantánea
i_f	Corriente de campo instantánea
l	Conductor de longitud l
LOH	Armónica de menor orden
N	Es el número vueltas de las bobinas
n_s	Velocidad síncrona en RPM
p	Número de polos de un motor
PWM	Pulsos modulados en anchura
r	Radio interior del rotor
s	Deslizamiento
T_e	Par electromagnético
THD	Distorsión armónica total
ω_m	Velocidad angular de la armadura
ω_r	Velocidad del rotor
ω_s	Velocidad síncrona en rad/s
ω_{sl}	Velocidad de deslizamiento

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes, Descripción General del Problema

Michael Faraday (1791-1867), fue el que descubrió el principio del motor eléctrico, a el se le atribuye el descubrimiento de la inducción. Inducción es la generación de una corriente eléctrica en un conductor en movimiento que se encuentra en el interior de un campo magnético, la mayoría de los motores eléctricos tienen alguna relación con este principio.

Los primeros motores eléctricos para su funcionamiento solían tener un colector de delgas o un par de anillos rozantes (escobillas). Estos sistemas que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren demasiado mantenimiento y producen partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que es conductor, lo cual puede llegar a causar fallas en el funcionamiento del sistema.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control es mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controles electrónicos.

Después de los motores asíncronos, fueron creados los motores síncronos, los cuales tenían el mismo método de arranque pero al llegar a la velocidad síncrona dejan de operar como motor de inducción para trabajar como motor síncrono, el motor de corriente directa sin escobillas (BLDC por sus siglas en ingles) se considera un motor síncrono.

Los motores BLDC han derivado de los motores que emplean la unidad de CD-ROM, los discos rígidos y los ventiladores de las computadoras, así como de pequeños aviones, estos motores utilizan solo corriente directa, realmente operados con un convertidor de CD-CA. Son motores trifásicos de alto rendimiento y bajo peso, de hecho esta es la principal motivación para investigar el control de este tipo de motores debido a que en la F.I.E de la U.M.S.N.H no

se cuenta con un prototipo para el control de este tipo de motores y es importante disponer de uno que permita realizar algunas practicas básicas, por que tiene variadas aplicaciones en la actualidad.

Uno de los principales problemas es controlar la velocidad de giro de este motor, aunado a esto, esta el hecho de determinar la forma de funcionar de los sensores de efecto Hall que vienen incorporados al motor, ya que gran parte del buen funcionamiento de este motor esta basado en la implementación y buen funcionamiento de estos sensores, así mediante estos sensores se logra ubicar la posición del rotor, y con esto lograr un funcionamiento adecuado.

1.2 Objetivos

Los objetivos principales son: Explicar el uso, aplicaciones, tipos y manejadores de motores, describir el funcionamiento u operación de un motor BLDC, mencionar el uso de los sensores hall, realizar el control de un BLDC con y sin sensores Hall además de describir sus ventajas y desventajas y principalmente realizar un circuito capaz de controlar la velocidad de un pequeño motor BLDC.

1.3 Justificación

Una de las justificaciones para llevar a cabo este trabajo es debido a que el control de velocidad de este motor guarda un cierto grado de complejidad, ya que usa sensores Hall que vienen incorporados al motor, con los cuales se determina el sentido de giro y la posición de arranque de del rotor, por lo que su implementación requiere de conocimientos y experiencia en varias disciplinas, las cuales serian: Maquinas eléctricas, instrumentación, electrónica de potencia y control, entre otras.

Otro aspecto importante a mencionar es la realización del prototipo que demuestra la interacción que es posible entre las computadoras, los motores, y los microcontroladores, debido a que por este medio será como se controle el motor.

1.4 Metodología

La investigación se llevara a cabo primero haciendo una recopilación de información relacionada con el principio de operación, tipos de control y variantes de motores de CD sin escobillas, del estudio de estas características y formas de control se elegirá un motor para hacer el diseño y la implementación de un control de basado en microcontrolador y el inversor trifásico conectado directamente al motor. Para esta etapa se requiere primeramente llevar a cabo diversos experimentos con el motor que permitan determinar la forma como debe de operar los sensores y la sincronía de las bobinas de operación.

1.5 Contenido de la tesis

Capítulo 1 Introducción. En este capitulo se da una breve introducción a el motor que se va a controlar y de algunos de los objetivos que se pretenden con la realización del prototipo.

Capítulo 2 Tipos de motores. En esta parte se hace una clasificación muy importante de motores de combustión interna y motores eléctricos, se describen brevemente para enseguida establecer una comparación y mencionar algunas notables ventajas que tienen los motores eléctricos.

Capítulo 3 El Motor BLDC y elementos auxiliares. En este capitulo se describe la forma de funcionar del motor BLDC así como de los elementos adicionales que se emplearon para llevara a cabo el control de todo el sistema.

Capítulo 4 Sistema desarrollado y pruebas efectuadas. En este capitulo se muestran todos los diagramas empleados para realizar las pruebas así como de mostrar los diagramas finales, la programación utilizada para llevar a cabo un control adecuado, así como también se muestran algunas imágenes que permiten observar la forma física de las pruebas y del prototipo terminado.

Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros. En este ultimo capitulo se describen las conclusiones que se obtuvieron a lo largo de las pruebas, así como de los trabajos futuros.

Capítulo 2

Tipos de motores

De manera muy general los motores pueden dividirse en 2 grandes grupos

- a) Motores de combustión interna.
- b) Motores Eléctricos.

Dado que el motor de combustión interna sigue siendo muy utilizado en la actualidad no es posible que sea desplazado completamente por el motor eléctrico, ya que cuenta con algunas ventajas sobre este, en la actualidad ya están siendo utilizados de manera conjunta aprovechando las ventajas con las que cuenta cada uno.

A continuación se muestra un pequeño resumen para mostrar la diferencia que existe entre estos 2 tipos de motores.

2.1 Motores de combustión interna

Un motor de combustión interna es un tipo de maquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que es quemado dentro de una cámara de combustión, que es la parte principal de este tipo de motores.

2.1.1 Cámara de combustión

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al interior. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por un eje al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

2.1.2 Encendido

Todos los motores tienen que disponer de una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. Por ejemplo, el sistema de ignición de los motores Otto, existe un componente llamado bobina de encendido, el cual es un auto-transformador de alto voltaje al cual se le conecta un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca la chispa de alto voltaje en el secundario. Dichas chispas están sincronizadas con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; la chispa es dirigida al cilindro específico de la secuencia a través de unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía.

2.1.3 Refrigeración

Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios de automóviles y de aviones y los motores fuera de borda se refrigeran con aire. Los cilindros de los motores que utilizan este sistema cuentan en el exterior con un conjunto de láminas de metal que emiten el calor producido dentro del cilindro. En otros motores se utiliza refrigeración con un líquido especial llamado refrigerante, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de este refrigerante que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El refrigerante se refrigera al pasar por las láminas de un radiador.

2.1.4 Sistema de arranque

Al contrario que los motores y las turbinas de vapor, los motores de combustión interna no producen un par de fuerza cuando arrancan, lo que implica que debe provocarse el movimiento del cigüeñal para que se pueda iniciar el ciclo. Los motores de automoción utilizan un motor eléctrico (el motor de arranque) conectado al cigüeñal por un embrague automático que se desacopla en cuanto arranca el motor. Por otro lado, algunos motores pequeños se arrancan a mano girando el cigüeñal con una cadena o tirando de una cuerda que se enrolla alrededor del volante del cigüeñal.

2.2 Diferentes tipos de motores de combustión interna

No todos los motores de combustión interna trabajan igual, existen algunas diferencias entre ellos, ya sea por el combustible empleado o por el ciclo desarrollado dentro de ellos, a continuación se muestran algunos de los tipos mas importantes de estos motores.

2.2.1 Motor convencional tipo Otto

El motor convencional de tipo Otto es de cuatro tiempos. La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

La eficiencia de este tipo de motores depende del grado de compresión al que trabaje, en la mayoría de los motores Otto modernos la proporción va desde 8 a 1 ó 10 a 1 , pudiendo utilizar una proporción de 12 a 1, pero esto requeriría la utilización de un combustible con un alto grado de octanaje. La eficiencia media de un buen motor Otto es de 20 a un 25% es decir solo la cuarta parte de la energía calorífica es transformada en energía mecánica.

2.2.2 Motor Diesel

El ciclo Diesel difiere del ciclo Otto en que la combustión tiene lugar en este último a volumen constante en lugar de producirse a una presión constante. La mayoría de los motores diesel tienen cuatro tiempos.

En la primera fase se absorbe aire hacia la cámara de combustión. En la segunda fase el aire se comprime a una fracción de su volumen original, lo cual hace que se caliente a aproximadamente 440 °C. Al final de la fase de compresión se inyecta el combustible vaporizado dentro de la cámara de combustión, produciéndose el encendido a causa de la alta temperatura en el aire. En la tercera fase la combustión empuja el pistón hacia atrás, transmitiendo la energía al cigüeñal. La cuarta fase es la fase de expulsión.

La eficiencia de los motores Diesel depende de los mismos factores que los motores Otto, pero este tipo de motores tiene una mayor eficiencia, llegando a superar el 40%, además

utiliza combustibles mas baratos que los del ciclo descrito anteriormente, aunque son mas pesados y mas robustos y tienen una menor velocidad de operación.

2.2.3 Motor Wankel

En la década de 1950, el ingeniero alemán Félix Wankel completó el desarrollo de un motor de combustión interna con un diseño revolucionario, actualmente conocido como Motor Wankel. Utiliza un rotor triangular-lobular dentro de una cámara ovalada, en lugar de un pistón y un cilindro.

La mezcla de combustible y aire es absorbida a través de un orificio de aspiración y queda atrapada entre una de las caras del rotor y la pared de la cámara. La rotación del rotor comprime la mezcla, que se enciende con una bujía. Los gases se expulsan a través de un orificio de expulsión con el movimiento del rotor. El ciclo tiene lugar una vez en cada una de las caras del rotor, produciendo tres fases de potencia en cada giro.

En la Figura 2.1 se muestra de manera ilustrativa cómo es que esta conformado el rotor del motor Wankel:

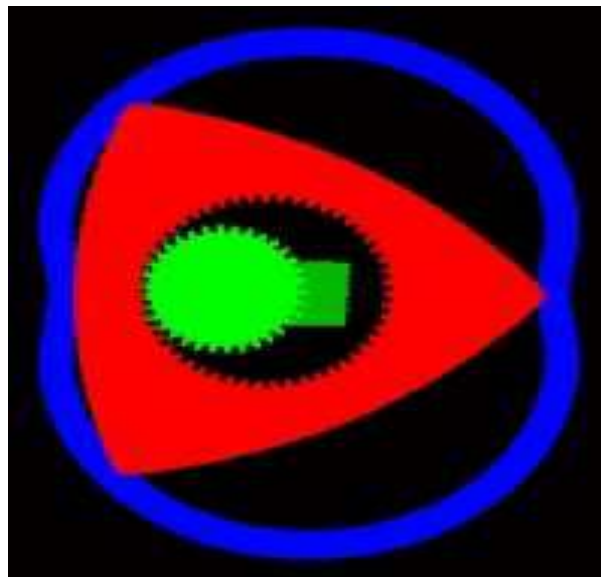


Fig. 2.1 Rotor del motor Wankel

2.3 Motores eléctricos

Un motor eléctrico es un dispositivo rotativo que transforma energía eléctrica en energía mecánica, además en su lado opuesto convierte la energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generador, los motores eléctricos de tracción usados en locomotoras realizan a menudo ambas tareas si se les equipa con frenos dinamo, llamado frenado regenerativo.

2.3.1 Principio de Funcionamiento de un motor eléctrico

Las maquinas eléctricas están constituidas de circuitos eléctricos y magnéticos, acoplados. Por circuito magnético se entiende una trayectoria de flujo magnético, tal como un circuito eléctrico proporciona el camino para la corriente eléctrica. En las maquinas eléctricas, los conductores que llevan la corriente interactúan con los campos magnéticos (provenientes ellos mismos de las corrientes en los conductores o de los magnetos permanentes), produciendo una conversión electromecánica de energía.

Consideremos un conductor de longitud l colocado entre los polos de un imán. Se supone que el conductor lleva una corriente I y que forma un ángulo recto con las líneas de flujo magnético como se muestra en la Figura 2.2. Se encontró experimentalmente que sobre el conductor actuaba una fuerza F , cuya dirección se muestra en la figura 2.3 y cuya magnitud esta dada por:

$$F = IBl \quad (2-1)$$

Aquí, B es la magnitud de la densidad de flujo magnético $\mathbf{B}$, cuya dirección esta dada por las líneas de flujo. La unidad en el sistema SI de $\mathbf{B}$ ó B es el tesla (T). Nótese en (2-1) que B puede definirse como la fuerza por unidad de momento de corriente. (2-1) es un enunciado de la ley de Ampere; el enunciado más general que incluye una orientación arbitraria del conductor respecto a las líneas de flujo es;

$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2-2)$$

Donde $\mathbf{I}$ es un vector de magnitud I en la dirección de la corriente. Nuevamente la fuerza está en ángulos rectos, tanto respecto del conductor, como del campo magnético. La ley de Ampere respecto al desarrollo de la fuerza, o par, proporciona la base de la operación de los motores eléctricos [Syed Nasar 1982].

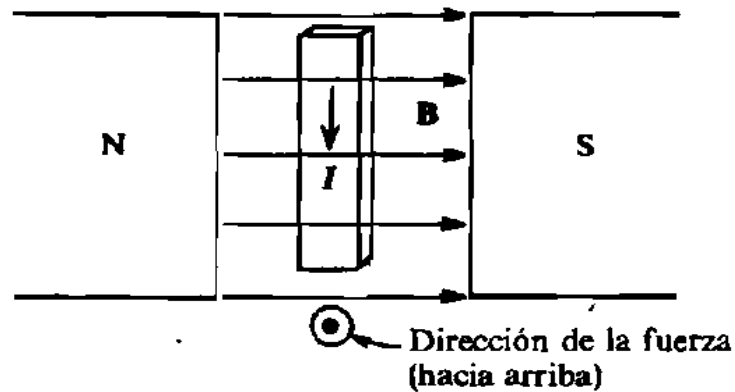


Fig. 2.2 Dirección de la fuerza que actúa sobre el conductor

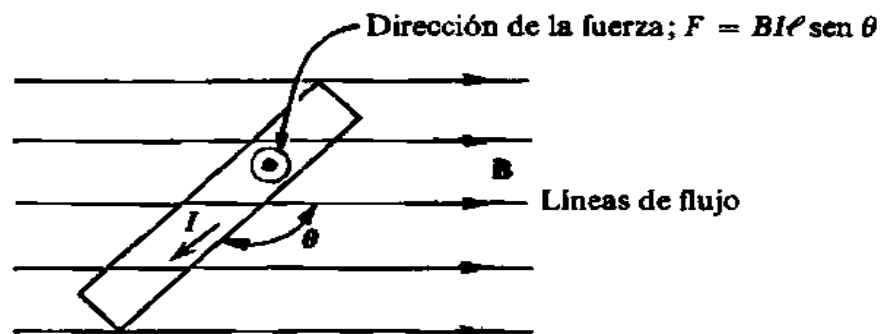


Fig.2.3 Fuerza en ángulos rectos

2.3.2 Ventajas sobre los motores de combustión interna

El hecho de haber realizado un pequeño bosquejo sobre los motores de combustión interna es para describir algunas de las ventajas que tienen los motores eléctricos sobre ese tipo de motores, las cuales y más significativas son las mencionadas a continuación:

- A igual potencia, su tamaño y peso son más reducidos.

- Se pueden construir de cualquier tamaño.
- Tiene un par de giro elevado y, según el tipo de motor, prácticamente constante.
- Su rendimiento es muy elevado (típicamente en torno al 80%, aumentando el mismo a medida que se incrementa la potencia de la máquina).

2.4 Clasificación de los motores Eléctricos

Existen distintos tipos de motores eléctricos los cuales difieren entre ellos, entre otras cosas, de la fuente de alimentación y de la forma de realizar la conmutación que son las principales formas de identificar y de nombrar a estos motores, a continuación se dará una idea general de ellos.

En función de la corriente empleada para la alimentación del motor, que define por completo las características constructivas del mismo, se pueden clasificar los motores en tres grandes grupos:

- a) Motores de corriente continua.
- b) Motores de corriente alterna.
- c) Motores universales (Ambas clases de corriente).

2.4.1 Motor asíncrono (de Inducción)

Como todas las máquinas eléctricas la máquina de inducción consta de una parte fija y una parte móvil llamados estator y rotor respectivamente, los cuales están separados por un pequeño espacio de aire llamado entrehierro, es importante resaltar que estas 3 partes mencionadas son las encargadas de llevar a cabo la conversión de la energía ya que los demás elementos del motor son solo estructurales o de protección [Javier Sanz 2002].

La parte estática (estator) esta formada por un núcleo de chapas magnéticas apiladas y aisladas entre si que aloja un devanado trifásico en las ranuras situadas en su superficie interior. Todas estas ranuras están uniformemente distribuidas a lo largo de la periferia del estator de modo que la distribución de conductores sea idéntica para las tres bobinas del

estator, con la diferencia que los conductores que ocupan posiciones homólogas están desplazados entre si 120° eléctricos [Javier Sanz 2002].

La parte móvil (rotor) esta construido de forma similar al estator a base de chapas magnéticas, pero este tiene la forma de un cilindro con las ranuras que alojan el devanado situadas en su superficie exterior y que también están distribuidas uniformemente. Existen 2 tipos de construcción de este los cuales son: jaula de ardilla y de anillos, en el primer caso los huecos de las ranuras se rellenan de barras de aluminio fundido que se unen en ambos extremos del rotor mediante anillos de cortocircuito adoptando la forma de jaula de ardilla [Javier Sanz 2002].

El rotor de anillos esta formado por un devanado trifásico que es similar al del estator, las tres fases se suelen conectar en estrella y los otros tres extremos libres se conectan a sendos anillos conductores aislados entre si respecto del eje, sobre los que hacen contacto unas escobillas de grafito [Javier Sanz 2002].

En la Figura 2.2 se muestra el motor ya mencionado.



