

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



Control electrónico para la velocidad y sentido de giro de una máquina de corriente directa sin escobillas

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura/Bachillerato

Diego Robles Morales

Cartago, Septiembre de 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector


Ing. Arnoldo Rojas Coto

Profesor lector


Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Aula F2-09, lunes 03 de septiembre del 2007

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 6-3-07

Diego Robles Morales

Diego Alberto Robles Morales

Céd: 1-1189-0109

Resumen

El Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica de República Checa está desarrollando una fuente de poder portátil para equipo de telecomunicaciones ubicado en lugares donde no hay acceso a la red eléctrica. Como parte del sistema se utiliza una máquina de corriente directa sin escobillas. Por las características físicas de esta máquina su operación requiere de un control de conmutación electrónico. Este documento describe como se desarrolló dicho control de tal forma que la máquina trabajara en el rango de velocidades requerido por la Universidad.

Palabras claves: escobillas, conmutación, microcontrolador, máquina, *Propeller*, *Spin*, velocidad

Abstract

The Department of Telecommunication Engineering of the Czech Technical University is developing a portable power source for telecommunication equipment that is located in places without access to the electric power lines. As part of the system a brushless DC engine is used. Because of the physical characteristics of this engine its operation requires an electronic commutation control. This document describes how this control was developed so that the engine could work in the range of speeds required by the University.

Keywords: brushes, commutation, microcontroller, engine, *Propeller*, speed, *Spin*.

Dedicatoria

A mi mamá y a mi papá muchas gracias por haberme apoyado en mis estudios.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1 PROBLEMA EXISTENTE E IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN	10
1.2 SOLUCIÓN SELECCIONADA	11
CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS	12
2.1 META	12
2.2 OBJETIVO GENERAL	12
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	13
3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA CD SIN ESCOBILLAS	14
3.2 TIPOS DE MÁQUINAS DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS	16
3.3 VELOCIDAD Y TORQUE DE UNA MÁQUINA CD SIN ESCOBILLAS	17
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	19
4.1 RECONOCIMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
4.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	19
4.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS Y SÍNTESIS DE UNA SOLUCIÓN	19
4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	20
4.5 REEVALUACIÓN Y REDISEÑO	20
CAPÍTULO 5: EXPLICACIÓN DEL DISEÑO	21
5.1 ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y SELECCIÓN FINAL	21
5.1.1 MIDIENDO LA F.E.M. DE RETORNO	21
5.1.2 UTILIZANDO UN SENSOR DE POSICIÓN EXTERNO	22
5.1.3 EMPLEANDO SENSORES DE EFECTO DE HALL	23
5.2 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	24
5.2.1 ETAPA DE CONTROL DIGITAL	24
5.2.2 ETAPA DE OPTO ACOUPLE	34
5.2.3 ETAPA DE POTENCIA	36
5.2.4 ETAPA DEL SENSOR	38
5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	40
5.3.1 CONTROL DEL TECLADO	42
5.3.2 CONTROL DE LA SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE LAS FASES	43
5.3.3 GENERACIÓN DE SEÑAL PWM	46
5.3.4 CONTROL DEL SENSOR	47
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54

BIBLIOGRAFÍA	55
APÉNDICES	58
A.1 GLOSARIO, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA	58
ANEXOS	61
ANEXO B.1 ESQUEMÁTICO DEL PROPELLER DEMO BOARD	61
ANEXO B.2 DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL DEL HIP4086	62
ANEXO B.3 CARTA DE ENTENDIMIENTO	63

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SOLUCIÓN.	11
FIGURA 3.1	DESPIECE DE UNA MÁQUINA DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS.	13
FIGURA 3.2	FASES DE UNA MÁQUINA CD SIN ESCOBILLAS.	14
FIGURA 3.3	MÁQUINA DE DOS POLOS.	15
FIGURA 3.4	SECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE SEIS PASOS.	16
FIGURA 3.5	MÁQUINA A) DOS CONJUNTOS FUNDAMENTALES DE BOBINAS Y CUATRO POLOS, B) TRES CONJUNTOS DE BOBINAS Y OCHO POLOS Y C) CUATRO CONJUNTOS DE BOBINAS Y OCHO POLOS.	17
FIGURA 3.6	CARACTERÍSTICAS TORQUE/VELOCIDAD DE LA MÁQUINA CD SIN ESCOBILLAS.	18
FIGURA 5.1	ESQUEMÁTICO DEL CONTROL DIGITAL	24
FIGURA 5.2	CONEXIÓN DE LOS MOSFET PARA CONTROLAR UNA MÁQUINA DE 3 FASES.	25
FIGURA 5.3	MONTAJE DEL CONTROL DIGITAL.	26
FIGURA 5.4	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE DEL <i>PROPELLER</i> .	27
FIGURA 5.5	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL <i>PROPELLER</i> .	29
FIGURA 5.6	ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL <i>HUB</i> .	31
FIGURA 5.7	ESQUEMÁTICO DE LA ETAPA DE OPTO ACOUPLE.	34
FIGURA 5.8	MONTAJE DE LA ETAPA DE OPTOACOUPLE.	35
FIGURA 5.9	ESQUEMÁTICO DE LA ETAPA DE POTENCIA.	36
FIGURA 5.10	MONTAJE DE LA ETAPA DE POTENCIA.	37
FIGURA 5.11	ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS SENSORES DE EFECTO DE HALL.	38
FIGURA 5.12	MONTAJE DE LOS SENSORES DE EFECTO DE HALL.	39
FIGURA 5.13	DIAGRAMA DE OBJETOS DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR.	40
FIGURA 5.14	RUTINAS ASIGNADAS A CADA UNO DE LOS COGS.	41
FIGURA 5.15	DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DEL TECLADO	42
FIGURA 5.16	DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE LAS FASES.	43
FIGURA 5.17	CONTINUACIÓN DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DE SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE LAS FASES.	44
FIGURA 5.18	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CONTROL DE LA PARTE ALTA DE LA ETAPA DE POTENCIA.	46
FIGURA 5.19	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE PWM.	46
FIGURA 5.20	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA LECTURA DEL SENSOR.	47
FIGURA 6.1	SEÑALES DE SALIDA DE CONTROL DEL <i>PROPELLER</i> .	48
FIGURA 6.2	SEÑALES DE SALIDA DEL OPTO ACOPLADOR.	49
FIGURA 6.3	SEÑALES DE TENSIÓN EN LAS COMPUERTAS DE LOS MOSFET.	50
FIGURA 6.4	VELOCIDADES MEDIDAS PARA LA MÁQUINA CD SIN ESCOBILLAS.	51
FIGURA 6.5	BOSQUEJO DE LAS SEÑALES DE CONTROL PARA LAS COMPUERTAS DE LOS MOSFET.	53

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1	CARÁCTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS.	11
TABLA 5.1	SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE FASES EN DIRECCIÓN A FAVOR DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ.	45
TABLA 5.2	SECUENCIA DE ACTIVACIÓN DE FASES EN DIRECCIÓN CONTRARIA A LAS MANECILLAS DEL RELOJ.	45

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica de República Checa está desarrollando una fuente de poder portátil para equipo de telecomunicaciones ubicado en lugares donde no hay acceso a la red eléctrica.

Con este propósito, se emplea una máquina de combustión que impulsa una máquina CD sin escobillas que funciona como generador para alimentar al equipo eléctrico.

Para poder arrancar la máquina de combustión es necesario primero hacerla rotar, esto se logra con la misma máquina CD, que funciona como generador una vez que la máquina de combustión empieza a trabajar.

Debido a la forma en que está construida una máquina CD de este tipo se requiere de un sistema de conmutación electrónico para lograr el giro del rotor.

El sistema con el que se contaba anteriormente para controlar la máquina CD sin escobillas no permitía una regulación continua de velocidades bajas a altas ni de la dirección de giro. Además, se deseaba reemplazar el microcontrolador utilizado en el diseño anterior por uno de menor costo.