Fig. 2.4 Motor jaula de ardilla.

La velocidad síncrona de este motor en radianes por segundo, alimentado por una frecuencia f y de p polos se puede obtener mediante (2-1):

$$\omega_s = \frac{2\omega}{p} \quad [rad / s] \quad (2-1)$$

Y expresado en revoluciones por minuto (RPM) quedaría de la siguiente manera:

$$n_s = \frac{60\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{p} \quad [RPM] \quad (2-2)$$

Para que exista par debe existir un deslizamiento entre la velocidad del rotor y el flujo del entrehierro esta velocidad es llamada velocidad de deslizamiento (ω_{sl}), definida como:

$$\omega_{sl} = (\omega_s - \omega_r) \quad (2-3)$$

Esta velocidad de deslizamiento normalizada por la velocidad síncrona es llamada “deslizamiento” (s).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2-4)$$

2.4.2 Maquina síncrona

Estos maquinas suelen ser mayormente empleadas en la generación de la electricidad esto debido al hecho de que en muchas ocasiones es necesario entregar potencia activa y potencia reactiva de forma separada y esta es la principal ventaja que tiene respecto de las maquinas asíncronas, ya que estas no entregan esta energía por separado [Javier Sanz 2002].

Una maquina síncrona consta de un estator ranurado que aloja un devanado trifásico que esencialmente no se diferencia del de los motores asíncronos, también consta de un rotor con un *devanado inductor*, del mismo número de polos que los devanados del estator, que tiene la función de crear el campo magnético básico de la maquina, para esto este devanado es alimentado con CD [Javier Sanz 2002].

Para trabajar como motores en el arranque se utilizan devanados de amortiguamiento para alcanzar la velocidad síncrona, mediante la alimentación del devanado del rotor con CD se comienza a trabajar como motor síncrono, es decir este motor funciona en un principio como motor de inducción, para después alimentar el devanado del rotor con CD para comenzar a trabajar como motor síncrono.

En la figura 2.3 se muestran las partes mas importante del motor síncrono, las cuales serian el estator, el rotor, el entrehierro y por supuesto la fuente excitatriz que es la encargada de hacer que al momento de llegar el motor a la velocidad síncrona, opere como motor síncrono.

El funcionamiento de los motores BLDC es muy parecido al de estos motores, una de estas similitudes es el hecho de no tener deslizamiento al momento de funcionar a plena carga, es decir trabajan a la velocidad síncrona. De hecho el BLDC es considerado más un motor síncrono que uno de CD.

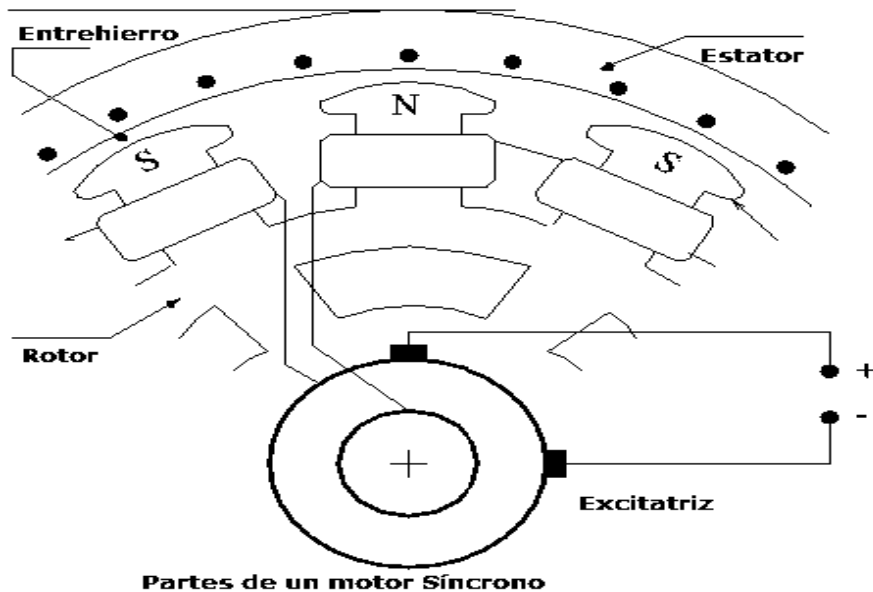


Fig. 2.5 Partes del motor síncrono

La velocidad de rotación del campo o sea la velocidad síncrona, al igual que la que se desarrolla en el motor asíncrono esta dada por:

$$n_s = \frac{60\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{p} \quad [\text{RPM}] \quad (2-2)$$

2.4.3 Motor de CD

A diferencia de las maquinas descritas anteriormente este motor no funciona con la creación de un campo magnético giratorio, es decir son maquinas cuyo campo magnético está fijo en el espacio, siendo generalmente de amplitud constante [Javier Sanz 2002].

La Figura 2.4 muestra algunas de las partes físicas más importantes de una máquina de corriente continua. Los polos de campo, que producen el flujo necesario, se montan en el estator y llevan devanados denominados devanados de campo o bobinas de campo.

Algunas maquinas llevan varios juegos de devanados de campo sobre el mismo núcleo polar. Para facilitar su ensamble, los núcleos de los polos están hechos de láminas de acero. Debido a su proximidad a los devanados de armadura, es necesario que las caras polares sean laminadas.

El núcleo de armadura, que lleva los devanados de armadura, está generalmente en el rotor y está construido de láminas de acero. El conmutador está hecho de delgas de cobre estirado en frío y aisladas una de la otra por medio de mica. Como se muestra en la Figura 2.5, los devanados de armadura están conectados a las delgas del conmutador, sobre los que se deslizan las escobillas de carbón y sirven como terminales para conexiones eléctricas. El devanado de armadura es el devanado que se soporta la carga [Syed Nasar 1982].

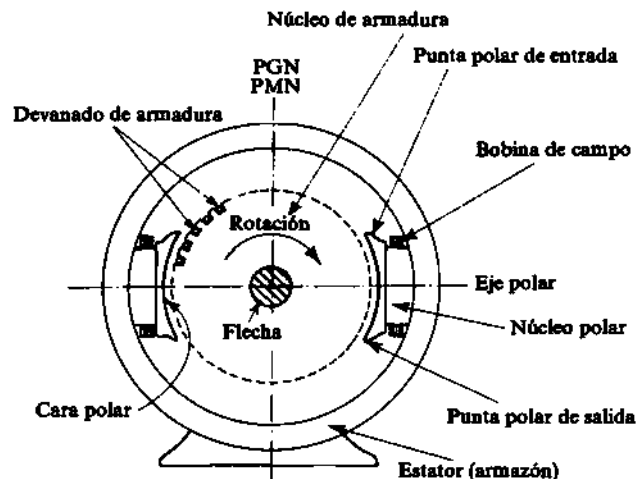


Fig. 2.6 Construcción del motor de CD

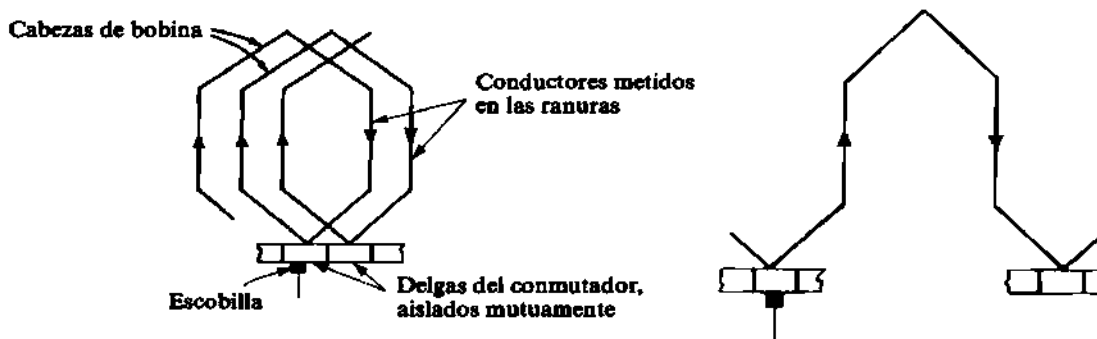
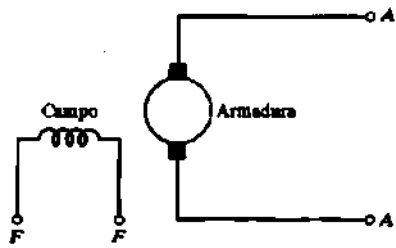
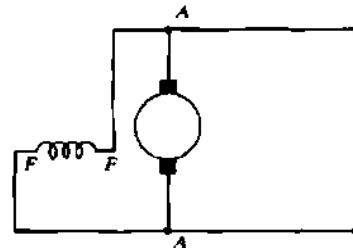


Fig. 2.7 Diferentes tipos de de devanados: Imbricado (izquierda) y ondulado (derecha).

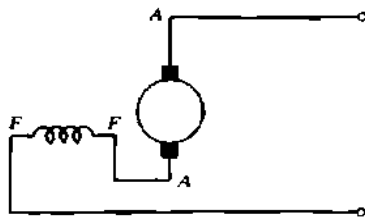
El motor de corriente directa tiene diferentes formas de funcionar dependiendo como es alimentada la armadura, estas diferentes formas de funcionar son las que se muestran en la Figura 2.8.



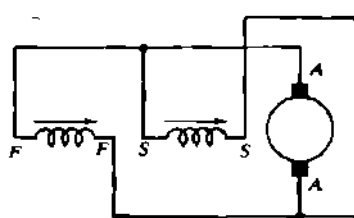
a) Excitación separada



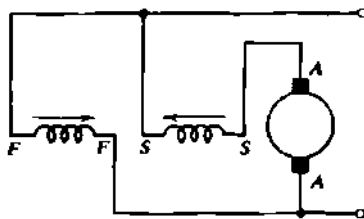
b) En derivación



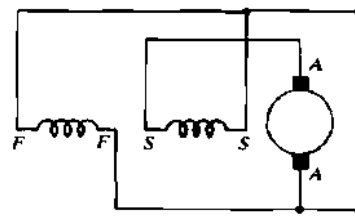
c) En serie



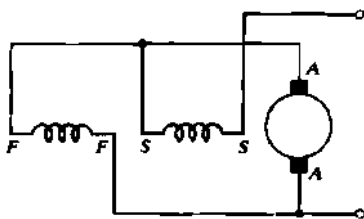
d) Compuesta acumulativa



e) Compuesta diferencial



f) En derivación larga



g) En derivación corta

Fig. 2.8 Formas de conexión de la maquina de CD.

La potencia mecánica desarrollada por la armadura es $T_e \omega_m$, donde T_e es el par (electromagnético) y ω_m es la velocidad angular de la armadura. Si este par se desarrolla mientras la corriente de armadura es i_a a un voltaje (inducido) de armadura E , la potencia en la armadura es Ei_a . Entonces, ignorando las pérdidas en la armadura,

$$T_e \omega_m = Ei_a \quad (2-5)$$

Para un circuito magnético lineal esta ecuación del par sería:

$$T_e = ki_f i_a \quad (2-6)$$

Donde $k=k_f k_a$, por lo tanto k puede denominarse constante de conversión de energía electromecánica. La armadura de un motor de CD es representada esquemáticamente como en la Figura 2.7. En condiciones estacionarias se tiene

$$V - E = I_a R_a \quad (2-7)$$

Con lo que para un circuito magnético lineal la ecuación de la velocidad sería:

$$\omega_m = \frac{V - I_a R_a}{k I_f} \quad (2-8)$$

Una variante de (2-8) es

$$n = \frac{V - I_a R_a}{k_m I_f} \quad [\text{RPM}] \quad (2-9)$$

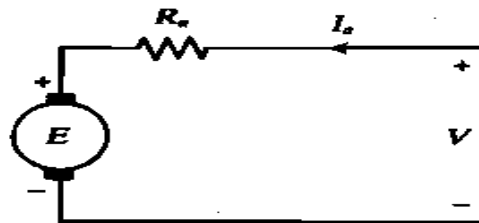


Fig. 2.9 Esquema del motor de CD.

Capítulo 3

Motor BLDC y elementos auxiliares

Los motores BLDC están ganando popularidad rápidamente debido a sus características, algunas de las ventajas son que no tienen desgaste debido al rozamiento de las escobillas y consta de un bobinado de varios polos e imanes permanentes de alta potencia, normalmente de Neodimio-Ferro-Boro que difícilmente pierden la polaridad y que son muy livianos esto por la aleación con la que son creados. Estos motores se utilizan en la industria en diferentes aplicaciones como por ejemplo en la espacial, en consumibles, aplicaciones medicas, equipo industrial de automatización e instrumentación. En la industria automotriz ya son utilizados por la marca Honda para crear autos híbridos siendo utilizado como motor auxiliar en el funcionamiento del auto, lo cual indica que la aplicación de estos motores no se limita a una cierta área como se podría pensar sino que pueden llegar a dársele muchísimas más, por sus grandes ventajas que lo convierten en uno de los motores mas eficientes que se han desarrollado.

Como el nombre de este motor lo indica no utiliza escobillas para la conmutación, la conmutación se lleva a cabo electrónicamente mediante un inversor que se encarga de alimentar sus bobinas.

Los BLDC tienen ventajas sobre los motores de CD con escobillas, algunas de las cuales son:

- a) Mejores características par-velocidad.
- b) Alta respuesta dinámica
- c) Alta eficiencia.
- d) Larga vida de operación.
- e) Altos rangos de velocidad.

Tradicionalmente, el estator de estos es similar al de motores de inducción, y las bobinas están distribuidas uniformemente a lo largo de este.

Normalmente estos motores tienen tres juegos de bobinas conectados en estrella en forma similar al estator del motor de inducción.

El rotor es similar a un imán permanente como se menciona anteriormente, hecho de aleaciones de tierras raras que conservan bien sus propiedades magnéticas aun en ambientes bruscos de trabajo, además de ser livianos lo que les da una ventaja adicional. El rotor puede variar de dos a ocho pares de polos con norte y sur alternativo.

Como se sabe el par máximo de un motor se tiene a 90° eléctricos, por eso de forma adicional estos motores cuentan con sensores efecto Hall que ayudan a determinar la posición del rotor para lograr una operación óptima, estos sensores son colocados en el estator.

3.1 Teoría de operación del BLDC

Cada secuencia de conmutación se realiza con una de las tres bobinas alimentada con voltaje positivo (+) y otra es alimentada hacia tierra (-), creando el circuito eléctrico por el que atraviesa la corriente eléctrica, y por ultimo la tercera no es alimentada, es decir solo se utilizan dos de las tres para el funcionamiento y una se mantiene en no conducción es decir no se conecta, cuidando la secuencia para hacerlo arrancar y mantenerlo girando.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama simplificado del motor BLDC y de la secuencia en la alimentación de las bobinas para que gire en sentido de las manecillas del reloj.

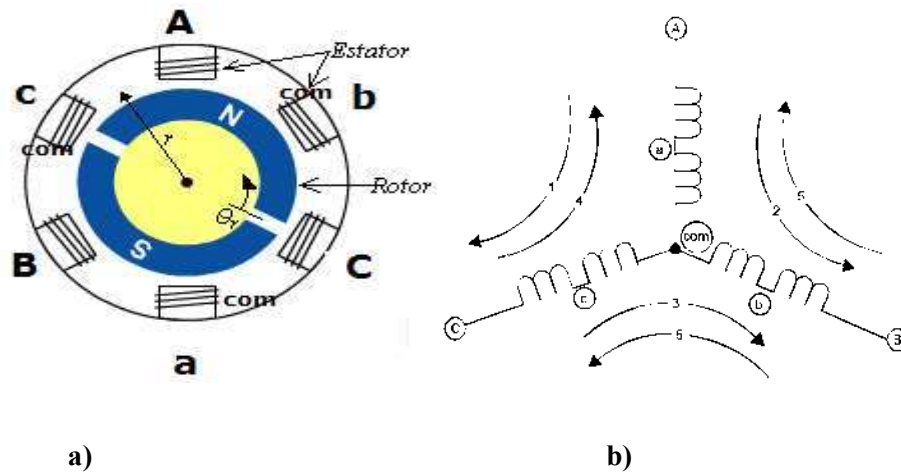


Fig. 3.1 Diagrama simplificado del BLDC y conexión de sus bobinas.

La forma en que luce el motor internamente se muestra en la Figura 3.2, en la parte izquierda se observa el rotor y en la parte derecha el estator y sus bobinas, se puede observar los 3 sensores de efecto Hall, son los pequeños circuitos integrados que se observan a la izquierda de las bobinas.

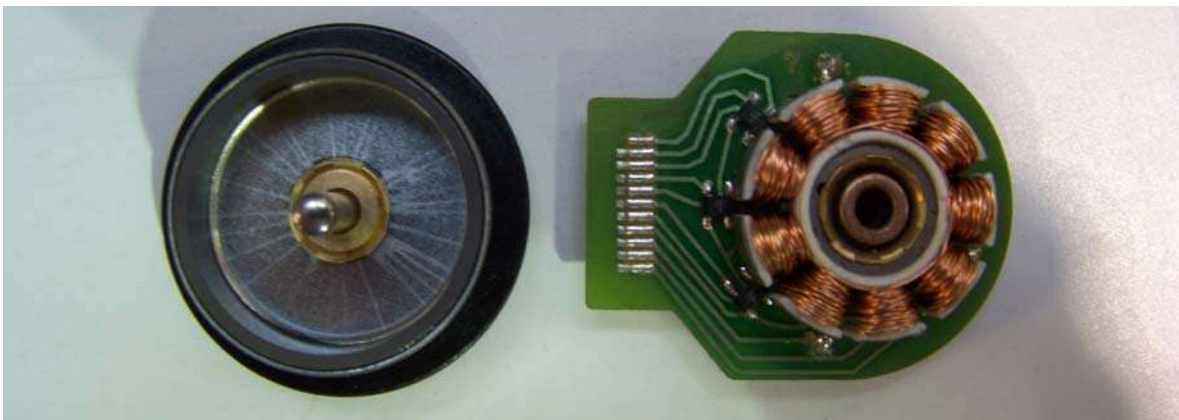


Fig. 3.2 Fotografía del motor utilizado y de sus bobinas.

El diagrama a bloques del control de esta maquina es el que se presenta en la Figura 3.3, como se puede observar se utiliza un inversor trifásico en conjunto con los sensores de posición que como se ya se menciono son sensores de efecto Hall, el inversor trifásico es el encargado de energizar las bobinas del estator en el orden necesario para llevar a cabo el

control del motor, el inversor normalmente se basa en transistores, el microcontrolador se encarga de controlar el disparo de los transistores.

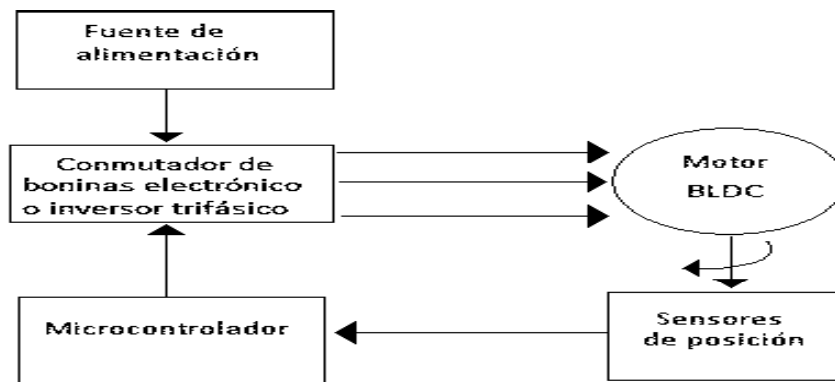


Fig. 3.3 Diagrama a bloques del control del motor BLDC

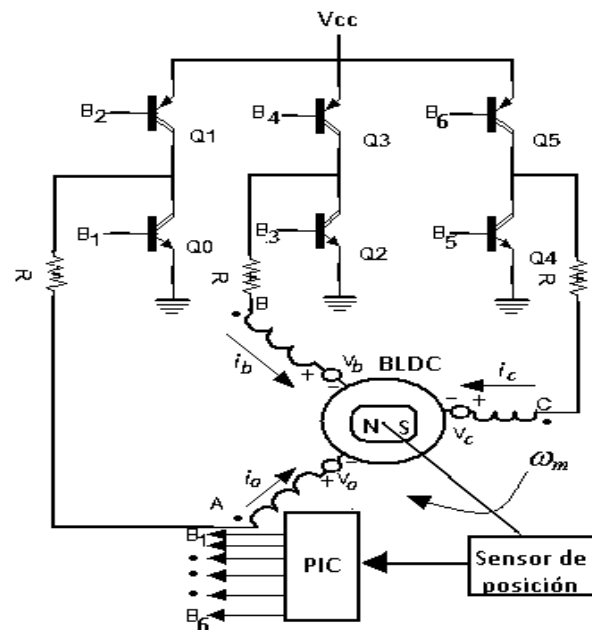


Fig. 3.4 Esquema de conexión del motor BLDC y el conmutador electrónico

Cuando un motor de BLDC gira, cada bobina genera un voltaje inducido conocido Fuerza Contra Electromotriz (*FEM*), que se opone al voltaje principal que lo produce según la Ley de Lenz. La polaridad de esta FEM está en dirección opuesta al voltaje que lo genera, en la Figura 3.4 son mostradas como V_a , V_b y V_c .

Hay dos tipos de variantes de bobinados de estator que generan diferentes FEM para el BLDC una en forma trapezoidal y otra senoidal. Esta diferencia está basada en la interconexión de los bobinados del estator para generar los tipos diferentes de FEM. Como sus nombres indican, la conexión trapezoidal da una FEM en modo trapezoidal y el senoidal entrega una FEM en modo senoidal. Además de la FEM, la corriente de fase también tiene forma trapezoidal y senoidal en los respectivos tipos de motor.

La FEM depende principalmente de tres factores:

- La velocidad Angular del rotor.
- El campo Magnético de los imanes del rotor.
- El número de vueltas en las bobinas del estator.

Y además queda definida por:

$$FEM = (E) \propto NlrB\omega \quad (3-1)$$

Donde:

N Es el número vueltas de las bobinas

l Es la longitud del rotor.

r Es el radio interior del rotor.

B Es la densidad de flujo del campo magnético.

ω La velocidad angular.

A continuación se muestra el circuito equivalente del inversor y del motor operando de manera conjunta.

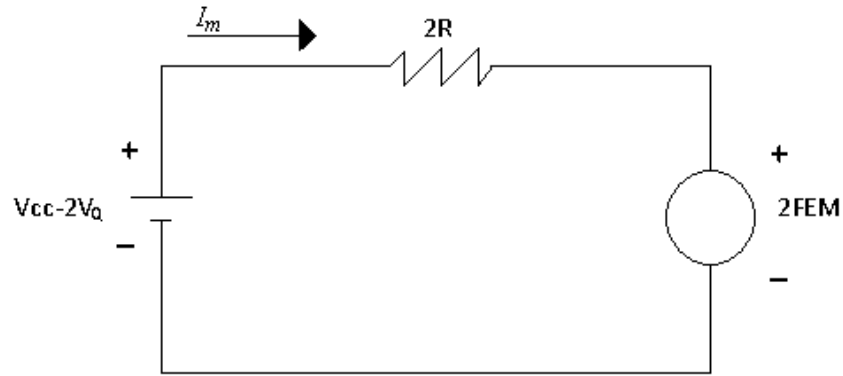


Fig. 3.5 Circuito equivalente del motor BLDC

Los trayectos de flujo del motor BLDC incluyen uno que es radial (r) (como se muestra en la figura 3.1 a)) que va a través del imán permanente que tiene una permeabilidad que se aproxima a la del vacío. En consecuencia, la reluctancia de los caminos de flujo de acoplamiento de los devanados es alta; así, los valores de inductancia de los devanados son pequeños. La tensión de alimentación es impuesta a través de dos devanados de fase que presentan una tensión inducida con una magnitud $2FEM$, y la tensión impuesta que aparece en las terminales del motor se ve reducido en $2V_Q$ (la caída de tensión en estado encendido a través de dos transistores encendidos) [Jimie J. Cathey] .

El diagrama que gobierna la secuencia con que es alimentado el motor en conjunto con la señal que entregan los sensores, además de la FEM de cada bobina, el par generado y la corriente de cada fase se muestra en la Figura 3.6, en la parte superior se puede observar el número de ciclos eléctricos realizados y en la parte inferior se muestra el número de ciclos mecánicos que se debieron realizar por estos ciclos eléctricos, el número de ciclos eléctricos depende del número de polos del motor, para el motor que se observa en la Figura 3.2 se debe ejecutar mas de un ciclo eléctrico para llevar cabo un ciclo mecánico completo.

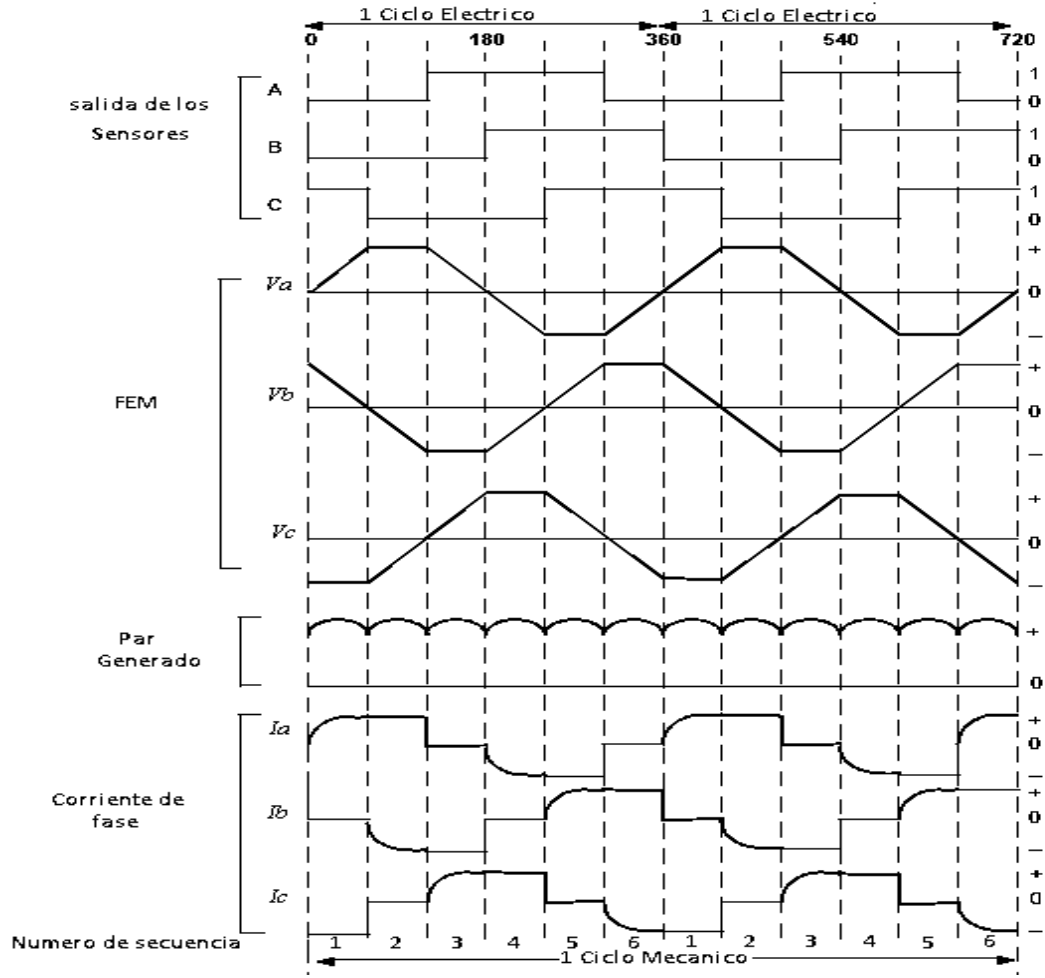


Fig. 3.6 Diagrama que muestra la secuencia de la alimentación de las bobinas, salida de los sensores, corriente de fase, Par generado y FEM de cada bobina.

Observando el diagrama de la Figura 3.6 y del esquema del motor en la Figura 3.4 se concluye que la potencia total convertida de la forma eléctrica a la mecánica quedará dada por:

$$3P_d = \sum_{a,b,c} V_k I_k = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (3-2)$$

El par electromagnético total desarrollado a la velocidad ω_m quedará dado por:

$$3T_d = \frac{3P_d}{\omega_m} = \frac{\sum_{a,b,c} V_k I_k}{\omega_m} \quad (3-3)$$

Las contribuciones individuales de fase al par desarrollado se suman para dar el par total desarrollado como:

$$3T_d = \frac{2V_k I_k}{\omega_m} \quad (3-4)$$

3.2 Características Par/Velocidad del motor BLDC

La Figura 3.7 muestra las características par-velocidad que tiene el BLDC, se puede observar que operando a velocidades dentro de la nominal y exigiendo un par fuera del nominal, no es posible determinar como reaccionara el motor (Zona intermitente de Par), de igual manera se puede observar como al incrementarse en gran medida la velocidad, el par comienza a disminuir.



Fig. 3.7 Características Par/Velocidad del BLDC

3.3 Comparación del BLDC con otros motores

En las siguientes tablas se lleva a cabo una comparación entre los distintos tipos de motores eléctricos, en la tabla 1 se compara el BLDC con el motor asíncrono, en la tabla 2 con el motor de corriente directa y en la tabla 3 con el motor síncrono.

Tabla 1 Comparación entre el BLDC y el motor de CD con escobillas

característica	Motor BLDC	Motor de CD con escobillas
Conmutación	Conmutación electrónica basada en sensores de posición de efecto Hall.	Conmutación con escobillas.
Mantenimiento	Prácticamente no se requiere.	Se requiere periódicamente
Vida	Larga.	Relativamente corta.
Características par/velocidad	Lineal: Sin cambios en la velocidad con carga.	No lineal: A velocidades altas se incrementa la fricción y se reduce el par.
Eficiencia	Alta	Moderada
Eficiencia térmica	Alta: El tamaño reducido da características termales superiores.	Moderada: El calor producido por la armadura es disipado por el aire producido por el rotor.
Rango de velocidad	Alto: No es limitado por el roce de escobillas	Moderado: Es limitado por el contacto entre las escobillas y algunas otras limitantes.

Tabla 2 Comparación entre el BLDC y el motor de inducción

Característica	Motor BLDC	Motor asíncrono
Características par/velocidad	Altas y lineales	No lineales- Bajo par a bajas velocidades.
Corriente de arranque	No requiere circuito de arranque.	Por lo general utilizan circuito de arranque para mayor protección.
Inercia del rotor	Buenas características dinámicas.	Tiene malas características dinámicas.

Cabe mencionar que a pesar de sus grandes ventajas sobre estos motores también cuenta con algunas desventajas, como por ejemplo sería el grado de complejidad que tiene el lograr hacer funcionar adecuadamente los sensores.

3.4 Inversores

Los inversores son circuitos que convierten la corriente continua en corriente alterna. Más exactamente los inversores transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna [Hart 2001].

Tanto la frecuencia de salida como el voltaje pueden ser fijos o variables. Si se modifica el voltaje de entrada del inversor y la ganancia se mantiene constante, es posible obtener un voltaje variable de salida. Por otra parte, si el voltaje de entrada de c.c. es fijo y no es controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable si se varía la ganancia del inversor; esto por lo general se hace controlando el voltaje con los pulsos modulados por anchura (PWM) dentro del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida en c.a. y el voltaje de entrada en c.c. [Rashid 1995].

En los inversores ideales, las formas de onda deberían ser senoidales. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales y contienen ciertos armónicos. Para aplicaciones de mediana y baja potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada; pero en aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda de baja distorsión [Rashid 1995].

El uso de los inversores es muy común en aplicaciones industriales tales como la propulsión de motores de c.a. de velocidad variable, la calefacción por inducción, las fuentes de respaldo y las fuentes de poder [Rashid 1995].

Los inversores se pueden clasificar por el número de fases como:

- (1) Inversores monofásicos.
- (2) Inversores trifásicos.

Y también se clasifican por el tipo de rectificador usado en:

- (1) Inversor con fuente de voltaje
- (2) inversor con fuente de corriente [Rashid 1995].

3.4.1 Parámetros de rendimiento

La salida de los inversores reales contiene armónicas. La calidad de un inversor por lo general se evalúa en términos de los siguientes parámetros de rendimiento [Rashid 1995].

Factor armónico de la enésima componente, HF_n (*Harmonic Factor n component*). El factor armónico correspondiente a la enésima armónica, es una medida de la contribución armónica individual y se define como:

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (3-5)$$

Donde V_1 es el valor rms de la componente fundamental y V_n es el valor rms de la enésima componente armónica.

Distorsión total armónica THD (*Total Harmonic Distortion*). La distorsión armónica total, es una medida entre la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental, se define como:

$$THD = \frac{1}{V_1} \left[\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right] \quad (3-6)$$

Factor de distorsión DF (*Distortion Factor*). El factor de distorsión indica la cantidad de distorsión armónica que queda en una forma de onda particular, después de que las armónicas de esa forma de onda hayan sido sujetas a una atenuación de segundo orden (es decir divididas por n^2). Por lo tanto este valor, es una medida de la eficacia en la reducción de las componentes armónicas no deseadas, sin necesidad de especificar valores de un filtro de carga de segundo orden y se define como:

$$DF = \frac{1}{V_1} \left[\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3-7)$$

El DF de una componente armónica individual (o de orden n) se define como:

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 n^2} \quad (3-8)$$

Armónica de menor orden LOH (*Low Order Harmonic*). La armónica de menor orden es aquella componente cuya frecuencia es la más cercana a la fundamental, y cuya amplitud es mayor que o igual al 3% de la componente fundamental.

3.4.2 Inversores trifásicos

Los inversores trifásicos se utilizan normalmente en aplicaciones de alta potencia. Tres inversores monofásicos de medio puente o de puente completo pueden conectarse con la alimentación en común para formar la configuración de un inversor trifásico. Las señales de compuerta de los inversores monofásicos deben adelantarse o retrasarse 120° uno con respecto al otro, a fin de obtener voltajes trifásicos balanceados (fundamentales). Si los voltajes de salida de los inversores monofásicos no están perfectamente equilibrados en magnitud y fase, los voltajes de salida trifásicos también estarán desequilibrados [Rashid 1995].

Se puede obtener una salida trifásica a partir de una configuración de seis transistores y seis diodos como el que se muestra en la Figura 3.8. A los transistores se les puede aplicar dos tipos de señal de control: Conducción a 180° o conducción a 120° .

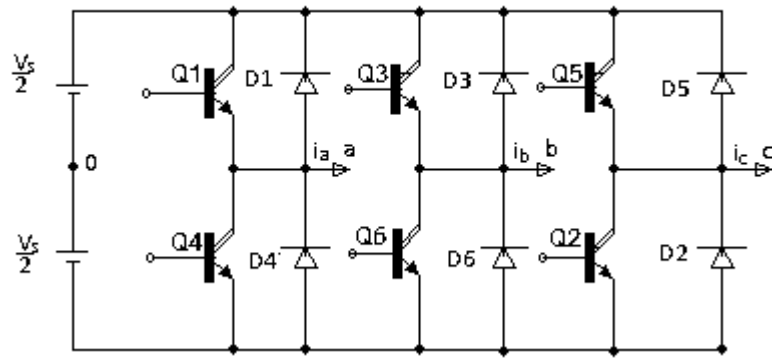


Fig. 3.8 Inversor trifásico

3.4.2.1 Conducción a 180°

Cada transistor conducirá durante 180° . Tres transistores se mantienen activos durante cada instante de tiempo. Cuando el transistor Q_1 está activado, la terminal a se conecta con la terminal positiva del voltaje de entrada. Cuando se activa el transistor Q_4 , la terminal a se lleva a la terminal negativa de la fuente de CD. En cada ciclo existen seis modos de operación, cuya duración es de 60° . Los transistores se numeran según su secuencia de excitación [Rashid 1995].

3.4.2.2 Conducción a 120°

En este tipo de control cada transistor conduce durante 120° . En cualquier instante de tiempo, solo conducen 2 transistores.