1.2 Solución seleccionada

Para lograr que la máquina funcione satisfactoriamente se requirió de un sensor para medir la posición del rotor, una etapa de control digital y una etapa de potencia para regular la velocidad y dirección. En la figura 1.1 se muestra un diagrama de bloques de la solución que se implementó.

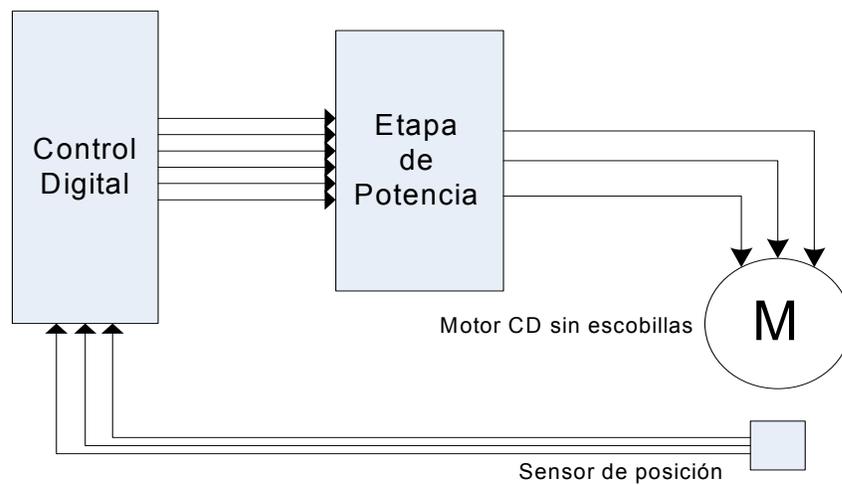


Figura 1.1 Diagrama de bloques de la solución.

En la tabla 1.1 se muestran las características de la máquina de corriente directa sin escobillas utilizada para este proyecto.

Tabla 1.1 Características de la máquina de corriente directa sin escobillas.

Tensión nominal (V)	Velocidad nominal (rpm)	Potencia nominal (W)	Torque pico (Nm)	Corriente pico (A)
24	10000	15	0,0426	2.8

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Diseñar y construir una fuente de poder portátil para equipo de telecomunicaciones colocado en lugares donde no llegue la red eléctrica.

2.2 Objetivo general

Controlar la velocidad de una máquina CD sin escobillas para un rango continuo de 0 a 10000 rpm con ambos sentidos de giro.

2.3 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un sistema electrónico que controle la activación de cada una de las fases de la máquina CD sin escobillas, en ambas direcciones de giro.

Indicador: circuito de control digital

- Diseñar y construir un actuador que regule la potencia proporcionada a las bobinas de la máquina CD sin escobillas para lograr un rango de velocidades de 0 a 10000 rpm.

Indicador: etapa de potencia

Capítulo 3: Marco teórico

En una máquina CD convencional el estator es un imán permanente y en el rotor están las bobinas que son excitadas con corriente. Las escobillas controlan la conmutación conectando físicamente las bobinas en el instante correcto. Por otra parte, en una máquina de corriente directa sin escobillas las bobinas se encuentran en el estator y el rotor es un imán permanente lo cual hace necesario que la conmutación sea controlada electrónicamente. En la siguiente figura se muestra el diagrama de construcción de una máquina de este tipo.

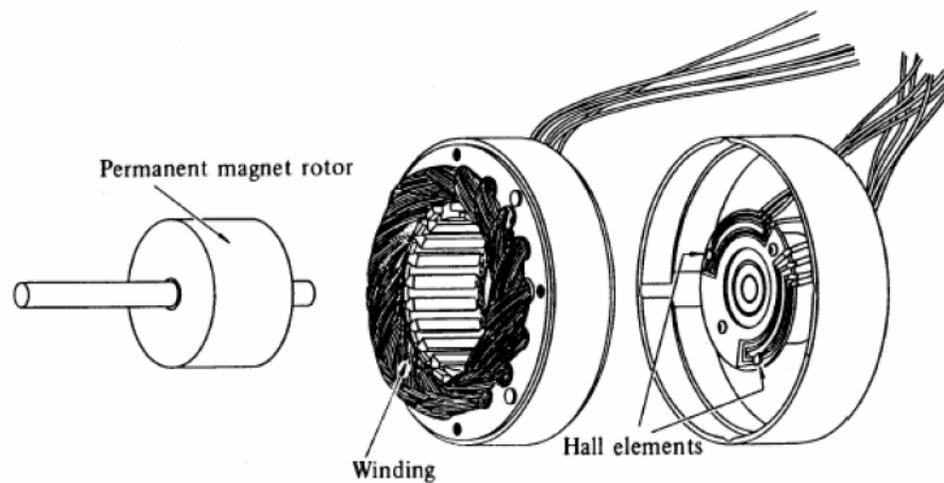


Figura 3.1 Despiece de una máquina de corriente directa sin escobillas [11].

3.1 Principio de operación de una máquina CD sin escobillas

El torque se genera por la interacción entre el campo magnético del imán permanente y el campo magnético producido por las bobinas. En el caso ideal el mayor torque se genera cuando los dos campos son ortogonales.

Para mantener la máquina en movimiento las bobinas deben ir activándose en secuencia de tal forma que el campo magnético producido por éstas sea rotatorio logrando que el rotor se mueva para alcanzarlo.

Estas máquinas son sincrónicas ya que el campo magnético generado por el estator gira a la misma frecuencia que el campo magnético generado por el rotor [2].

La clave para lograr la conmutación de la máquina está en determinar la posición del rotor y activar la bobina que produciría el mayor torque posible.

Las máquinas CD sin escobillas están constituidas frecuentemente de tres fases, como se muestra en la figura 3.2, en una topología tipo estrella y por lo tanto cada fase está separada 120 grados de la otra [4].

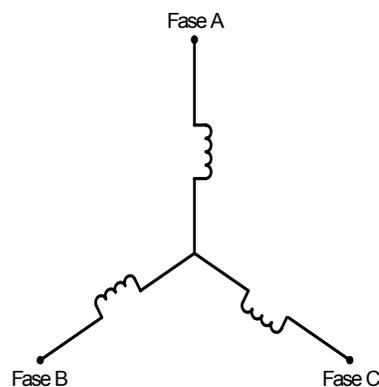


Figura 3.2 Fases de una máquina CD sin escobillas.

En el más simple de los casos el rotor está constituido por un imán permanente de dos polos (norte y sur) como se muestra en la figura 3.3.

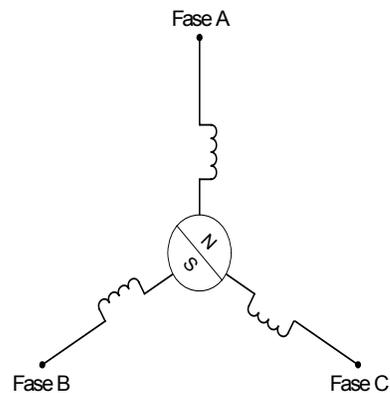


Figura 3.3 Máquina de dos polos.

En una máquina típica de tres fases se pueden distinguir seis sectores o regiones diferentes en donde habrá sólo dos bobinas energizadas a la vez, como se muestra en la figura 3.4. Por lo tanto este se conmuta cada 60 grados eléctricos para un ciclo completo de 360 grados eléctricos, para un rotor de dos polos [13]. En este caso, una revolución eléctrica equivale a una revolución mecánica.

Las flechas de la figura 3.4 indican la dirección de la corriente en cada una de las secuencias, para lograr esto usualmente se conecta una de las bobinas a la terminal positiva de la fuente y la otra se conecta a la terminal negativa de la etapa de potencia utilizando un puente de tres fases, como el que se muestra en la figura 5.2.