El voltaje de línea de a a b es $v_{ab} = \sqrt{3}v_{an}$ con un adelanto de fase de 30° . Existe un retraso de $\pi/6$ entre la desactivación de Q_1 y la activación de Q_4 .

Por lo tanto, no debe existir un corto circuito en la alimentación de CD a través de un transistor superior y uno inferior. En cualquier momento, dos terminales de carga están conectadas con la alimentación de CD y la tercera se conserva abierta (no conducción). El potencial de esta terminal abierta depende de las características de la carga y es impredecible.

Dado que un transistor conduce durante 120° , para una misma condición de la carga los transistores se utilizan menos que en la conducción a 180° [Rashid 1995].

3.5 Efecto Hall

Cuando por un material conductor o semiconductor, circula una corriente eléctrica, y estando este mismo material dentro de un campo magnético, se comprueba que aparece una fuerza magnética en los portadores de carga que los reagrupa dentro del material, esto es, los portadores de carga se desvían y agrupan a un lado del material conductor o semiconductor, apareciendo así un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y al propio campo eléctrico generado por la batería. Este campo eléctrico es el denominado campo Hall, y ligado a él aparece la tensión Hall, esta tensión que se puede medir además puede ser útil para otras aplicaciones prácticas como por ejemplo detectar cambios en el campo eléctrico debidas al movimiento. Para poder utilizar la tensión Hall en ocasiones es necesario amplificarla, porque su valor es muy reducido.

Este efecto es llamado efecto Hall en honor a su descubridor Edwin Duntley Hall.

Por ejemplo (para describir un poco mejor este efecto), en el caso de la Figura 3.10 se tiene una barra de un material desconocido y se quiere saber cuales son sus portadores de carga. Para ello, mediante una batería se hace circular por la barra una corriente eléctrica. Una vez hecho esto, se introduce la barra dentro de un campo magnético uniforme y perpendicular a la tableta.

Aparecerá entonces una fuerza magnética sobre los portadores de carga, que tenderá a agruparlos a un lado de la barra, apareciendo de este modo una tensión Hall y un campo eléctrico Hall entre ambos lados de la barra. Dependiendo de si la lectura del voltímetro es positiva o negativa, y conociendo el sentido del campo magnético y del campo eléctrico originado por la batería, se puede deducir si los portadores de carga de la barra de material son cargas positivas ó negativas.

En la Figura 3.10 se puede observar como el material se divide en dos zonas: una hacia la izquierda y la otra a la derecha, en una zona los portadores son huecos y en la otra hay electrones respectivamente.

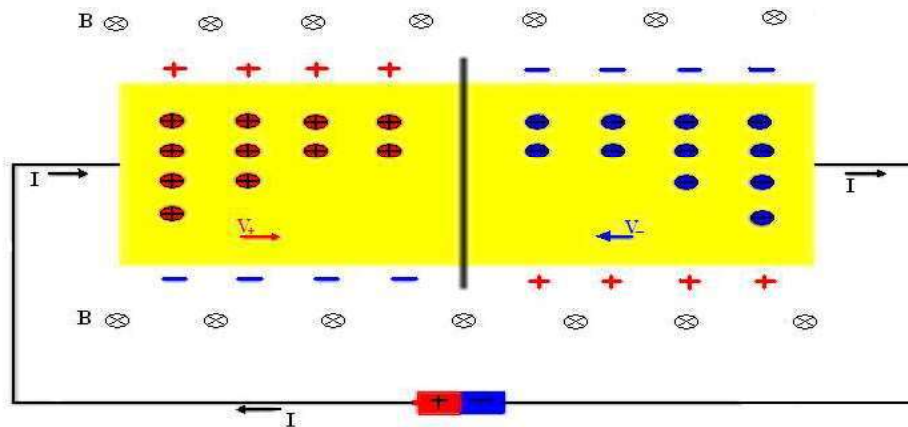


Fig. 3.9 Ejemplo de la agrupación de portadores de carga en un material conductor debido al efecto Hall.

3.5.1 Sensores efecto Hall

Esta es una de las grandes aplicaciones que se le dan al descubrimiento del efecto Hall, entre otras los sensores efecto Hall pueden ser utilizados para medir:

- Los campos magnéticos (Teslámetros).
- La intensidad de corrientes eléctricas (sensores de corriente de Efecto Hall).
- También permiten la elaboración de sensores detectores de posición sin contacto, utilizados particularmente en el automóvil, para detectar la posición de una flecha giratoria (caja de cambios,...etc.).
- Se encuentran también sensores de efecto Hall bajo las teclas de los teclados de los instrumentos de música modernos (órganos, órganos digitales, sintetizadores) evitando así el desgaste que sufren los contactos eléctricos tradicionales.
- Se usan sensores de efecto Hall en el codificador para la conmutación de un motor de CD sin escobillas.

Como se puede ver estos sensores tienen varias aplicaciones la que mas importa para el desarrollo de este prototipo, es la utilizada para llevar a cabo la conmutación del motor comentado en esta tesis.

La secuencia correcta en que debe ser alimentado el motor es determinada por estos sensores de efecto Hall, es decir mediante estos sensores se determina la posición del rotor. En la Figura 3.6 se puede observar en la parte superior la señal de salida que entregan estos sensores, su forma de funcionar es detectando los cambios en el campo magnético generado por el rotor, y entregando una salida digital dependiendo de la parte en que se encuentre el rotor, en caso de que se detecte un Norte el sensor entrega un 1 lógico y de lo contrario si detecta un Sur entregara un 0 lógico, al ser tres sensores utilizados se entregan tres salidas lógicas que al formar distintas combinaciones digitales es determinada la ubicación del rotor, dependiendo de esta información se elige la secuencia a la que el motor gire con el par máximo además de asegurar que el motor funcione de manera correcta y provocar daños por la mala implementación de la alimentación a las bobinas.

3.6 El Microcontrolador PIC16F877

El Microcontrolador PIC16F877 es utilizado para llevar el control del motor BLDC a sus grandes ventajas y características, por económico y fácil de conseguir, a continuación se mencionaran algunas de las características más destacadas de este dispositivo.

3.6.1 La Familia del PIC16F877

El microcontrolador PIC16F877 de Microchip pertenece a una gran familia de microcontroladores de 8 bits (bus de datos) que tienen las siguientes características generales que los distinguen de otras familias:

- Arquitectura Harvard
- Tecnología RISC
- Tecnología CMOS

Estas características se conjugan para lograr un dispositivo altamente eficiente en el uso de la memoria de datos y programa y por lo tanto en la velocidad de ejecución.

Microchip ha dividido sus microcontroladores en tres grandes Subfamilias de acuerdo al número de bits de su bus de instrucciones:

Tabla 3 subfamilias del Microcontrolador

Subfamilia	Instrucciones	Nomenclatura
Base – Line	33 inst de 12 bits	PIC12XXX y PIC14XXX
Mid – Range	35 inst de 14 bits	PIC16XXX
High – End	58 inst de 16 bits	PIC17XXX y PIC18XXX

3.6.2 Variantes principales

Los microcontroladores que produce Microchip cubren un amplio rango de dispositivos cuyas características podemos mencionar:

- Empaquetado (desde 8 patitas hasta 68 patitas)
- Tecnología de la memoria incluida (EPROM, ROM, Flash)
- Voltajes de operación (desde 2.5 v. Hasta 6v)
- Frecuencia de operación (Hasta 98 MHz)

3.6.3 Empaquetados

Aunque cada empaquetado tiene variantes, especialmente en lo relativo a las dimensiones del espesor del paquete, en general se pueden encontrar paquetes tipo PDIP (*Plastic Dual In Line Package*), PLCC (*Plastic Leaded Chip Carrier*) y QFP (*Quad Flat Package*), SOIC (*Small Outline I.C.*) los cuales se muestran en las figuras siguientes, el que es utilizado para esta aplicación es el de la figura 3.10 a y también se ilustran las salidas y las entradas de los pines, los que están en los dos sentidos es que se pueden configurar como entrada y salida y los que solo están en una dirección solo pueden ser habilitados como entrada o como salida.

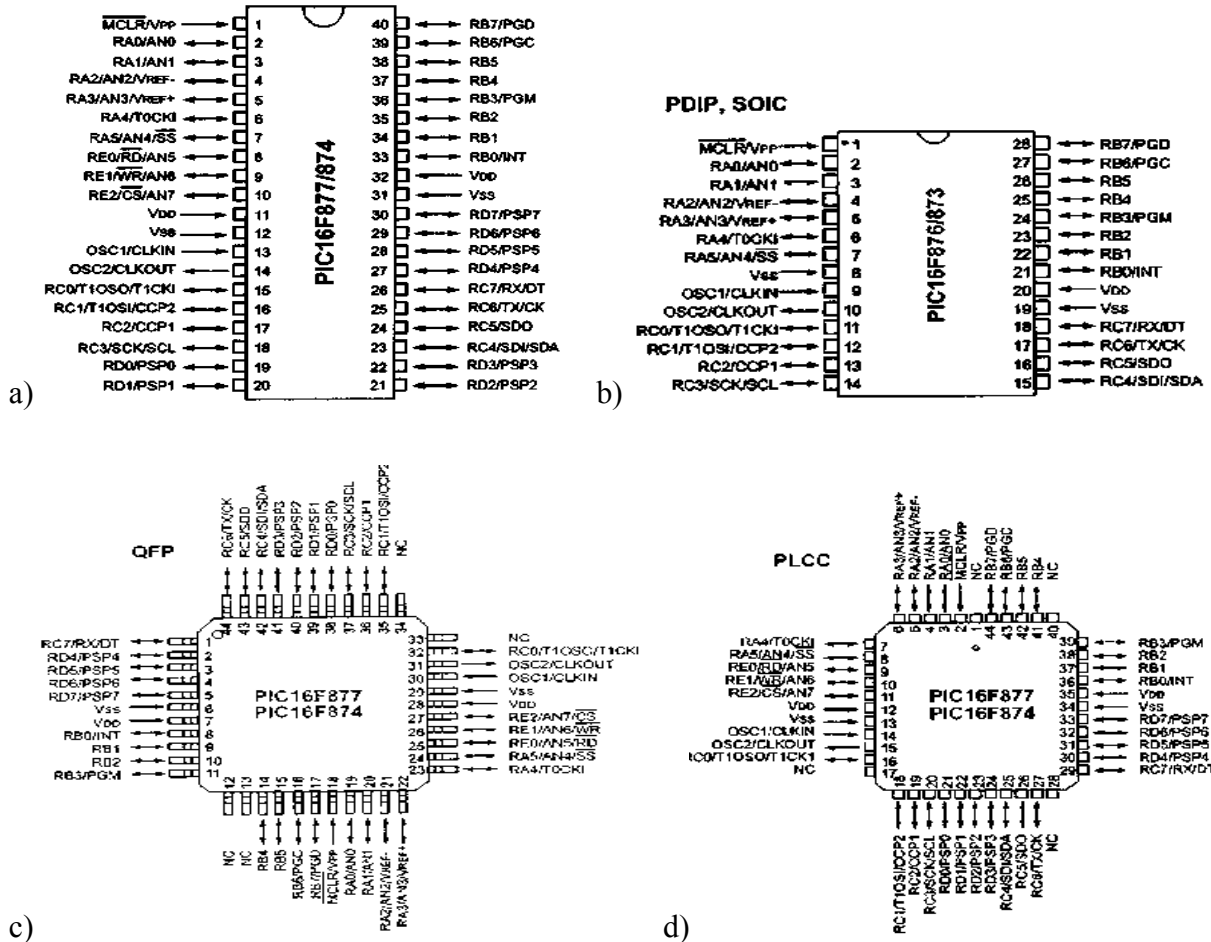


Fig. 3.10 Diferentes empaquetados de los microcontroladores

3.6.4 Características generales del PIC16F877

La siguiente es una lista de las características que comparte el PIC16F877 con los dispositivos más cercanos de su familia: PIC16F873, PIC16F874, PIC16F876.

- CPU RISC.
- Sólo 35 instrucciones que aprender.
- Todas las instrucciones se ejecutan en un ciclo de reloj, excepto los saltos que requieren dos
- Frecuencia de operación de 0 a 20 MHz (DC a 200 nseg de ciclo de instrucción)
- Hasta 8k x 14 bits de memoria Flash de programa
- Hasta 368 bytes de memoria de datos (RAM)

- Hasta 256 bytes de memoria de datos EEPROM
- Hasta 14 fuentes de interrupción
- *Stack* de hardware de 8 niveles
- *Reset* de encendido (POR)
- *Timer* de encendido (PWRT)
- *Timer* de arranque del oscilador (OST)
- Sistema de vigilancia *Watchdog timer*.
- Protección programable de código
- Modo *SLEEP* de bajo consumo de energía
- Opciones de selección del oscilador
- Programación y depuración serie “*In-Circuit*” (ICSP) a través de dos patitas
- Lectura/escritura de la CPU a la memoria flash de programa
- Rango de voltaje de operación de 2.0 a 5.5 volts
- Alta disipación de corriente de la fuente: 25mA
- Rangos de temperatura: Comercial, Industrial y Extendido
- Bajo consumo de potencia: Menos de 0.6mA a 3V, 4 MHz o 20 μ A a 3V, 32 KHz o menos de 1 μ A corriente de *standby*.

3.6.5 Periféricos

- Puertos paralelos:** de 3 a 5 puertos digitales (PortA, PortB,..., PortE) con líneas programables individualmente.
- Timer0:** Contador/Temporizador de 8 bits con pre-escalador de 8 bits
- Timer1:** Contador/Temporizador de 16 bits con pre-escalador
- Timer0:** Contador/Temporizador de 8 bits con pre-escalador y post-escalador de 8 bits y registro de periodo.
- **Dos módulos de Captura, Comparación y PWM**
- **Convertidor Analógico/Digital:** de 10 bits, hasta 8 canales
- Puerto Serie Síncrono (SSP)

- Puerto Serie Universal (USART/SCI).
- Puerto Paralelo Esclavo (PSP): de 8 bits con líneas de protocolo

3.6.5.1 El PORTA y registro TRISA

El PORTA tiene un tamaño de 6 bits, es un puerto bidireccional. El registro de dirección de datos correspondiente del PORTA es el TRISA. Poniendo un bit del TRISA (=1) se hace que funcione como entrada el pin correspondiente, en cambio colocando un (=0) se habilita para que funcione como salida el pin que fue elegido.

Leyendo el registro del PORTA se lee el estado de los pines. Todas las operaciones son de leer-modificar-escribir.

Teóricamente al escribir en un puerto implica que el pin del puerto lee, modifica el valor y entonces escribe al puerto de datos.

El pin RA4 es multiplexor con el modulo de reloj de entrada Timer0 que proviene del pin RA4/T0CKI. El pin RA4/T0CKI es una entrada *Schmitt Trigger* y una salida de drenaje abierta. Todos los otros pines del PORTA tienen niveles de entrada TTL y *drivers* de salida CMOS llenos.

Otros pines del PORTA son multiplexores con entradas analógicas y entradas analógicas V_{REF} .

La operación de cada pin es seleccionada para limpiar/programar, los bits de control en el registro ADCON1 (A/D registro de control 1)

Nota: Con un *reset* de encendido, estos pines quedan configurados como entradas y su lectura es 0.

Los registros TRISA controlan la dirección de los pines RA siempre y cuando estos sean utilizados como entradas analógicas. El usuario debe asegurarse que los bits en el registro TRISA se mantengan encendidos cuando se utilicen como entradas analógicas.

Tabla 4 Funciones del PORTA

Nombre	Bit #	Buffer	Función
RA0/AN0	bit0	TTL	Entrada/salida ó entrada analógica.
RA1/AN1	bit1	TTL	Entrada/salida ó entrada analógica.
RA2/AN2	bit2	TTL	Entrada/salida ó entrada analógica.

RA3/AN3/V _{REF}	bit3	TTL	Entrada/salida ó entrada analógica ó V _{REF} .
RA4/T0CKI	bit4	ST	Entrada/salida ó entrada externa de reloj para Timer0.
RA5/ <u>SS</u> /AN4	bit5	TTL	Entrada/salida ó selección de guardado para el puerto serial síncrono ó entrada analógica.

TTL= Entrada TTL, ST= Entrada *Schmitt Trigger*.

3.6.5.2 El PORTC y el registro TRISC

El PORTC tiene un tamaño de 8 bits, es un puerto bidireccional. El registro de dirección de datos correspondiente del PORTC es el TRISC. Poniendo un bit del TRISC (=1) se hace que funcione como entrada el pin correspondiente, en cambio colocando un (=0) se habilita para que funcione como salida el pin que fue elegido.

El PORTC es un multiplexor con varias funciones periféricas. Los pines del PORTC tienen buffers de entrada Schmitt Trigger.

Cuando se habilitan las funciones periféricas se debe tener cuidado definiendo los bits del TRIS para cada pin del PORTC. Algunos periféricos del TRISC colocan al pin como salida mientras que otros lo colocan como entrada, debido a esto es necesario elegir de manera correcta los pines ya que si no es así se pueden causar daños al microcontrolador.

Tabla 5 Funciones del PORTC

Nombre	Bit #	Buffer tipo	Función
RC0/T1OSO/T1CKI	bit0	ST	Pin del puerto de Entrada/Salida ó Salida del oscilador Timer1/Entrada de reloj del Timer1.
RC1/T1OSI/CCP2	bit1	ST	Pin del puerto de Entrada/Salida ó Entrada del oscilador Timer1 ó Entrada de Capture2/Salida PWM2.
RC2/CCP1	bit2	ST	Pin del puerto de Entrada/Salida ó Salida de PWM1
RC3/SCK/SCL	bit3	ST	El RC3 puede incluso ser el reloj síncrono serial para ambos modos: I ² C y SPI.
RC4/SDI/SDA	bit4	ST	RC4 puede incluso ser la entrada de datos SPI(modos SP ó datos I/O (en modo I ² C)

RC5/SDO	bit5	ST	Pin del puerto Entrada/Salida ó puerto de salida de datos serial sincrónico.
RC6/TX/CK	bit6	ST	Pin del puerto Entrada/salida ó transmisor asincrónico USART, ó reloj sincrónico.
RC7/RX/DT	bit7	ST	Pin del puerto Entrada/salida ó Receptor asincrónico USART, ó datos sincrónicos.

Donde: ST = Entradas *Schmitt Trigger*.

3.6.5.3 El PORTD y el registro TRISD

El PORTD es un puerto de 8 bits con buffers de entrada *Schmitt Trigger*. Cada pin es individualmente configurable como entrada o salida.

El PORTD puede ser configurado como un puerto microprocesador de 8 bits de ancho (puerto de guardado paralelo) con el control programador de bits PSPMODE (TRISE <4>) en este modo los buffers de entrada son TTL.

Tabla 6 Funciones del PORTD

Nombre	Bit #	Buffer tipo	Función
RD0/PSP0	bit0	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit0
RD1/PSP1	bit1	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit1
RD2/PSP2	bit2	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit2
RD3/PSP3	bit3	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit3
RD4/PSP4	bit4	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit4
RD5/PSP5	bit5	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit5
RD6/PSP6	bit6	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit6
RD7/PSP7	bit7	ST/TTL	Pin Entrada/Salida ó Puerto paralelo para guardar el bit7

ST = Entrada *Schmitt Trigger*, TTL= Entrada TTL

3.6.5.4 El PORTE y el registro TRISE

El PORTE tiene 3 pines () que son individualmente configurables como entradas o salidas. estos pines tienen buffers de entrada *Schmitt Trigger*.

Los pines del PORTE son el control I/O de entradas para el puerto microprocesador cuando el bit PSPMODE (TRISE <4>) esta encendido. En este modo, el usuario debe asegurarse que el TRISE <2:0> bits esta encendido, y que los pines están configurados como entradas digitales. También asegurase que ADCON1 esta configurado para I/O digital. En este modo, los buffers de entrada son TTL.

Los pines PORTE son multiplexores con entradas analógicas. Cuando se selecciona para entradas analógicas, estos pines serán leídos como 0.

TRISE controla la dirección de los pines RE, incluso cuando están siendo usados como entradas analógicas. El usuario debe asegurarse de proteger las configuraciones de los pines como entradas cuando los esta usando como entradas analógicas.

Nota: cuando se reinicia, estos pines son configurados como entradas analógicas y se leen en 0.

Tabla 7 Funciones del PORTE

Nombre	Bit #	Buffer tipo	Función
RE0/RD/AN5	bit0	ST/TTL	Pin del puerto I/O, ó control de lecturas de entrada en el modo Puerto Esclavo Paralelo, o entrada analógica <u>RD</u> . 1 = Ocioso. 0 = Operación de lectura. Los contenidos del registrador PORTD son salidas para los pines I/O del PORTD (si el chip es seleccionado).
RE1/WR/AN6	bit1	ST/TTL	Pin del puerto I/O ó control de escrituras de entrada en el modo Puerto Esclavo Paralelo, ó entrada analógica: <u>WR</u> . 1 = Ocioso. 0 = Operación de escritura. Los valores de los pines I/O del PORTD es capturado en el registrador

			PORTD (Si el chip es seleccionado).
RE2/WR/AN7	bit2	ST/TTL	Pin del puerto I/O ó control de entrada del chip seleccionado en el modo Puerto Esclavo Paralelo, ó entrada analógica: <u>CS</u> . 1 = Dispositivo no seleccionado. 0 = Dispositivo seleccionado.

Donde: ST = Entrada *Schmitt Trigger*, TTL = Entrada TTL

Nota: Los buffers de entrada son Schmitt Trigger cuando esta en modo I/O, y son buffers TTL cuando esta en modo Puerto Esclavo Paralelo.

3.6.6 Modulo convertidor analógico a digital(A/D)

El modulo convertidor analógico a digital tiene 5 entradas para los circuitos de 28 pines y 8 para los otros microcontroladores.

La carga analógica de entrada es dada por un capacitor retenedor. La salida de este capacitor se conecta a la entrada del convertidor. El convertidor genera una salida digital de esta entrada analógica mediante aproximaciones sucesivas. La conversión A/D de la señal analógica de entrada resulta en un correspondiente número digital de 10 bits. El modulo A/D tiene una referencia de voltaje bajo y alto, seleccionando con el software alguna combinación de V_{DD} , V_{SS} , RA2 ó RA3.

El convertidor A/D tiene un rasgo único de ser capaz de estar operando mientras el dispositivo se encuentra en el modo *SLEEP*, el reloj A/D debe derivar del oscilador interno RC.

El modulo A/D tiene cuatro registros. Estos registros son:

- A/D Registro de altos resultados (ADRESH)
- A/D Registro de bajos resultado (ADRESL)
- A/D Registro 0 de control (ADCON0)
- A/D Registro 1 de control (ADCON1)

3.6.7 Diagrama de Bloques del PIC16F877

En la figura 3.12 se muestran el diagrama a bloques del PIC16F877, se pueden observar los puertos con los que cuenta así como también se pueden observar las demás herramientas con las cuenta.

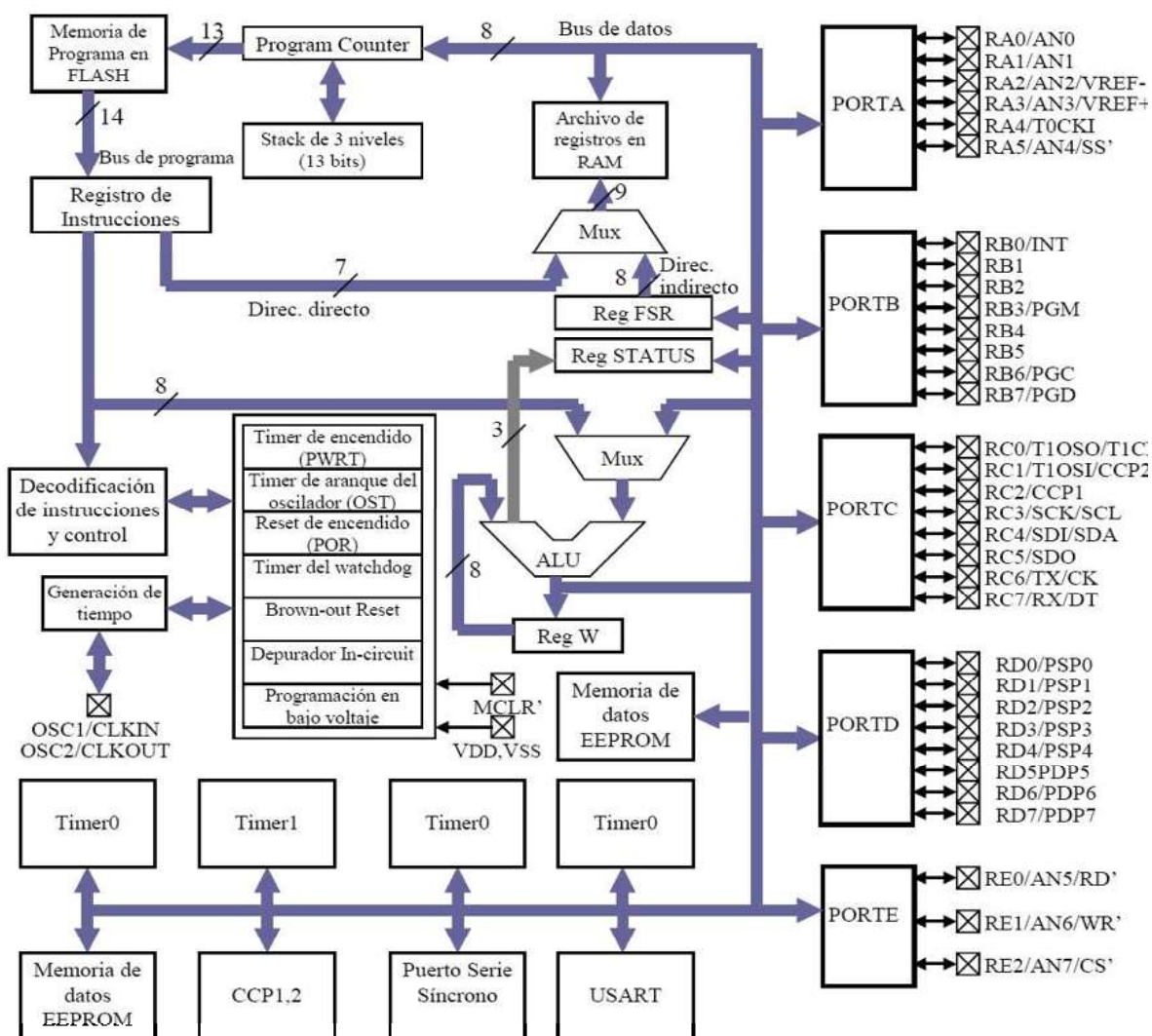


Fig. 3.11 Diagrama a bloques del microcontrolador PIC16F877

3.7 Modo PWM del microcontrolador

Otro de los periféricos con los que cuenta este microcontrolador es el PWM, la señal PWM se utilizara en el control de velocidad del motor que se utilizo durante el desarrollo de este proyecto.

3.7.1 Modulaci3n del ancho de pulso (PWM)

La modulaci3n de ancho de pulso (PWM por sus siglas en ingles) es la variaci3n del ciclo de trabajo de una se1al dada, incrementando o decrementando este ciclo de trabajo dependiendo de la aplicaci3n, al cambiar el ancho de pulso se cambia el valor del voltaje aplicado de manera proporcional a dicho ancho de pulso, en la Figura 3.13 se muestra un ejemplo de c3mo es variado el ciclo de trabajo, en la imagen se pueden observar 3 se1ales las cuales est1n operando a 10%, 50% y 90% respectivamente.

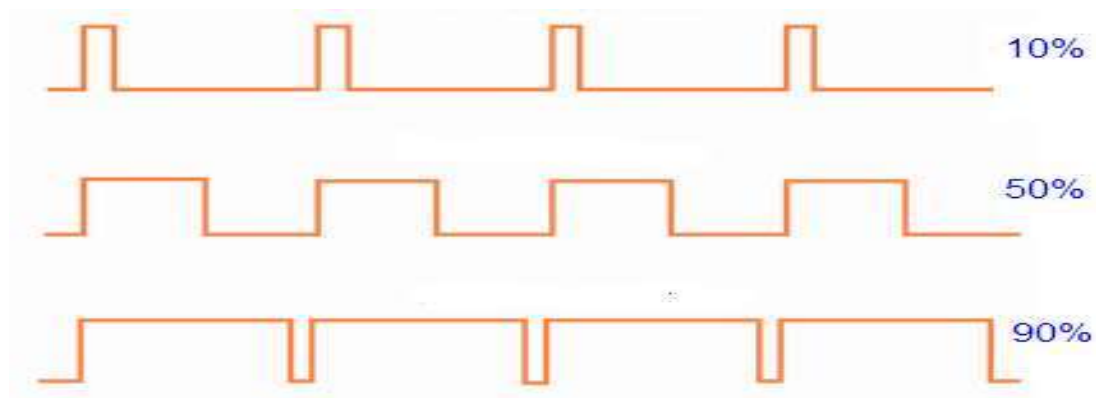


Fig. 3.12 Variaci3n de ancho de pulso a diferentes ciclos de trabajo.

Este modo es el que interesa en la implementaci3n del control del motor ya que mediante este principio es como se llevara a cabo la variaci3n de la velocidad es decir variando el ancho de pulso del ciclo de la se1al mediante un potenciómetro se variara la velocidad al rango deseado.

El promedio de voltaje es aplicado a cada una de las bobinas, esto permite controlar su velocidad en lazo abierto.

Capítulo 4

Sistema desarrollado y pruebas efectuadas.

A continuación se mencionan las pruebas que fueron efectuadas para diseñar el sistema de control del motor BLDC.

4.1 Prueba 1: Alimentación de las bobinas mediante 3 interruptores de 3 estados.

En esta prueba, el motor fue sometido a una fuente de 5volts de manera directa sin ningún otro elemento electrónico de por medio, empleando solamente tres interruptores de tres estados, éstos interruptores tienen la peculiaridad de que cuentan con un estado “flotante” es decir no esta conectado ni a los 5 volts de alimentación ni a tierra, como ya se describió anteriormente se necesitan alimentar únicamente dos de las tres fases del motor y una dejarla en no conducción.

En las siguientes figuras se muestra la secuencia de la conmutación para que estos motores giren en sentido de las manecillas del reloj, donde las letras minúsculas hacen referencia a la continuación de las bobinas que comienzan con letras mayúsculas, además se señala la polaridad que toman al ser alimentadas, esta polaridad se obtiene con la regla de la mano derecha y depende del sentido en que circulando la corriente.

Paso 1: Este es el primer paso que se realizo en esta prueba, se alimentan las bobinas de la forma que se ilustra Figura 4.1, que seria de la bobina A hacia la C y para que el circuito quede cerrado y pueda llevarse el movimiento mecánico.

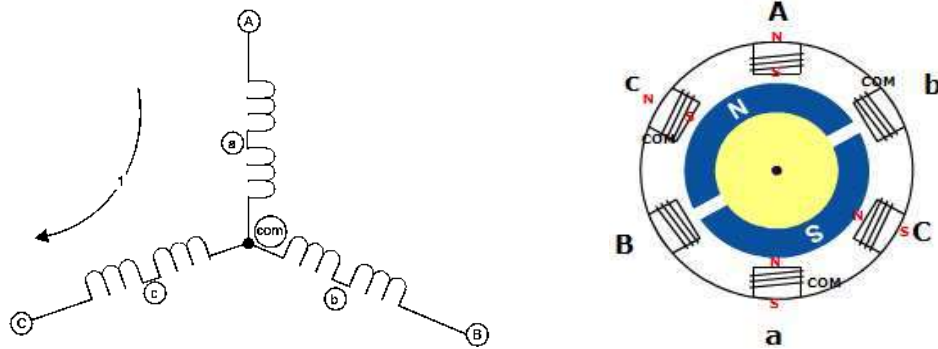


Fig. 4.1 Paso 1 de la secuencia para que el motor gire en sentido horario.

Al alimentar los interruptores de forma que se energicen las dos bobinas elegidas observa como el motor dio un pequeño movimiento en sentido de las manecillas del reloj.

En la Tabla 9 se muestra los transistores que son alimentados en cada uno de los pasos realizados.

Paso 2: En este paso se procede a alimentar la secuencia que es de la bobina A hacia la bobina B quedando como se muestra en la figura 4.2

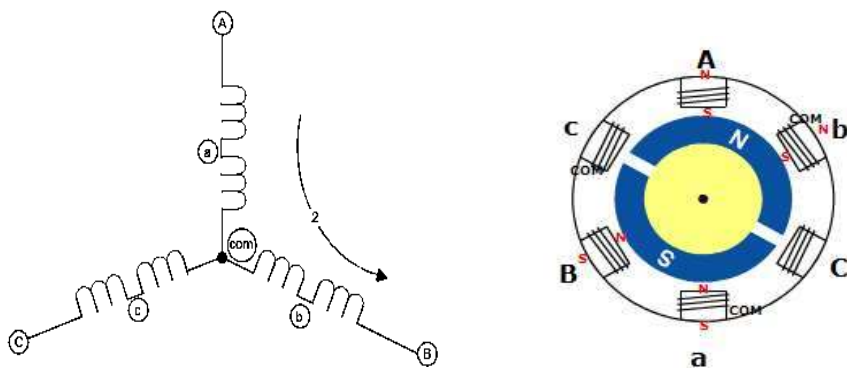


Fig. 4.2 Paso 2 de la secuencia de alimentación.

El motor giro un poco más en sentido de las manecillas del reloj, en la figura también se puede observar como el norte del rotor giro un poco.

Paso 3: Ahora para seguir la secuencia se alimenta de la bobina C hacia la bobina B

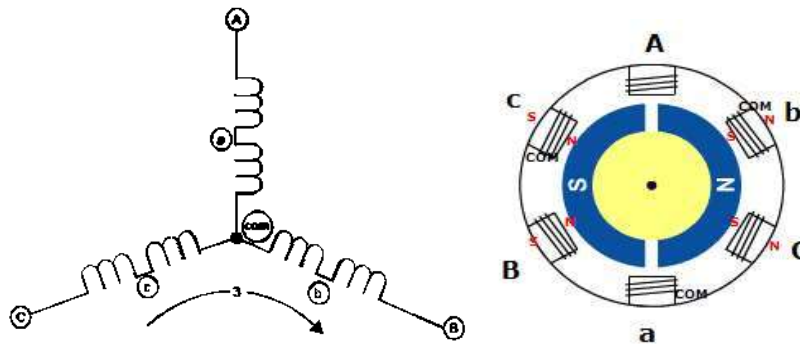


Fig. 4.3 Paso 3 de la secuencia de alimentación

El resultado obtenido en la prueba fue el esperado y al igual que en la prueba anterior el motor giro un poco en sentido de las manecillas del reloj.

Paso 4: En este paso la secuencia de alimentación es de las bobina hacia la bobina

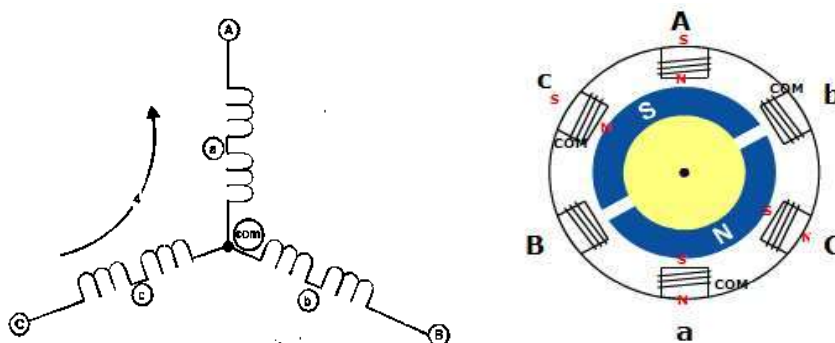


Fig. 4.4 Alimentación de las bobinas C hacia A

El sentido de giro fue nuevamente el esperado por lo cual el funcionamiento es correcto ya que en caso de que gire en sentido opuesto a las manecillas del reloj es que ocurre un error y que la prueba no se desarrollo correctamente.