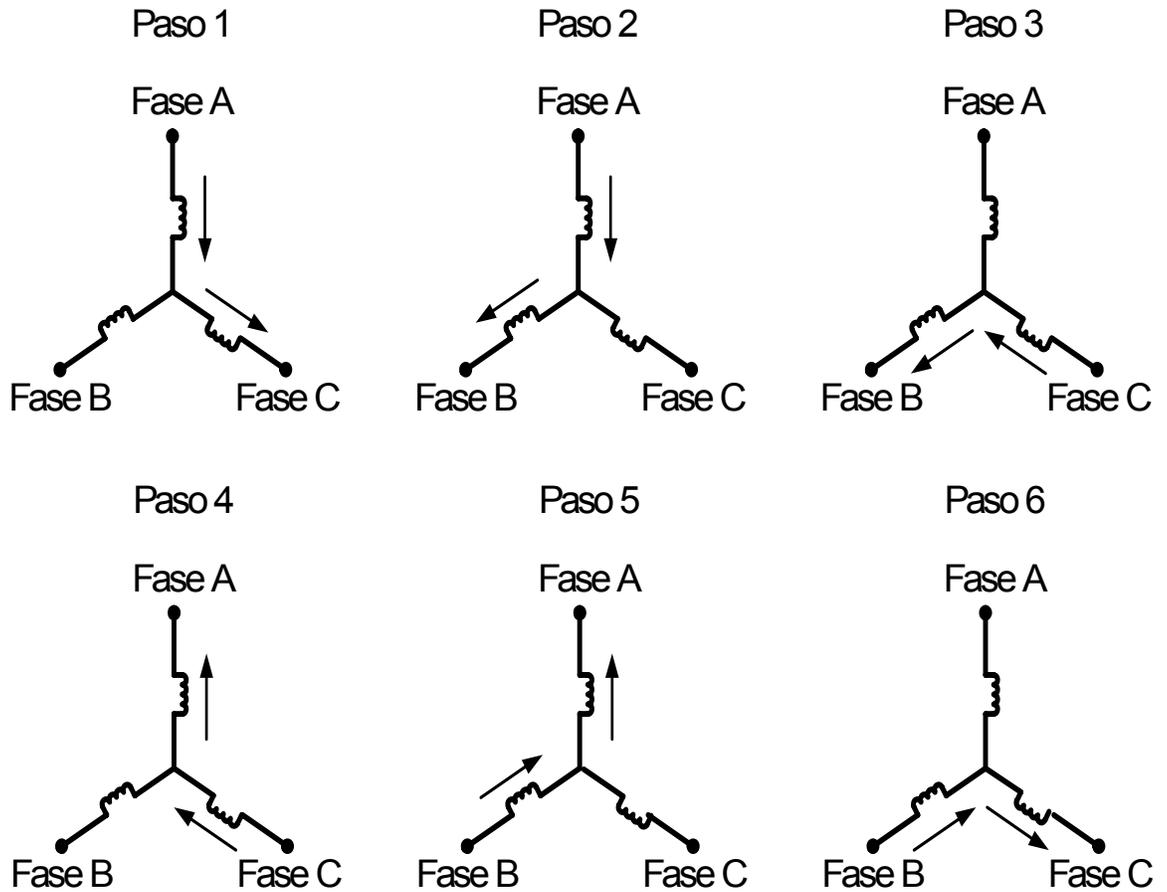


Figura 3.4 Secuencia de conmutación de seis pasos.

3.2 Tipos de máquinas de corriente directa sin escobillas

En la práctica el estator tiene más de uno de los circuitos de la figura 3.2 alambrados en paralelo y el rotor un imán permanente de múltiples polos (hasta ocho pares). El número de polos magnéticos afecta el tamaño del paso y el torque de la máquina [4]. En la figura 3.5, se muestran cortes transversales de tres diferentes tipos de máquinas CD sin escobillas.

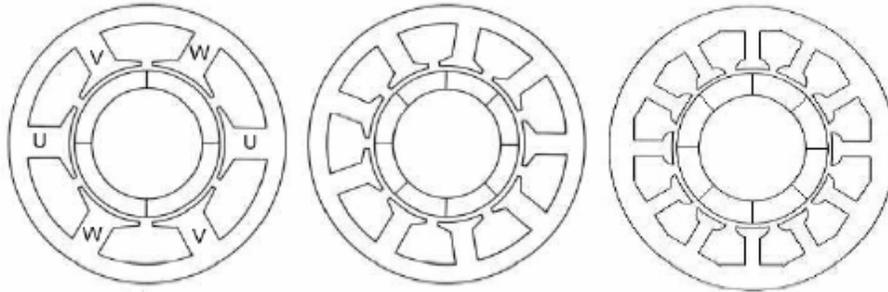


Figura 3.5 Máquina a) dos conjuntos fundamentales de bobinas y cuatro polos, b) tres conjuntos de bobinas y ocho polos y c) cuatro conjuntos de bobinas y ocho polos [9].

3.3 Velocidad y torque de una máquina CD sin escobillas

La velocidad y el torque están determinados por la fuerza de Lorentz que experimentan los electrones en los conductores. Al variar el flujo de corriente por las bobinas se puede variar el torque y la velocidad. Para controlar el flujo de corriente normalmente se controla el flujo de corriente promedio por cada una de las bobinas. Esto se puede lograr conmutando (apagando-encendiendo) la tensión suministrada a las bobinas de tal forma que la relación entre el tiempo de apagado y encendido definan la tensión promedio y por lo tanto la corriente promedio.

En la figura 3.6 se muestra una gráfica de las características torque/velocidad de una máquina CD sin escobillas. Se utilizan dos parámetros para definir una máquina de este tipo, el torque pico (T_F) y el torque nominal (T_R). Durante la operación continua la máquina se puede cargar hasta el torque nominal. El torque se mantiene constante para un rango de velocidades hasta la velocidad nominal. La máquina opera a máxima velocidad, que puede ser hasta 150% de la velocidad nominal, pero el torque empieza a disminuir.

Para aplicaciones donde se requiere que la máquina se detenga y arranque o tenga cambios de dirección frecuentes se necesita de un torque mayor al torque nominal. Esto ocurre durante un periodo corto, especialmente durante el arranque de la máquina y la aceleración [9].

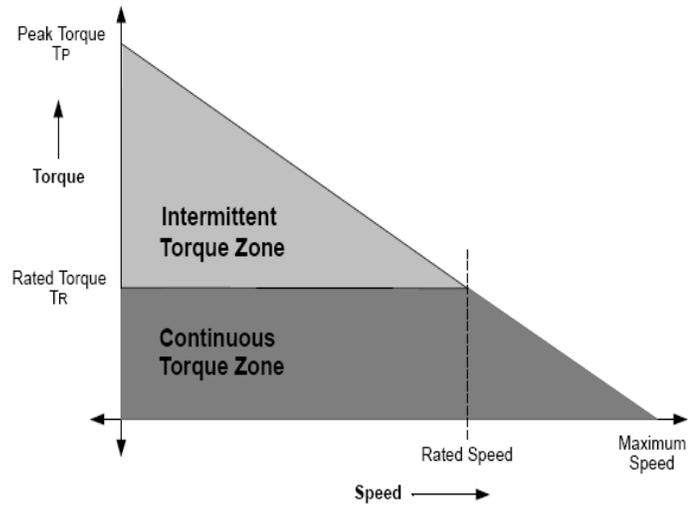


Figura 3.6 Características torque/velocidad de la máquina CD sin escobillas [9].

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para identificar el problema se entrevistó al profesor encargado del proyecto así como al estudiante que trabajó en la construcción del diseño anterior.

Las metas y las restricciones de cada una de las posibles soluciones fueron consideradas de acuerdo a la literatura encontrada sobre aplicaciones similares.

4.2 Obtención y análisis de información

La información preliminar se obtuvo a partir de las entrevistas realizadas y de búsquedas en Internet.