Paso 5: La combinación siguiente fue de la bobina B hacia la bobina A

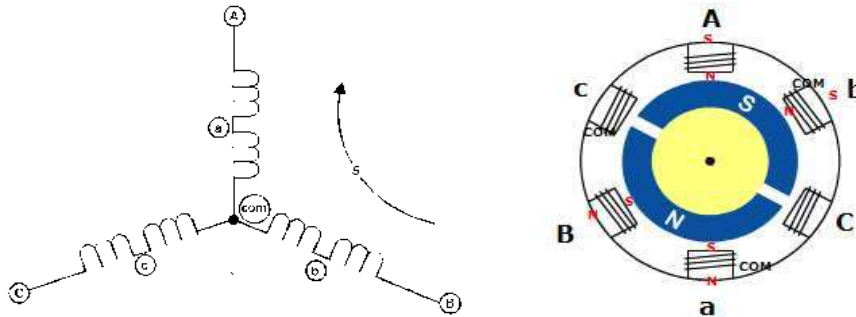


Fig. 4.5 Paso 5 en la secuencia de alimentación en el orden correcto (Sentido horario)

Aquí también el resultado fue el correcto siguiendo la secuencia correcta de giro.

Paso 6: Este es el último paso para terminar de dar una revolución eléctrica en la práctica una revolución eléctrica muchas veces no es el equivalente a una revolución mecánica.

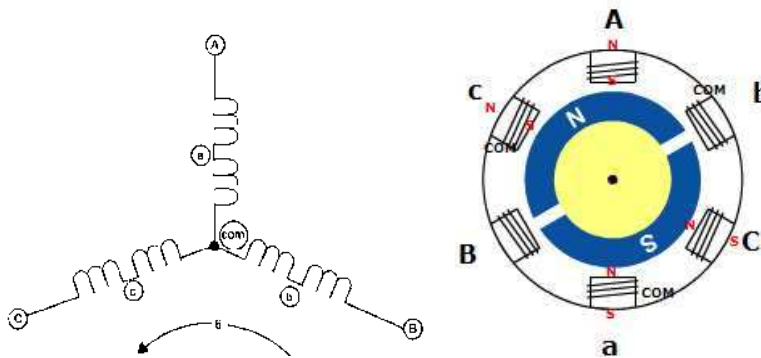


Fig. 4.6 Ultimo paso en la secuencia de alimentación

Como se comento anteriormente la revolución eléctrica si se llevo a cabo, pero la revolución mecánica no, es decir el numero de polos en la realidad no es el mismo que el número de polos teórico y la secuencia fue la correcta por que el motor giro correctamente.

4.2 Prueba 2: Alimentación de las bobinas del motor utilizando el microcontrolador.

En la segunda prueba que se realizó se utilizó el microcontrolador, pero en esta los sensores aun no fueron utilizados, además se utilizaron 6 transistores para formar el inversor trifásico para proporcionar la corriente requerida por el motor, el diagrama de la Figura 4.7 muestra el circuito utilizado para esta prueba.

De la Figura 4.7 se destaca que las salidas del microcontrolador con número impar es decir RD1, RD3 y RD5 antes de ir a la base de los transistores con número impar, son conectados a un circuito inversor (negado) debido a que estos transistores se dispararan con un 0 lógico, es decir los transistores Q1, Q3, y Q5 son transistores que se activan con una entrada lógica 0 y se deshabilitan con una entrada lógica 1, en cambio las salidas del microcontrolador con numero par las que serian RD0, RD2 y RD4 van directamente conectadas a un seguidor (buffer) esto ocasiona que la corriente se incremente para que los transistores se saturen y se disparen completamente evitando daños, es decir los transistores con números pares se habilitan con un 1 lógico y se deshabilitan con un 0 lógico contrario a los antes mencionados.

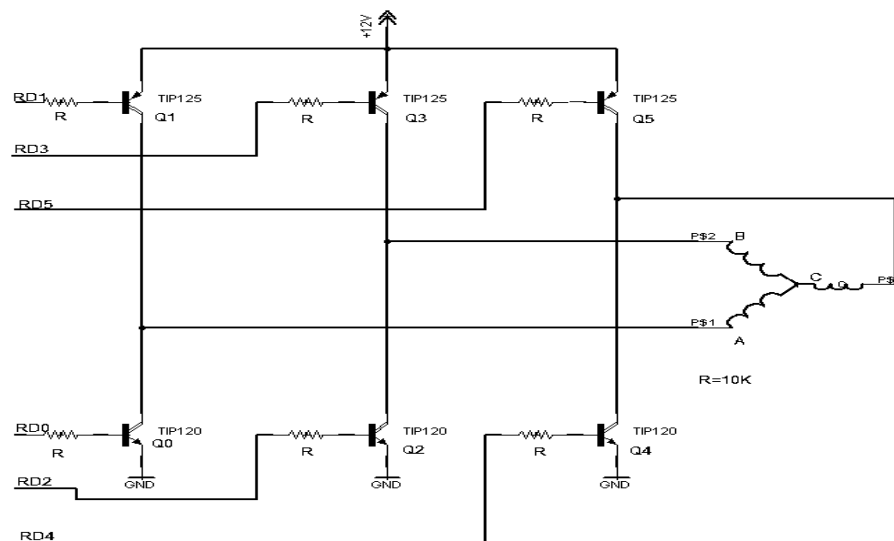


Fig. 4.7 Diagrama de los *drivers* de los transistores

En la figura 4.7 además se muestra como las salidas del microcontrolador (RD0, RD1...RD5) se conectan al inversor trifásico que alimenta el motor y lo hace girar.

A continuación se muestra en la tabla 9 la secuencia en que son alimentados los transistores:

Tabla 9 Secuencia de alimentación de los transistores

Paso #	Q+	Q-
1	Q1	Q2
2	Q5	Q2
3	Q5	Q0
4	Q3	Q0
5	Q3	Q4
6	Q1	Q4

Se utiliza el compilador PICC-lite para generar el código del microcontrolador el código completo empelado para esta aplicación se encuentra en el apéndice A.

Un diagrama de bloques simplificado que muestra de manera general la lógica del programa que se utilizo para esta prueba se muestra en la Figura 4.8.

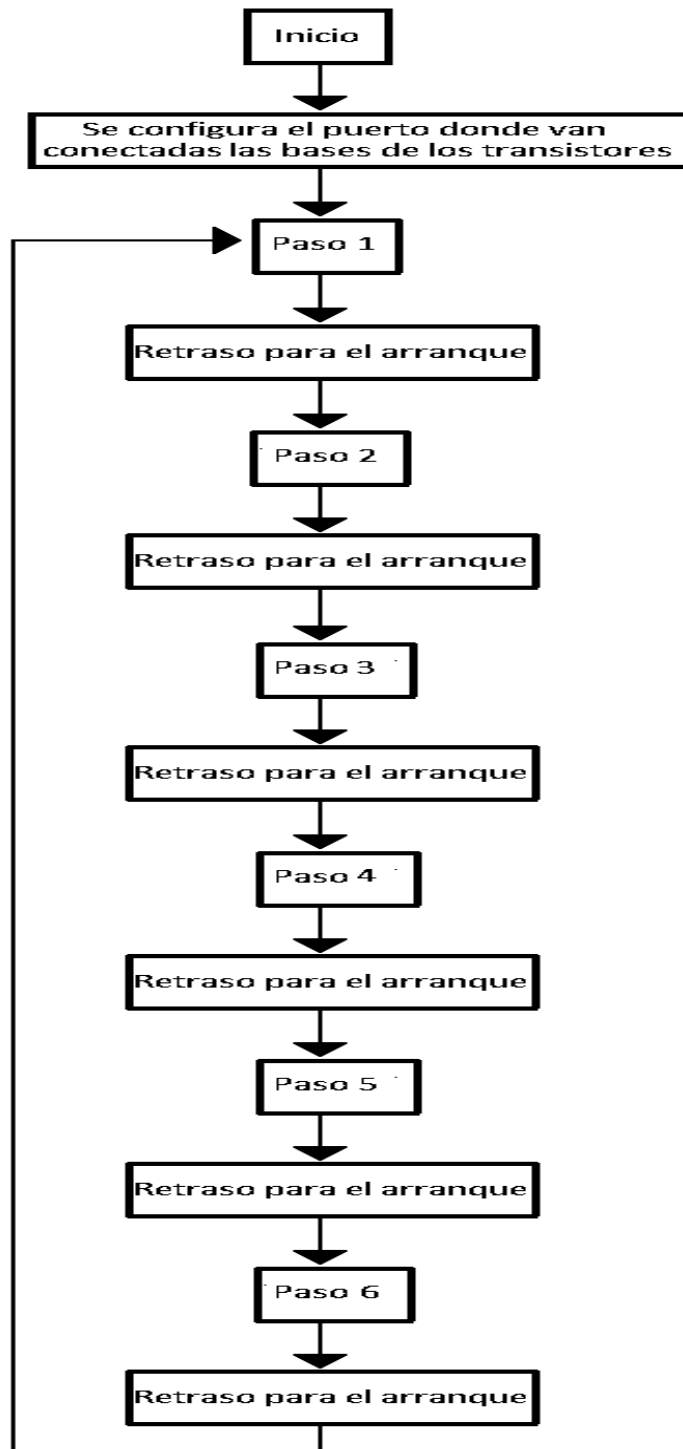


Fig. 4.8 Diagrama simplificado de la programación del microcontrolador para la prueba 2.

En esta prueba el motor funciono adecuadamente, pero el inconveniente de no utilizar los sensores fue que la velocidad alcanzada es demasiado pequeña, es decir este motor se caracteriza por su gran velocidad, pero en esta prueba el motor no alcanzo la velocidad deseable, además de que el par que desarrollaba era muy pequeño y con cualquier interferencia provocaba el paro del mismo, esto debido al hecho de no conocer la posición del rotor al momento de energizar las bobinas, lo cual provoca que no se alimente en el momento adecuado en el que se produciría el par máximo.

4.3 Prueba 3: Pruebas aplicadas a los sensores efecto Hall

Los sensores de efecto Hall fueron sometidos a diversas pruebas para determinar su funcionamiento.

El primer paso que se realizo para determinar el funcionamiento de los sensores fue determinar la función de cada uno de los 4 pines con los que cuenta el sensor, después se les proporciono la entrada adecuada a los pines para que funcionen óptimamente, posteriormente se llego a la conclusión de que el voltaje que proporcionan estos sensores es muy pequeño por lo cual no pueden ser utilizados directamente para realizar la operación deseada con el microcontrolador debido a que este funciona con 5 volts y los sensores proporcionaban un voltaje del orden de los mili-volts cada uno, para proporcionar una salida adecuada se llevo a cabo el diseño y construcción de una interfaz analógica.

Para utilizar estas salidas fue necesario acoplarlos a unos amplificadores diferenciales, para posteriormente acoplarlos a otra etapa amplificadora de 10 veces más la señal que recibe y esta señal se utilizara en un detector de cruce por cero que entregara la señal utilizable para esta aplicación. El diagrama que se utilizo para adaptar y amplificar la señal es el que se muestra en la Figura 4.9.

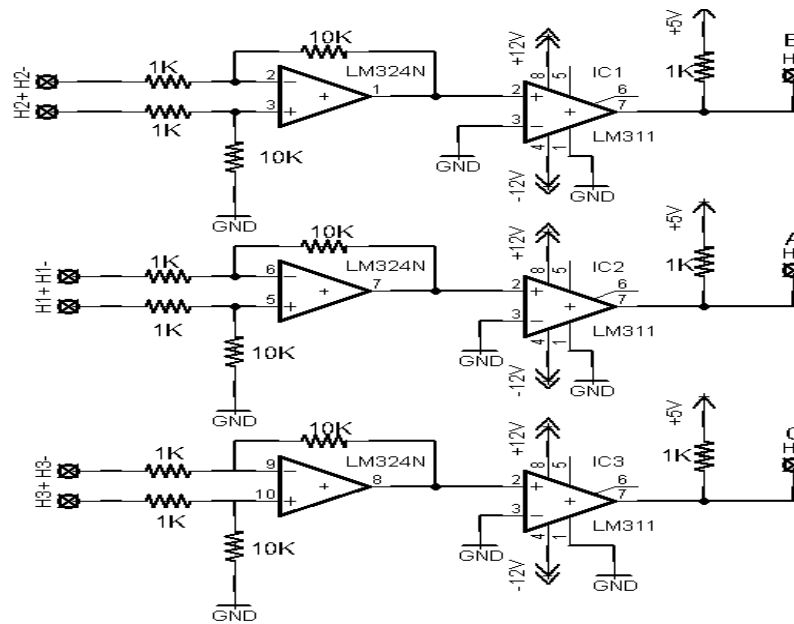


Fig. 4.9 Diagrama esquemático de acondicionamiento de la señal

Se puede observar como en la figura 4.9 se muestran todos los elementos necesarios para obtener la señal entregada por los sensores con un nivel adecuado, estos sensores entregan una señal analógica y se requiere una señal digital como se había esperado al principio, lo cual provocada gran confusión por el hecho de no poder detectar las salidas en forma digital, esta es la principal razón por la que se desarrollado este circuito auxiliar, como se menciono las señales de entrada que entregan los sensores es amplificada 10 veces, esto se lleva a cabo en el LM324N, después estas señales son introducidas al LM311N el cual esta como comparador para crear un detector de cruce por cero y estas salidas tienen un nivel de 5volts, las cuales van al microcontrolador para ser sensadas.

Las señales senoidales que entregan los sensores fueron monitoreadas con un osciloscopio de cuatro canales como se observa en la Figura 4.10

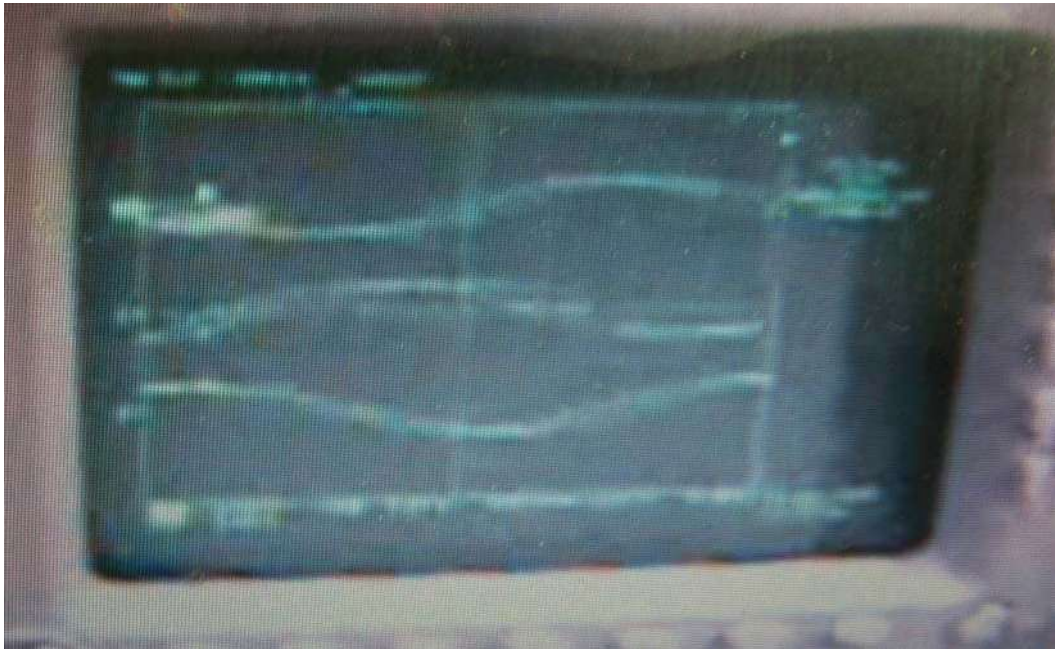


Fig. 4.10 Señales de los sensores de efecto Hall monitoreadas por el osciloscopio

En la Figura 4.11 se puede observar físicamente el circuito impreso que recibe las señales analógicas de los sensores.

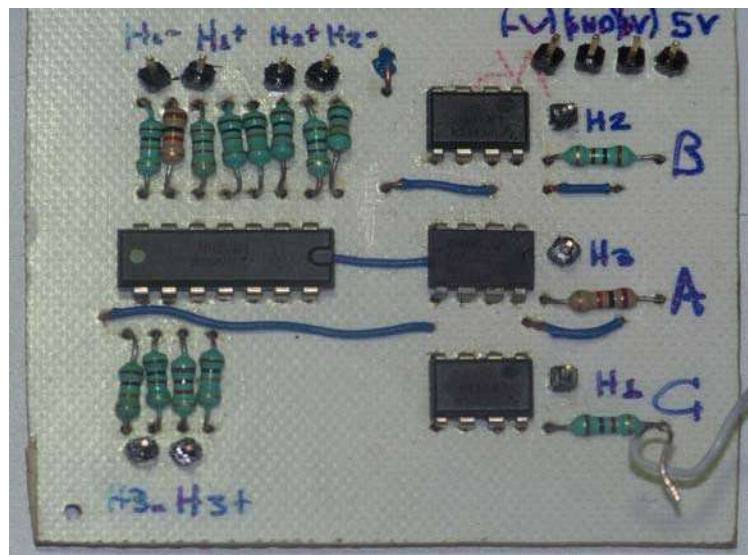


Fig. 4.11 Circuito auxiliar de los sensores efecto Hall

Estas señales son proporcionadas a la salida del circuito auxiliar, las cuales son salidas lógicas por tener valores de 0 y 5 volts (0 y 1 lógicos), por lo tanto ya son aprovechables para el microcontrolador.

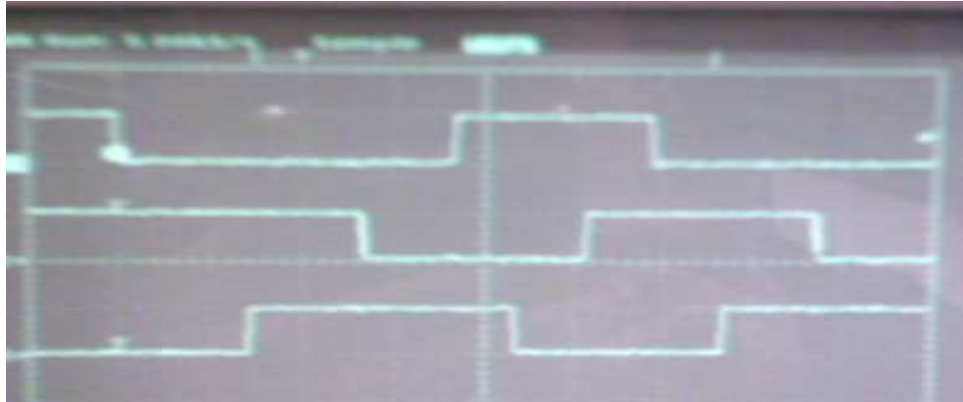


Fig. 4.12 Salidas monitoreadas por el osciloscopio entregadas por el circuito implementado para los sensores

4.4 Prueba 4: Prueba final conjuntando todos los elementos del control

Esta fue la prueba que se llevo acabo al final después de haber experimentado con la secuencia del motor, con los sensores y con el microcontrolador operando en modo PWM, este modo se utiliza para variar la velocidad del motor.

En esta ultima prueba se utilizan todos los elementos que se van implementar para lograr un desempeño máximo, ya que es necesario utilizar elementos auxiliares para lograr un funcionamiento efectivo, por ejemplo entre otros se utilizo el circuito integrado TC4469 el cual funciona como una clase especial de compuerta AND además de funcionar como una buffer de corriente esto para que los transistores se saturen completamente evitando así su calentamiento y por consecuencia sufrir daños por el funcionamiento del motor.

En la figura 4.13 se muestran las patitas que fueron utilizados del microcontrolador para llevar a cabo la prueba.

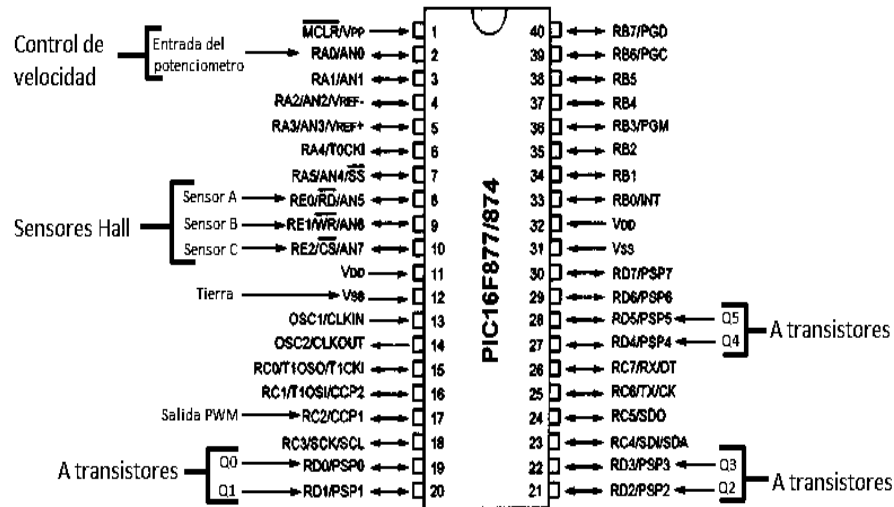


Fig. 4.13 Patitas utilizadas del microcontrolador

Para hacer girar el motor en primera instancia es necesario sensar la posición en la que se encuentra el rotor, la cual es determinada por los sensores de efecto Hall, después de que se obtiene la posición del rotor mediante las salidas que entrega el circuito acondicionador, el microcontrolador alimenta las bases de los transistores para que se lleve a cabo la secuencia en la que el motor comienza a girar. Como se observa en la Figura 4.14 es necesario que dos transistores operen de manera conjunta para que se lleve a cabo el flujo de corriente, en otras palabras, el flujo de corriente no se puede llevar a cabo si dos de los transistores no operan de manera conjunta, además de que se cumpla que dos de los transistores conduzcan en forma simultanea es necesario que opere un transistor que esta conectado a la fuente de 12V (parte superior derecha) con uno que este conectado con tierra (parte inferior derecha) esto para que el circuito se cierre y haya flujo de corriente y por consiguiente par eléctrico en las bobinas del motor.

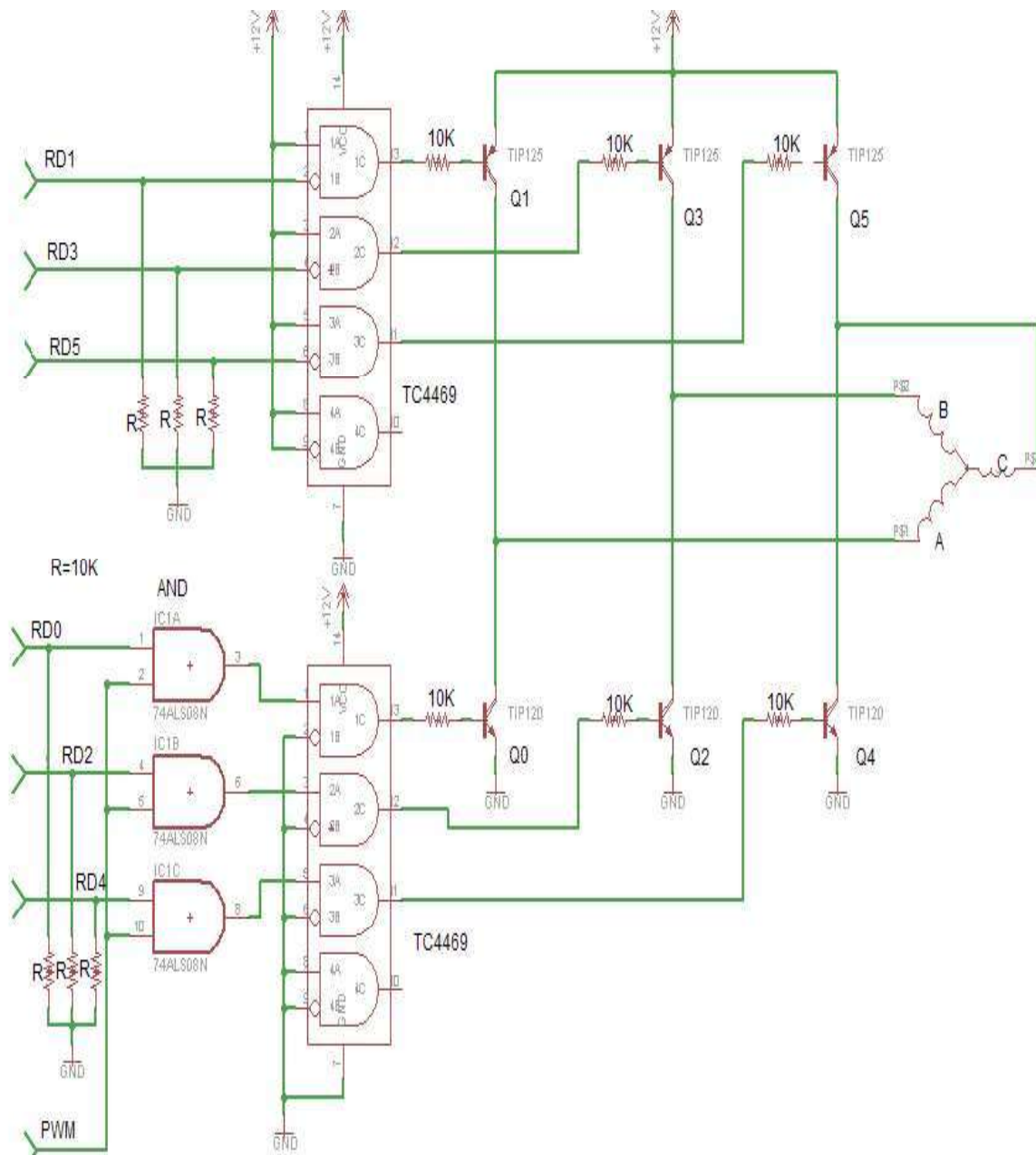


Fig. 4.14 Diagrama esquemático del circuito de potencia para el control del motor.

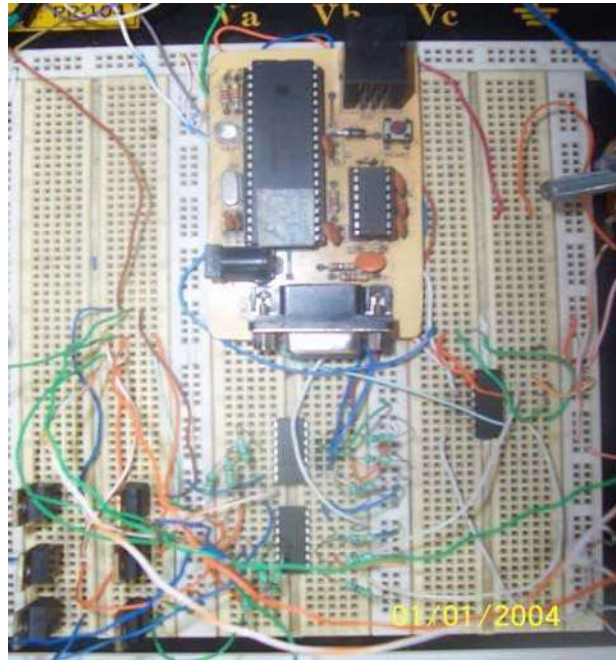


Fig. 4.15 Forma física del circuito para realizar las pruebas al motor.

En la figura 4.15 se observa la forma en como quedaron físicamente conectados el microcontrolador y los demás circuitos mostrados en el diagrama esquemático, en la parte inferior del microcontrolador se encuentran los circuitos TC4469 y el circuito 7408 (AND) y los transistores, los cuales de izquierda a derecha son TIP 125 y TIP 120 respectivamente, estos transistores vienen con un diodo incluido internamente el cual ayuda a mejorar el funcionamiento del sistema. En esta prueba el *software* de la prueba anterior fue modificado. Dos de las razones más importantes es por que el microcontrolador entrega las salidas que van al inversor y funciona como sensor detectando las salidas entregadas por los sensores de efecto Hall, para determinar la secuencia en que debe ser energizado el motor y lograr el par máximo. Así como también se debe habilitar la salida PWM.

Un diagrama esquemático que muestra la forma en que quedo el *software* de manera muy general se muestra en la Figura 4.16, el programa completo se puede observar en el apéndice B. Se puede ver como al agregar los sensores a toda la conexión se modifico en gran parte, ya que ahora en lugar de simplemente alimentar las bobinas en determinado orden para lograr un

sentido deseado, el paso que seguirá es determinado mediante los sensores de efecto Hall que indican la posición del rotor y la secuencia en que han de energizarse las bobinas.

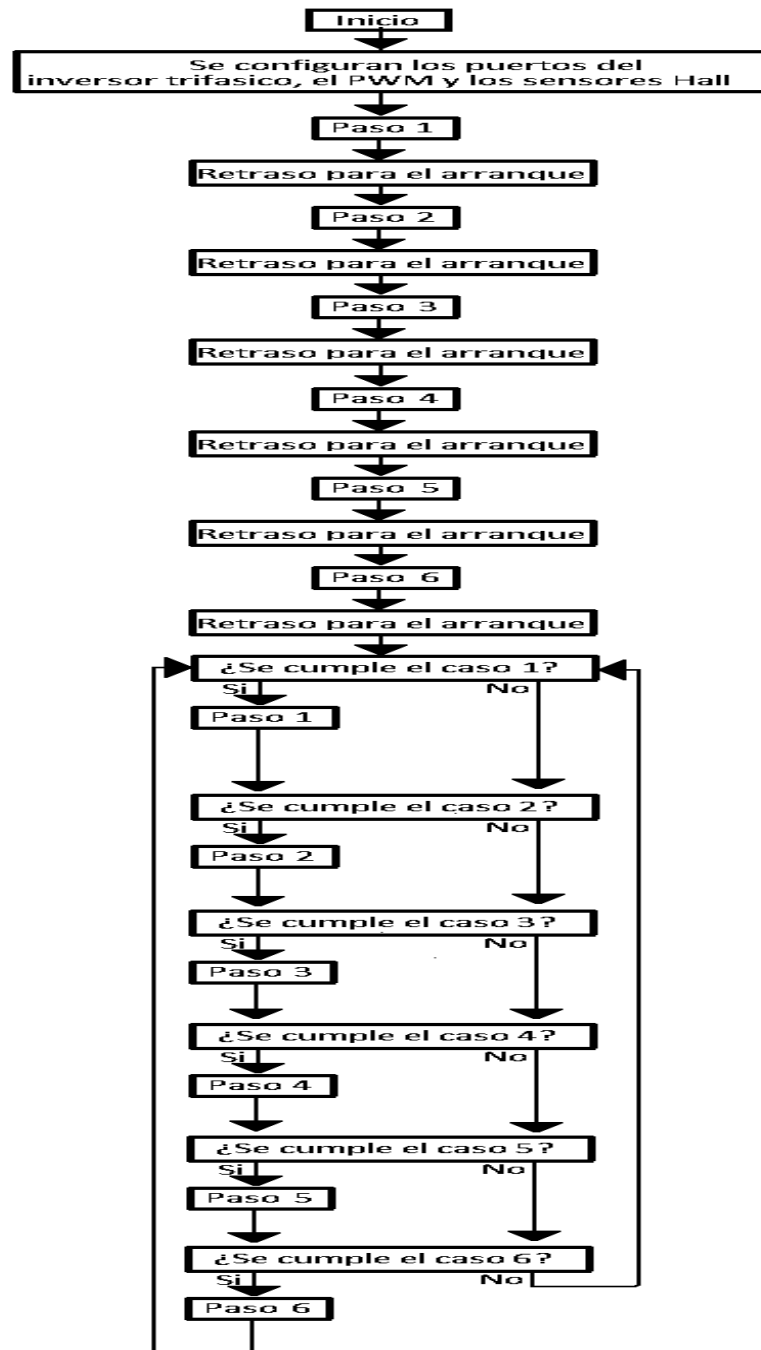


Fig. 4.16 Diagrama a bloques simplificado del programa implementado para el microcontrolador

En la Figura 4.17 se muestra la forma física mediante la cual se llevo a cabo la prueba final además se puede ver de manera general la conexión de todos los elementos que permitieron el control del motor.

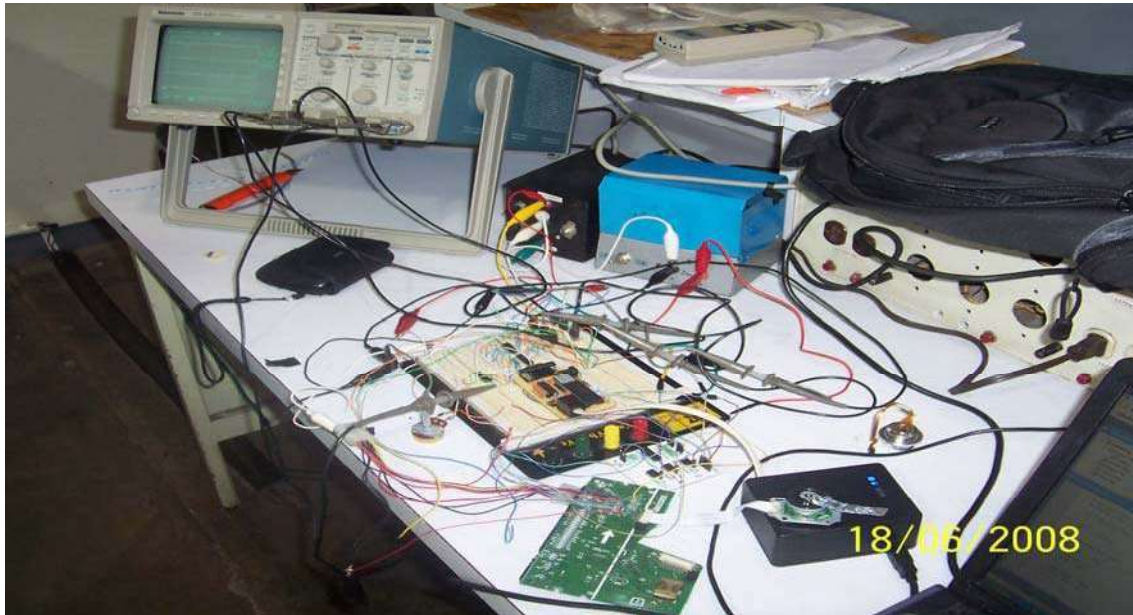


Fig. 4.17 Conexión total mediante la cual se llevo a cabo la prueba

En la Figura 4.18 se muestra como luce el sistema antes de poner a funcionar todos los componentes, obsérvese como la pequeña tira de aluminio que le fue colocada para lograr sensar la velocidad con el tacómetro óptico no esta sufriendo ninguna deformación ya que aun no existe giro en el rotor del motor y por lo cual al no haber fricción con el aire no hay deformamiento, después de echarlo a andar como se muestra en la Figura 4.19 se observa un pequeño deformamiento lo cual indica que existe una gran fricción con el aire.

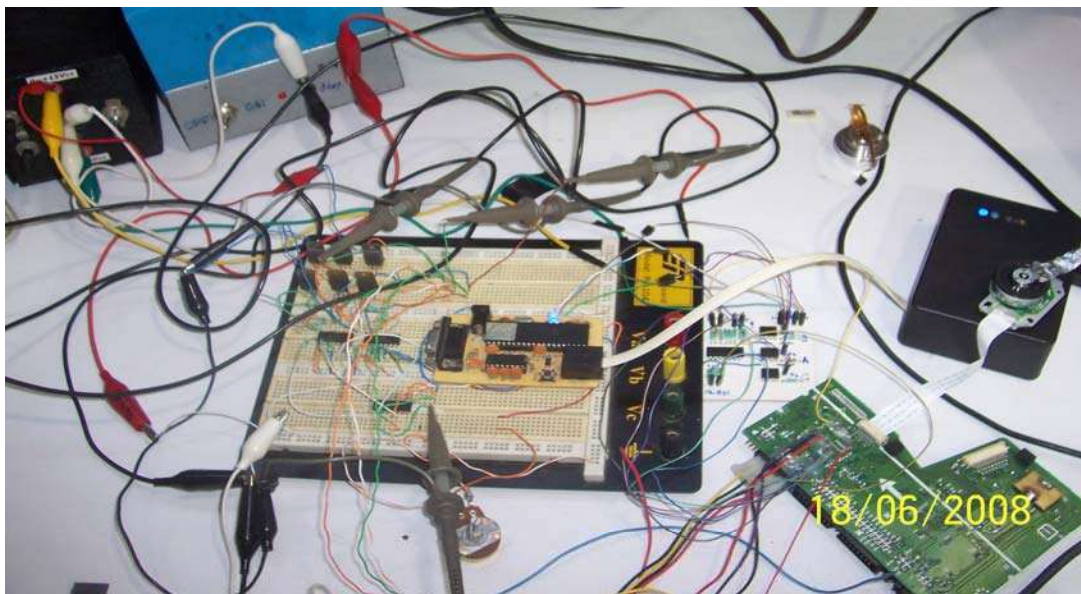


Fig. 4.18 Diagrama físico de las conexiones del motor antes de funcionar.