Se consideraron aquellas soluciones que permitieran obtener el rango de velocidades deseado y que fueran sencillas de implementar.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Inicialmente se trató de implementar la solución conservando el mismo sensor de posición externo del diseño anterior, modificando el microcontrolador utilizado y rescribiendo el programa de control.

Como el lenguaje del microcontrolador está orientado a la programación de objetos, se trabajó sobre diferentes versiones del módulo que obtiene la posición del sensor. Por restricciones propias del sensor se descartó esta solución, al no poderse alcanzar el rango de velocidades requerido.

Finalmente se optó por el uso de sensores de efecto de Hall conservando el microcontrolador y adaptando el módulo para obtener la posición del sensor. Su funcionamiento se verificó midiendo las velocidades alcanzadas por la máquina de prueba.

4.4 Implementación de la solución

La solución obtenida se presentó en forma oral ante el profesor encargado.

4.5 Reevaluación y rediseño

Para lograr abarcar el rango de velocidades bajas que no se logró con la variación del ciclo de trabajo, esto es de 0 a 650 revoluciones por minuto, es necesario modificar el software del microcontrolador para variar también la frecuencia de activación de las bobinas y cubrir este rango.

Capítulo 5: Explicación del diseño

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Como la clave del funcionamiento de una máquina CD sin escobillas está en activar la bobina adecuada en el instante correcto uno de los factores más importantes es la medición de la posición del rotor para esto se consideraron tres posibles soluciones que se describen a continuación.

5.1.1 Midiendo la F.E.M. de retorno

La forma de onda de la F.E.M. de retorno de la máquina varía en función de la posición y velocidad. Por lo tanto se puede utilizar esta información para determinar cuando activar cada bobina.

Ventajas:

- Se utiliza especialmente para ventiladores y bombas de unos watts a 1 kW.
- Elimina la necesidad de componentes para medir la posición.

Desventajas:

- Su funcionamiento es confiable solo a velocidades relativamente bajas (hasta los 4500 rpm).
- Para máquinas grandes se requiere de regulación utilizando PWM lo cual complica la medición de la F.E.M. de retorno.
- No proporciona la misma velocidad dinámica que utilizando sensores de posición.
- La máquina se debe mover con una velocidad mínima para producir la F.E.M. de retorno suficiente para ser medida.

- Cambios abruptos en la carga de la máquina pueden causar que el lazo de control de la F.E.M. de retorno se pierda.
- Conmutación a tasas muy altas de la tasa ideal resulta en una respuesta discontinua de la máquina.

Si la preocupación principal es el costo y no se requiere que la máquina opere a velocidades bajas y no se espera que la carga cambie en forma abrupta entonces este método podría ser la mejor opción.

5.1.2 Utilizando un sensor de posición externo

Consiste en colocar un sensor externo a la máquina para medir la posición absoluta del rotor con respecto a cada una de las bobinas y así determinar cuando activarlas.

Ventajas:

- Se puede utilizar en cualquier máquina CD sin escobillas.

Desventajas:

- Rango de operación limitado.

Inicialmente se intentó implementar este tipo de medición pero las restricciones propias del sensor de posición utilizado no permitieron que la máquina funcionara dentro del rango de velocidades requerido.

5.1.3 Empleando sensores de efecto de Hall

Se colocan sensores de efecto de Hall en las bobinas del estator y se mide cuando el campo magnético del rotor pasa por alguno de los sensores.

Ventajas:

- Proporcionan una conmutación robusta y simple así como un alto rendimiento.
- Lógica de control simple.
- Permite obtener el torque máximo de la máquina.
- Alta confiabilidad.

Desventajas:

- La máquina y su ensamble se vuelven más costosos.
- Problemas mecánicos de empaque especialmente si el rotor está inmerso en fluidos.
- Requiere mas cableado (5 cables adicionales) aumentando el costo de instalación.
- Fallas propias de los sensores.

Esta forma de medición permitió obtener el rango de velocidades necesario para cumplir con los objetivos del proyecto por lo que se utilizó como parte de la solución.

5.2 Descripción del *hardware*

En la figura 1.1 se muestra un diagrama de bloques de la solución implementada, en esta se pueden distinguir tres etapas principales. En las siguientes secciones se detallará el funcionamiento de cada una de estas así como de otras que no se incluyen en el diagrama.

5.2.1 Etapa de control digital

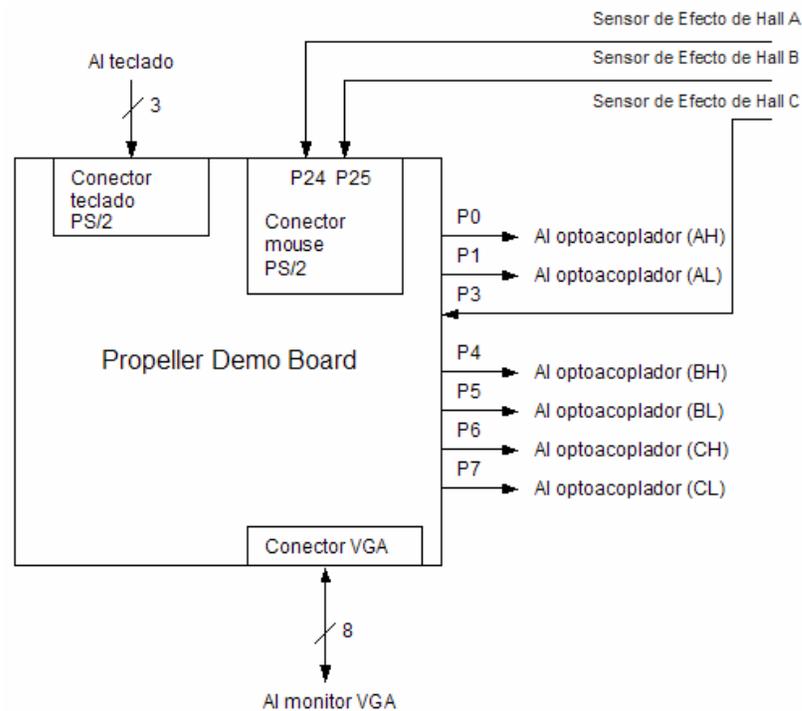


Figura 5.1 Esquemático del control digital

La figura 5.1 muestra la conexión que se realizó entre el *Propeller Demo Board* (PDB) y las otras etapas, para un esquemático más detallado del PDB revisar el anexo B.1. Las órdenes para controlar la velocidad y dirección de la máquina se enviaban mediante un teclado PS/2 al microcontrolador utilizando la conexión PS/2 ya integrada en el PDB. También, se usó un monitor VGA para revisar el estado de la máquina durante el tiempo de operación, igualmente dicha conexión ya se encontraba integrada en el PDB.

Para la activación de las bobinas de la máquina es necesario controlar tres MOSFET para la parte alta y tres para la parte baja, tal como se muestra en la figura 5.2, con este propósito se utilizaron los pines P0, P1, P4, P5, P6 y P7 del chip *Propeller*. Los pines pares se utilizaron para controlar la parte alta mientras que los impares para la baja. Los pines P24, P25 y P3 reciben las señales provenientes de los sensores de efecto de Hall colocados para medir la posición del rotor.

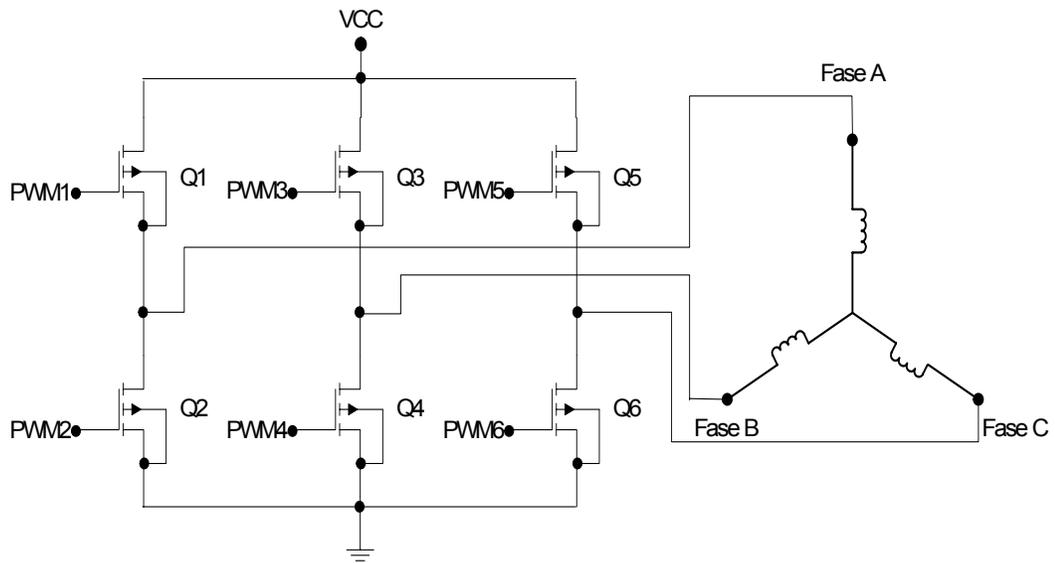


Figura 5.2 Conexión de los MOSFET para controlar una máquina de 3 fases.

En la figura 5.3 se muestra una fotografía del montaje de la etapa de control digital.

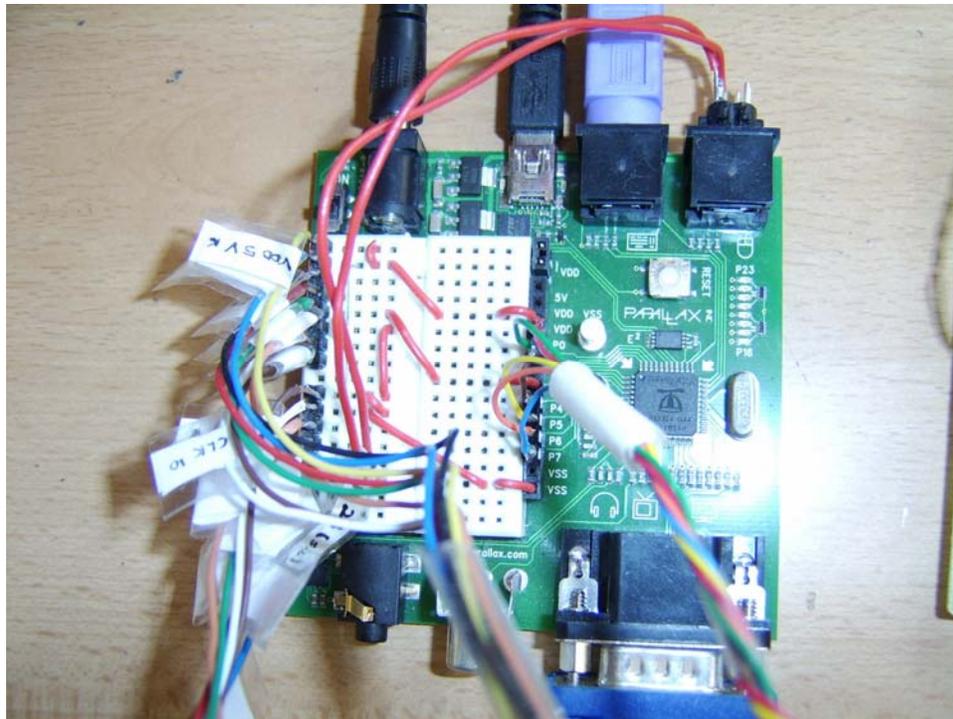


Figura 5.3 Montaje del control digital.

Para la etapa de control digital se utilizó el chip *Propeller*. Este es un microcontrolador de multiprocesamiento. Consta de 8 procesadores a los cuales se les denomina *cogs* que pueden realizar operaciones en forma independiente o cooperativa. A continuación se explica el funcionamiento de este microcontrolador.

Procedimiento de arranque

En la figura 5.4 se muestra el diagrama de flujo para el procedimiento de arranque del *Propeller*.

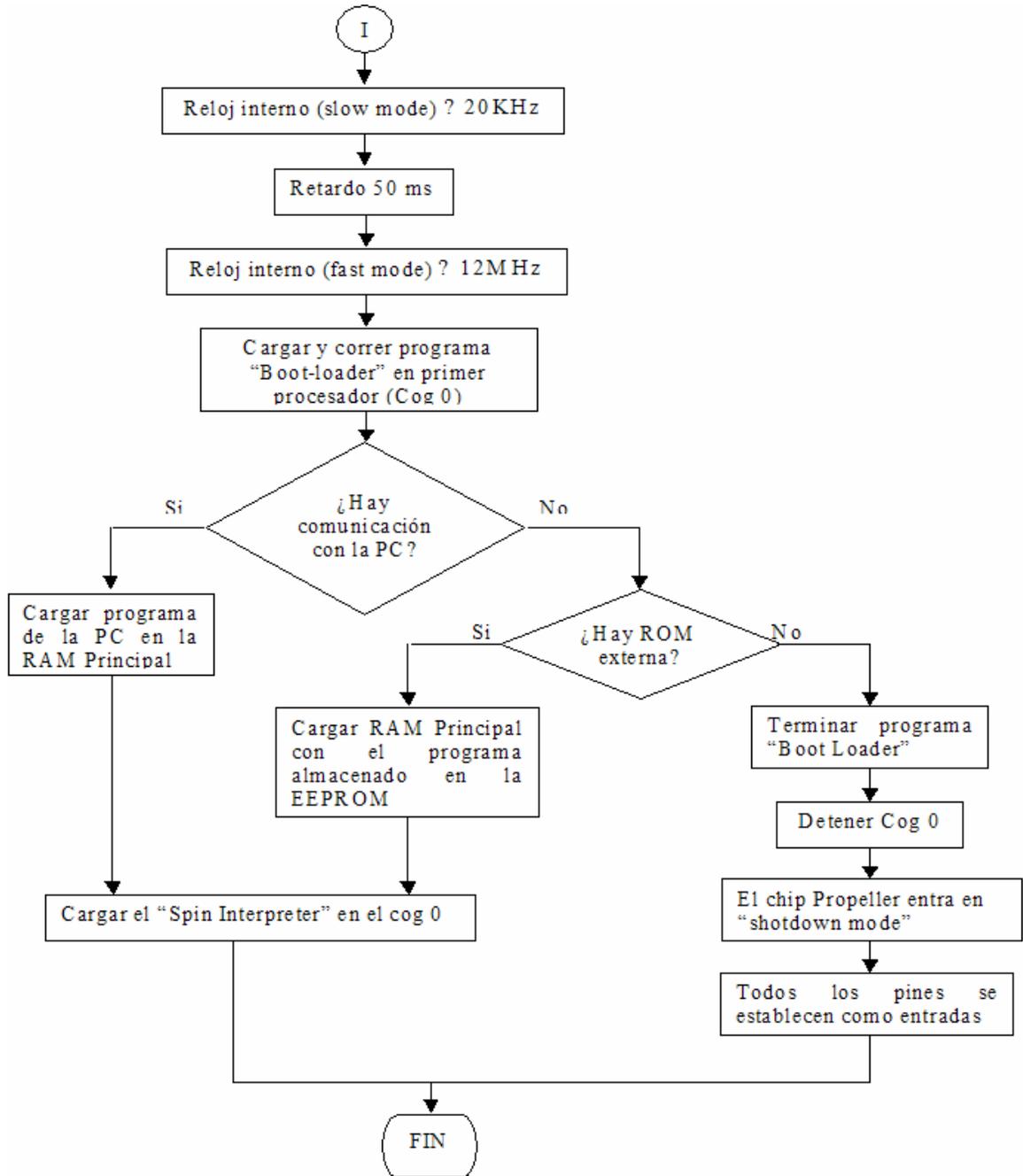


Figura 5.4 Diagrama de flujo del procedimiento de arranque del *Propeller*.