El motor alcanzo altas velocidades y también puede girar a velocidades pequeñas, por lo cual el control fue efectivo al hacer girar el motor en un amplio rango de velocidades.

El deformamiento que se observo en la tira de aluminio se muestra en la Figura 4.21

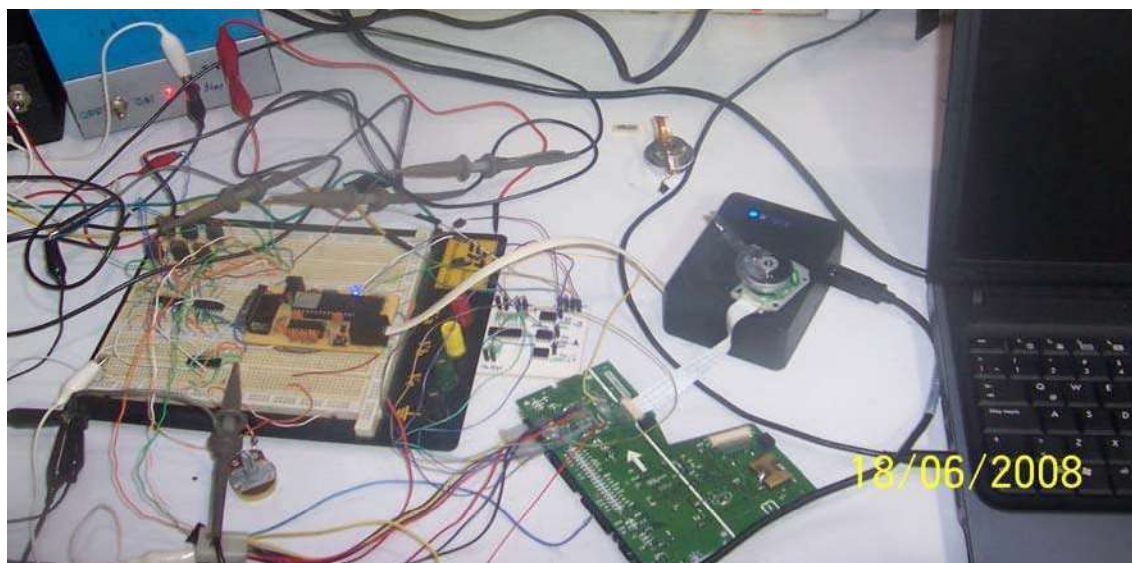


Fig. 4.19 Diagrama físico y conexiones con el sistema funcionando.

Las señales que eran entregadas al motor se observaron con el osciloscopio para ver la variación en su ancho de pulso, las señales observadas son las que se muestran en la Fig. 4.20



Fig. 4.20 Señales monitoreadas con un osciloscopio con el sistema en funcionamiento

En las señales monitoreadas por el osciloscopio se logra observar como al incrementar el ancho del pulso que es el que se encuentra en la parte inferior se incrementaba también los pequeños pulsos vistos en las tres señales.



Fig. 4.21 Deformación en la tira de aluminio debido a la velocidad

Al realizar estas pruebas se cumplieron los objetivos ya que el motor funciono de manera aceptable, alcanzando una velocidad medible de hasta 17,000 RPM!, pese a esto no se alcanzo la velocidad tope a la cual puede girar el motor, realizando unos pequeños ajustes al sistema empleado se podría lograr un desempeño aprovechable en alguna de las aplicaciones que se le puede dar a este motor.

En la Figura 4.22 se muestra como es que luce el prototipo final para el control del motor, ya que los otros circuitos fueron realizados únicamente para realizar pruebas y demostrar que los circuitos que se emplean son los adecuados.

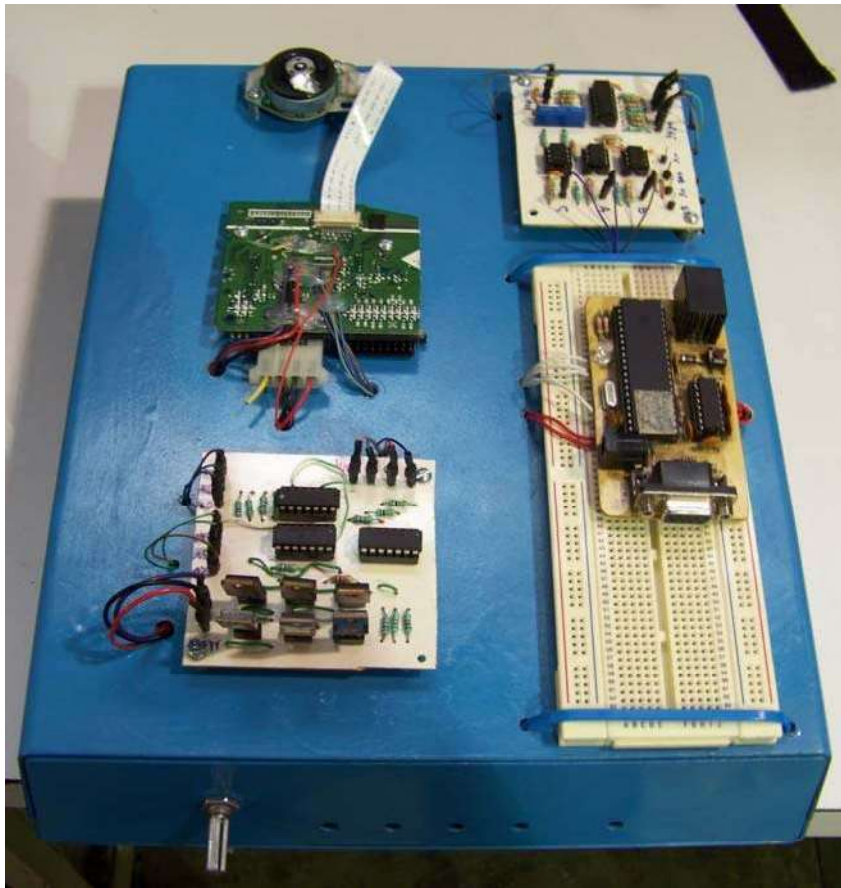


Fig. 4.22 Prototipo terminado.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

Después de haber realizado las pruebas al motor y los sensores de efecto Hall y hacerlos funcionar en conjunto con el microcontrolador se puede llegar a algunas conclusiones sobre el funcionamiento de estos motores, algunas de las cuales serían:

- a) Alcanza velocidades que otros motores no alcanzarían.- Este motor funciona a velocidades que ninguno de los otros motores eléctricos puede alcanzar sin sufrir algún daño, ya que por ejemplo los motores de CD se ven limitados por el rozamiento de las escobillas y los motores asíncronos limitan su velocidad debido al deslizamiento.
- b) Pese a sus ventajas también cuenta con desventajas.- La principal desventaja de este tipo de motores es el hecho de depender de un elemento externo a él para lograr funcionar adecuadamente ya que el BLDC como se mostro en la prueba numero 2 no funciona de manera correcta si no esta operando en manera conjunta con los sensores de efecto Hall.
- c) Se comprobó que es motor síncrono.- Debido a su tamaño puede no ser considerado trifásico al funcionar solo con CD, pero debido al hecho de contar con tres bobinas conectadas en estrella y estas ser alimentadas en manera síncrona para el funcionamiento no queda ninguna duda de que en realidad es motor síncrono.
- d) Tiene muchas aplicaciones este motor.- Además de contar con una buena velocidad este motor cuenta con un par excelente lo que le permite ser aplicado en circunstancias en donde sea requerido ambas características de funcionamiento.

A continuación se mencionaran algunas de las características de estos motores:

- Voltaje de alimentación: 12 volts.
- Corriente de consumo: 0.2 - 2.5 A.
- Velocidad máxima alcanzada : 17000 RPM.

5.2 Trabajos futuros

Creo que la realización de esta investigación fue apenas el primer pasó de muchos que se pueden dar en el control de este tipo de motores ya que podría dárseles muchas aplicaciones a estos motores si se logra avanzar más en el tema.

Por ejemplo un avance que seria significativo para estos motores seria el hecho de lograr operarlos con baterías sin la necesidad de estar conectados a una fuente de poder y aun así trabajar satisfactoriamente en todas las demandas requeridas.

Se podrá tomar como base el prototipo para llevar a cabo practicas en el laboratorio y entender más acerca de estos motores.

Y como lo dije anteriormente se podría llegar a realizar el taladro de dentistas, el cual trabaja a grandes velocidades.

APÉNDICE A: CODIGO DE LA PRUEBA 2

```
#include<pic.h>

void Delay(void)

{
    unsigned char i,j;

    for (i=0;i<30;i++)

        {

            for (j=0;j<30;j++)

                {

                }

        };

}

main()

{ TRISD=0xC0;

    while(1)

    { PORTD=0x06;

        Delay();

        PORTD=0x24;

        Delay();

        PORTD=0x21;

        Delay();

        PORTD=0x09;

        Delay();

        PORTD=0x18;

        Delay();

        PORTD=0x12;

        Delay();

    }

}
```

APÉNDICE B: CODIGO PRUEBA FINAL

```
#include<pic.h>

__CONFIG(0xF73A);

unsigned char Dato;

unsigned char sensor_Hall;

void Delay(unsigned char tiempo)
{
    unsigned int i,j;
    for(j=0;j<tiempo;j++)
        for(i=0;i<100;i++)
            {}
}

void Arranque(void)
{
    unsigned int vueltas;
    for(vueltas=0;vueltas<6;vueltas++)
    {
        PORTD=0x06;
        Delay(50);
        PORTD=0x24;
        Delay(50);
        PORTD=0x21;
        Delay(50);
        PORTD=0x09;
        Delay(50);
        PORTD=0x18;
        Delay(50);
        PORTD=0x12;
        Delay(50);
    }
}
```

```

    }
}

main()
{
    ADCON0=0b10000001;
    ADCON1=0b00001110;
    CCP1CON=0b00001100;
    T2CON=0b00000100;
    PR2=0xFF;
    TRISC=0x00;
    TRISD=0xC0;
    TRISE=0x0B;
    sensor_Hall=0;
    Arranque();
    while(1)
    {
        if(GODONE==0)
        {
            GODONE = 1;
            Dato=ADRESH;
            CCPR1L=Dato;
        }
        if (sensor_Hall != PORTE)
        {
            sensor_Hall=PORTE;
            PORTD = 0x00;
            NOP();
            NOP();
        }
        switch(sensor_Hall)

```

```

        {

    case 0b101:
PORTD=0x06;

    break;
    case 0b100:
PORTD=0x24;

    break;
    case 0b110:
PORTD=0x21;

    break;
    case 0b010:
PORTD=0x09;

    break;
    case 0b011:
PORTD=0x18;

    break;
    case 0b001:
PORTD=0x12;

    break;
        }
    }
}

```

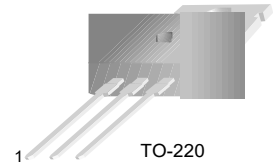
APÉNDICE C: HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR TIP 120



TIP120/121/122

Medium Power Linear Switching Applications

- Complementary to TIP125/126/127



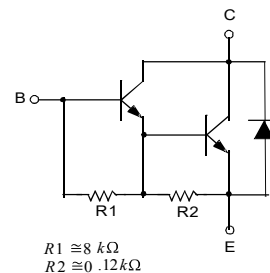
1.Base 2.Collector 3.Emitter

NPN Epitaxial Darlington Transistor

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

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : TIP120	60	V
	: TIP121	80	V
	: TIP122	100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : TIP120	60	V
	: TIP121	80	V
	: TIP122	100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	8	A
I_B	Base Current (DC)	120	mA
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	2	W
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

Equivalent Circuit



Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP120	$I_C = 100\text{mA}, I_B = 0$	60		V
	: TIP121		80		V
	: TIP122		100		V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP120	$V_{CE} = 30\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
	: TIP121	$V_{CE} = 40\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
	: TIP122	$V_{CE} = 50\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
I_{CBO}	Collector Cut-off Current : TIP120	$V_{CB} = 60\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
	: TIP121	$V_{CB} = 80\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
	: TIP122	$V_{CB} = 100\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{BE} = 5\text{V}, I_C = 0$		2	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$	1000		
		$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 3\text{A}$	1000		
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 3\text{A}, I_B = 12\text{mA}$		2.0	V
		$I_C = 5\text{A}, I_B = 20\text{mA}$		4.0	V
$V_{BE(on)}$	* Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 3\text{A}$		2.5	V
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB} = 10\text{V}, I_E = 0, f = 0.1\text{MHz}$		200	pF

* Pulse Test : $PW \leq 300\mu\text{s}$, Duty cycle $\leq 2\%$

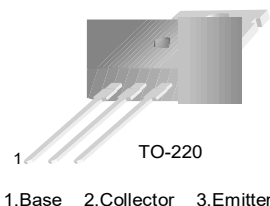
APÉNDICE D: HOJA DE DATOS DEL TRANSISTOR TIP 125



TIP125/126/127

Medium Power Linear Switching Applications

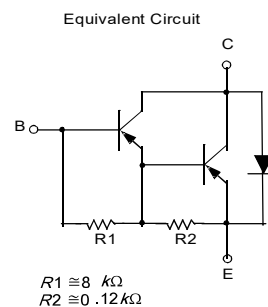
- Complementary to TIP120/121/122



PNP Epitaxial Darlington Transistor

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

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : TIP125	- 60	V
	: TIP126	- 80	V
	: TIP127	- 100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : TIP125	- 60	V
	: TIP126	- 80	V
	: TIP127	- 100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	- 5	V
I_C	Collector Current (DC)	- 5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	- 8	A
I_B	Base Current (DC)	- 120	mA
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	2	W
	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

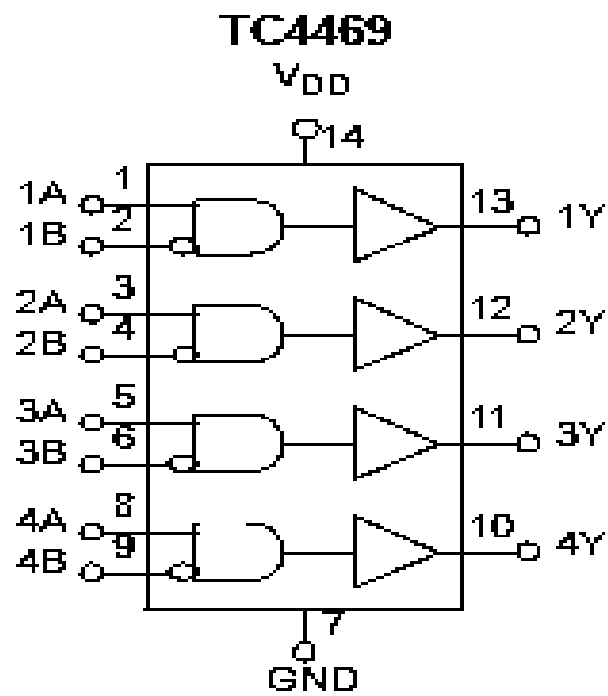


Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CE(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP125	$I_C = -100\text{mA}, I_B = 0$	-60		V
	: TIP126		-80		V
	: TIP127		-120		V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP125	$V_{CE} = -30\text{V}, I_B = 0$		-2	mA
	: TIP126	$V_{CE} = -40\text{V}, I_B = 0$		-2	mA
	: TIP127	$V_{CE} = -50\text{V}, I_B = 0$		-2	mA
I_{CBO}	Collector Cut-off Current : TIP125	$V_{CB} = -60\text{V}, I_E = 0$		-1	mA
	: TIP126	$V_{CB} = -80\text{V}, I_E = 0$		-1	mA
	: TIP127	$V_{CB} = -100\text{V}, I_E = 0$		-1	mA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{BE} = -5\text{V}, I_C = 0$		-2	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = -3\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$	1000		
		$V_{CE} = -3\text{V}, I_C = -3\text{A}$	1000		
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -3\text{A}, I_B = -12\text{mA}$		-2	V
		$I_C = -5\text{A}, I_B = -20\text{mA}$		-4	V
$V_{BE(on)}$	* Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = -3\text{V}, I_C = -3\text{A}$		-2.5	V
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB} = -10\text{V}, I_E = 0, f = 0.1\text{MHz}$		300	pF

* Pulse Test : $PW \leq 300\mu\text{s}$, Duty cycle $\leq 2\%$

APÉNDICE E: DIAGRAMA LÓGICO DEL CIRCUITO TC4469



BIBLIOGRAFÍA

[Syed Nasar 1982]

Syed A. Nasar. “Teoría y problemas de máquinas eléctricas”. Primera edición. Mc Graw Hill 1982

[Javier Sanz 2002]

Javier Sanz Feito “Maquinas eléctricas”. Primera edición. Mc Pherson 2002

[Jimie J. Cathey]

Jimie J. Cathey “Maquinas eléctricas, análisis y diseño aplicando Matlab”. Primera edición. Mc Graw Hill. ISBN 0-13-093083-0

[Hart 2001]

Daniel W. Hart. “Electrónica de potencia”. Segunda edición. Pearson educación. 2001

[Rashid 1995]

Muhammad H. Rashid. “Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones”. Segunda edición. Pearson educación. 1995

Microchip. Pagina principal. Estados Unidos de América. 2008

<http://www.microchip.com>