El chip *Propeller* se programa utilizando código escrito en el lenguaje *Spin* (alto nivel) o en *Propeller Assembly* (bajo nivel). El código escrito en el lenguaje *Spin* se interpreta durante el tiempo de ejecución por un *cog* corriendo el *Spin Interpreter* mientras que el código en ensamblador es ejecutado directamente por el *cog*.

Procedimiento de ejecución

Una vez ejecutado el programa de inicio del chip el funcionamiento completo es definido por la aplicación del usuario. La aplicación controla:

- Velocidad del reloj interno.
- Uso de los pines de entrada/salida.
- Configuración de los registros.
- Cuándo y cuántos *cogs* operan.

En la figura 5.5 se muestra el diagrama de bloques del *Propeller*.

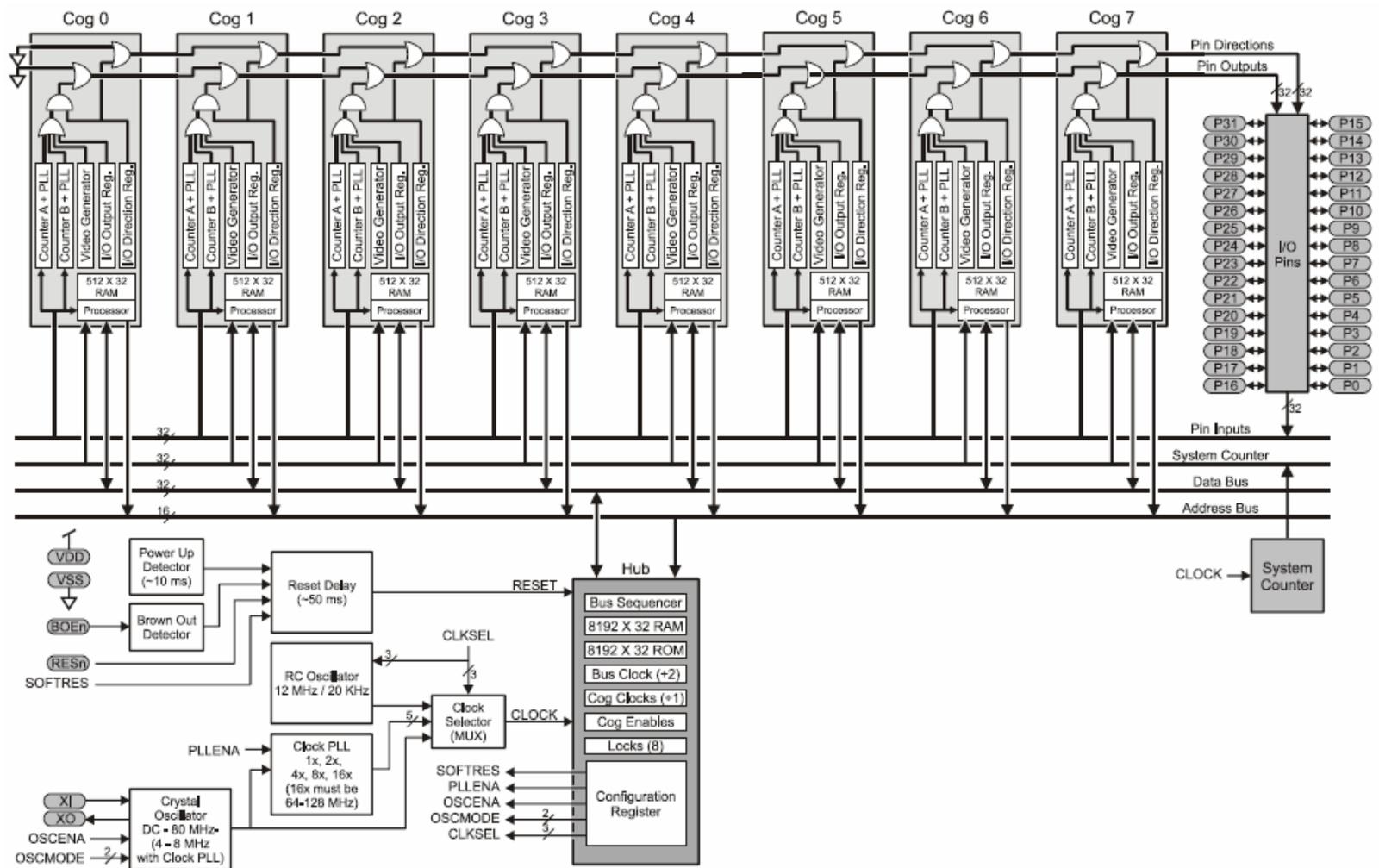


Figura 5.5 Diagrama de bloques del Propeller [14].

Recursos compartidos

Hay dos tipos de recursos compartidos: comunes o mutuamente-exclusivos. Los recursos comunes son aquellos que pueden ser accedidos en cualquier momento por cualquier cantidad de *cogs*, estos son los pines de entrada/salida y el contador del sistema. Los mutuamente-exclusivos pueden ser accedidos por cualquier número de *cogs* pero sólo uno a la vez, el resto de los recursos compartidos son de acceso exclusivo.

Reloj del Sistema

Es el reloj central para casi todos los componentes del *Propeller* excepto el *hub* y el bus que trabajan con la mitad de la frecuencia.

Cogs (procesadores)

El *Propeller* cuenta con 8 procesadores llamados *cogs*. Cada uno cuenta con los mismos componentes:

- Un bloque de procesador.
- Una memoria RAM local de 2 KB.
- Dos “asistentes de I/O” con PLL.
- Un generador de video.
- Registro de salida I/O.
- Registro de dirección I/O.
- Otros registros para diferentes propósitos.

Todos los *cogs* usan el reloj del sistema por lo que mantienen la misma referencia de tiempo y ejecutan las instrucciones simultáneamente.

Los *cogs* pueden iniciarse o detenerse durante el tiempo de ejecución y programarse para trabajar simultáneamente en forma independiente o coordinada con otros *cogs* por medio de la RAM.

La memoria RAM del *cog* se utiliza para el código de ejecución, datos, variables y algunas localidades para interfaz con el reloj del sistema, pines de entrada/salida y periféricos locales del *cog*.

Hub

En el diagrama de bloques de la figura 5.5 se puede observar el *hub* que controla el acceso a los recursos compartidos: como la RAM/ROM principal, la configuración de registros entre otros. El *hub* da acceso exclusivo a cada *cog* uno a la vez usando el sistema de turno rotatorio, sin importar cuantos *cogs* estén trabajando, manteniendo la temporización determinística. En la figura 5.6 se muestra el esquema de funcionamiento del *hub*.

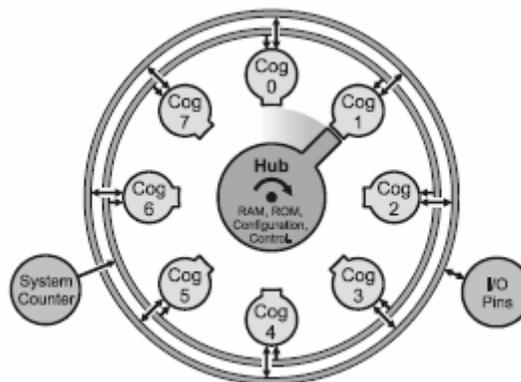


Figura 5.6 Esquema de funcionamiento del *hub* [14].

Pines de entrada/salida

Cuenta con 32 pines de entrada-salida de los cuales 2 se utilizan para conectar con una EEPROM externa y 2 para comunicación con una PC por USB, para la programación del chip. Todos los pines pueden ser utilizados por cualquier *cog* en cualquier instante, depende de la aplicación asegurarse de que no hayan dos *cogs* tratando de usar los mismos pines de entrada/salida para diferentes propósitos durante el tiempo de ejecución. Los *cogs* se encuentran conectados entre sí de tal forma que los pines de entrada/salida cumplen con las siguientes reglas:

- A. Un pin es de entrada sólo si ningún *cog* activo lo establece como de salida.
- B. Un pin tiene salida en bajo sólo si todos los *cogs* activos que lo establecieron como salida lo ponen en bajo.
- C. Un pin tiene salida en alto sólo si alguno de los *cogs* activos lo establecen como salida y también lo ponen en alto.

Contador del Sistema

El contador del sistema es un contador global de 32 bits que incrementa una vez cada ciclo del reloj del sistema. Sirve para hacer cálculos de temporización o pausas. Es un recurso común y puede ser leído en forma simultánea por cada *cog*. Este no se reinicia al arranque porque su uso práctico es para temporización diferencial.

Registro CLK

Se utiliza para configurar el reloj del sistema, determina la fuente y las características de este.

Locks

Son 8 bits disponibles para facilitar el acceso exclusivo a recursos definidos por el usuario entre múltiples *cogs*, tales como bloques de memoria.

Memoria Principal

Es un bloque de 64 Kbytes (32 KB de RAM y 32 KB de ROM) que es accesible para todos los *cogs* como un recurso mutuamente exclusivo a través del *hub*. La primera mitad de la memoria (RAM) se utiliza para la aplicación del usuario. La otra mitad (ROM) se utiliza para la definición de caracteres, funciones matemáticas, el programa de arranque y el *Spin Interpreter*.

5.2.2 Etapa de opto acople

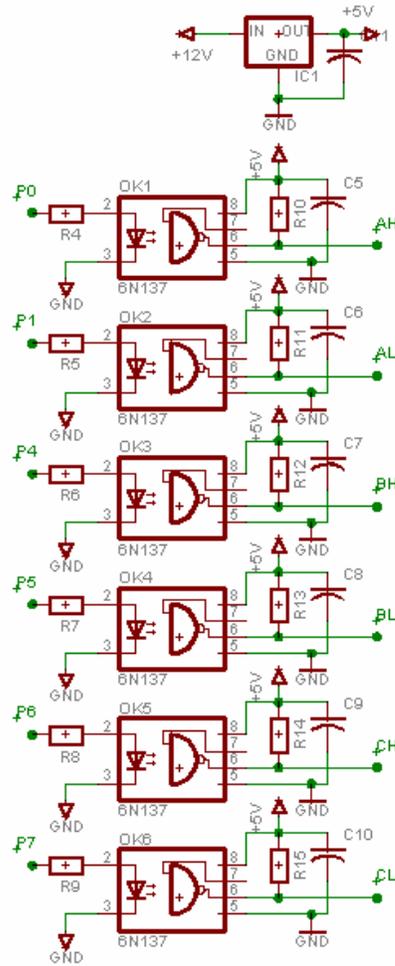


Figura 5.7 Esquemático de la etapa de opto acople.

La etapa de opto acople es necesaria para aislar la tierra digital de la tierra de potencia y evitar cualquier mal funcionamiento o descomposición del circuito debido a las corrientes de realimentación. En este caso se seleccionaron los opto acopladores 6N137 por su alta velocidad de conmutación necesaria para la señal de PWM de 20 KHz que se utiliza. La forma esperada de las señales de salida es la misma que las señales de control del *Propeller* pero invertidas.

En la figura 5.8 se muestra una fotografía del montaje de la etapa de optoacople.

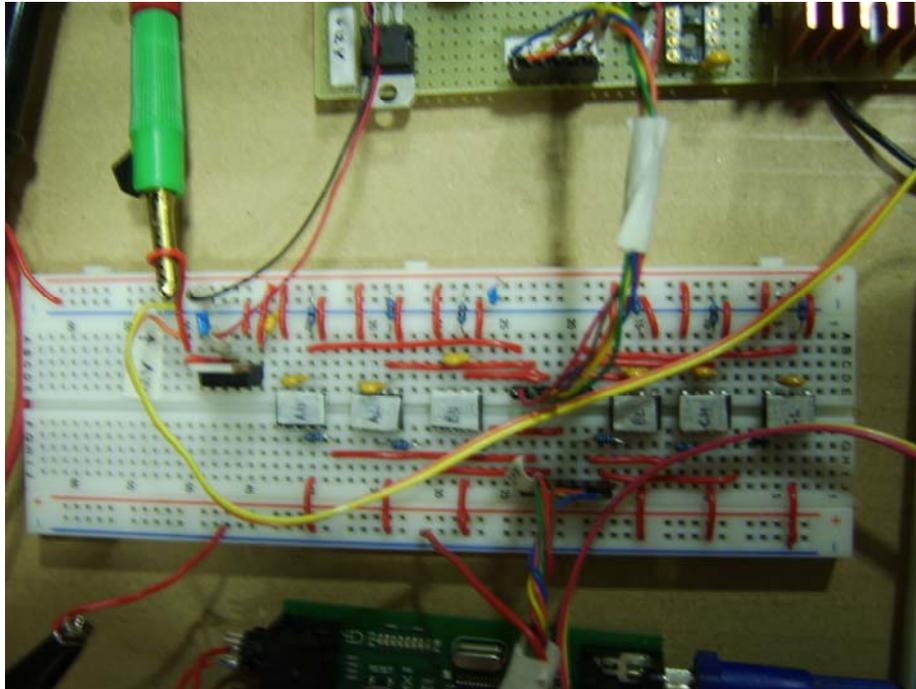
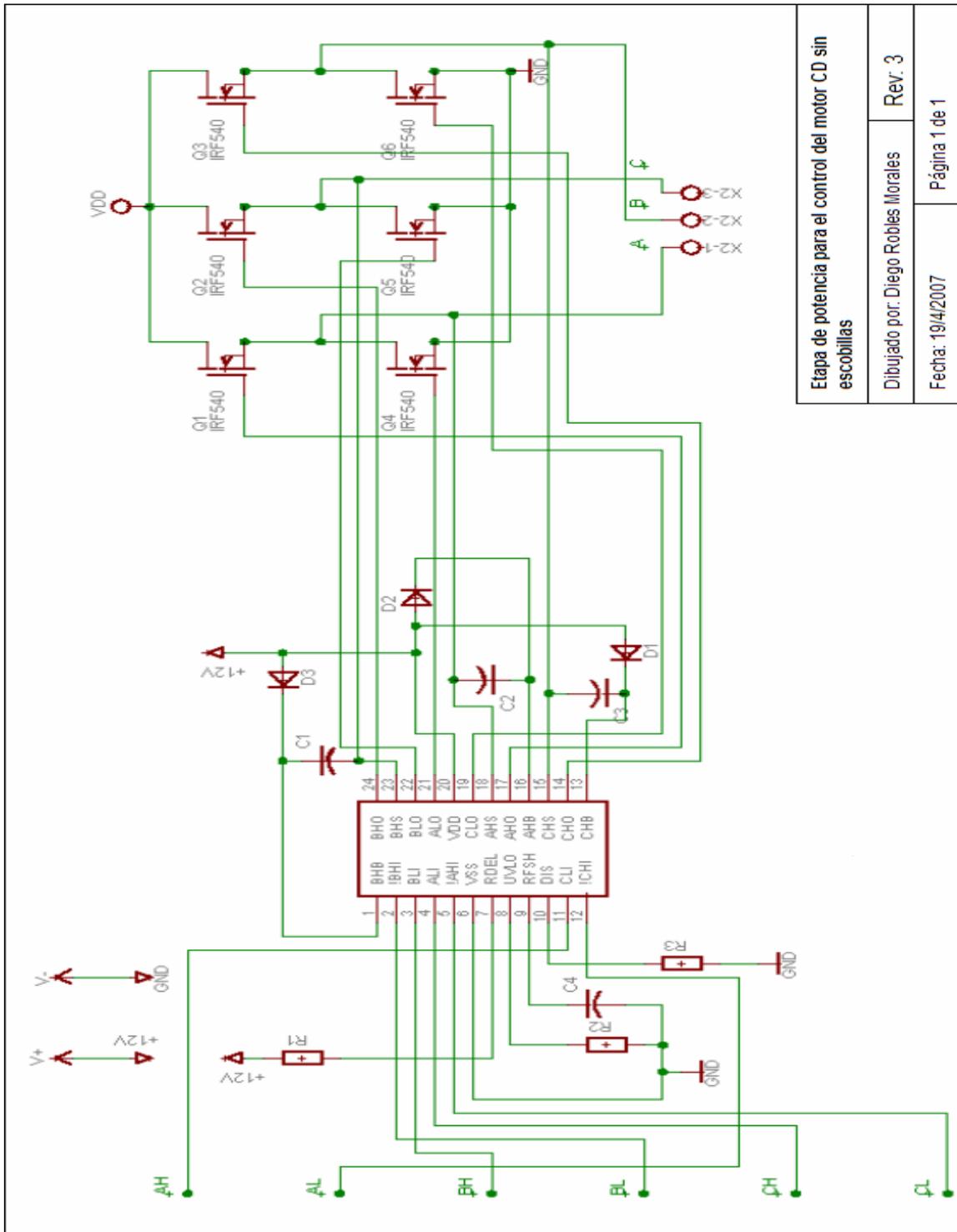


Figura 5.8 Montaje de la etapa de optoacople.

5.2.3 Etapa de potencia



Etapa de potencia para el control del motor CD sin escobillas

Dibujado por: Diego Robles Morales Rev. 3

Fecha: 19/4/2007 Página 1 de 1

Figura 5.9 Esquemático de la etapa de potencia.

Para activar las fases de la máquina CD sin escobillas se utiliza un puente de tres fases. Para lograr esta configuración se utilizan tres inversores monofásicos de medio puente conectados en paralelo. Tres transistores (parte alta) se utilizan para conectar en forma independiente cada una de las fases a la alimentación (24V) y tres (parte baja) para conectarlas a tierra.

Para manejar el puente de tres fases se requiere un *driver* de tal forma que no quede flotando la tierra de la parte alta. Por lo que se utilizó el chip HIP4086 cuya aplicación principal es el control de motores usando señales PWM, con un rango de frecuencias de CD a 100 KHz. El *driver* requiere que los transistores del puente sean MOSFET canal N.

En la figura 5.10 se muestra una fotografía del montaje de la etapa de potencia.

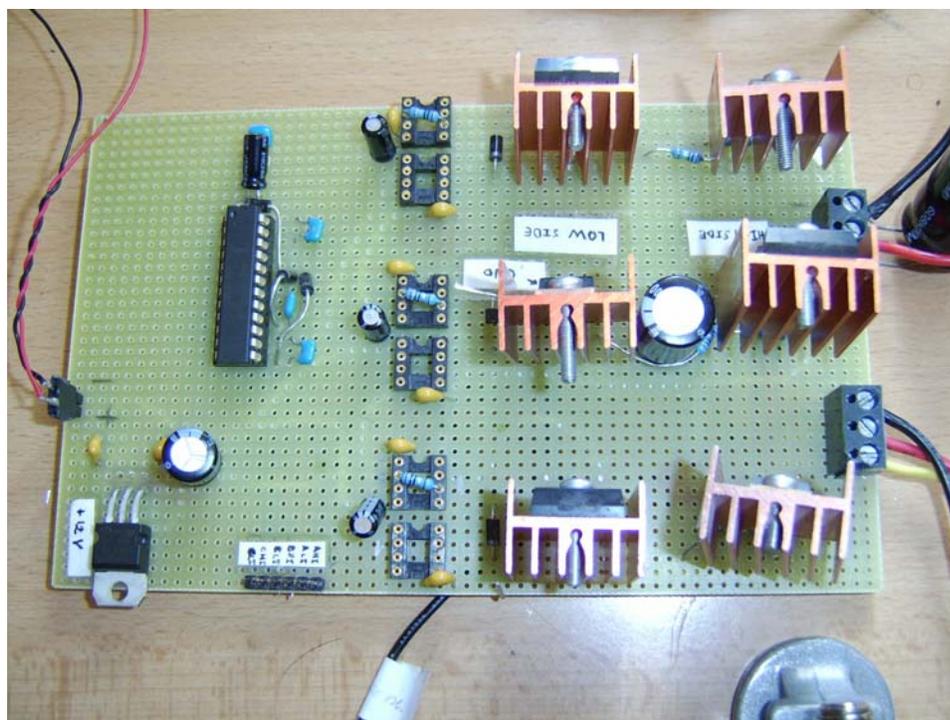


Figura 5.10 Montaje de la etapa de potencia.

5.2.4 Etapa del sensor

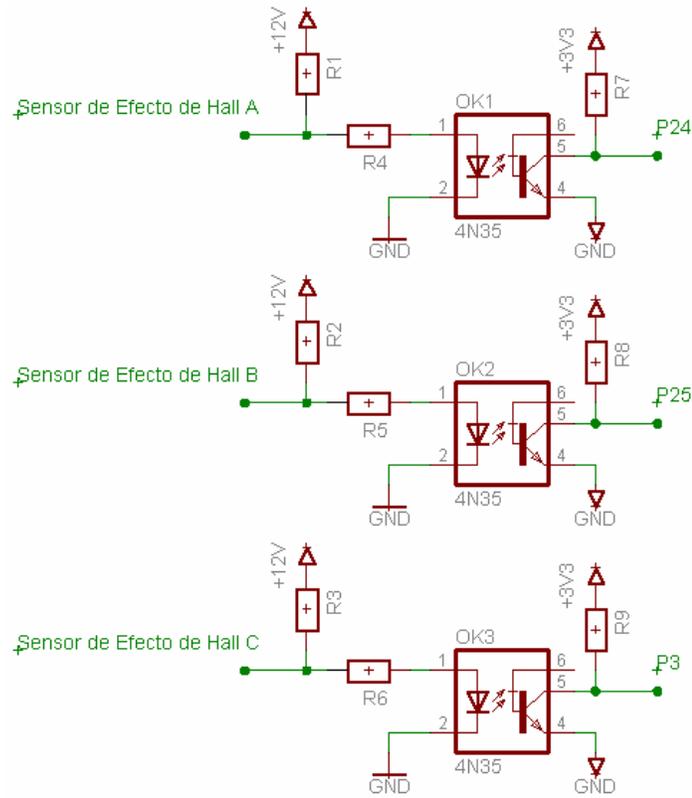


Figura 5.11 Esquema de conexión de los sensores de efecto de Hall.

Para lograr la conmutación electrónica se requiere conocer la posición del rotor con respecto a las fases, para esto se utilizan sensores de efecto de Hall colocados en el estator. Cuando los polos magnéticos del rotor pasan cerca de los sensores, estos indican con una señal en alto o en bajo si fue el polo norte o sur el que pasó cerca. Basándose en la combinación de las señales de estos sensores se puede determinar la secuencia exacta de conmutación.

Los sensores de efecto de Hall colocados en la máquina que se utilizó funcionan con un rango de tensión de 6V a 15V y requieren de una resistencia de “pull-up” ya que su salida es colector abierto. Además, se necesitó aislar la salida de estos sensores de la etapa de control digital ya que la tierra es la misma que la de potencia. En la figura 5.11 se muestra el circuito utilizado para conectar las salidas de los sensores de la máquina con los pines P24, P25 y P3 del *Propeller*, este permite aislar la tierra de las etapas y convertir la tensión de 12V a 3.3V.

En la figura 5.12 se muestra una fotografía del montaje de la etapa de optoacople de los sensores de efecto de Hall.

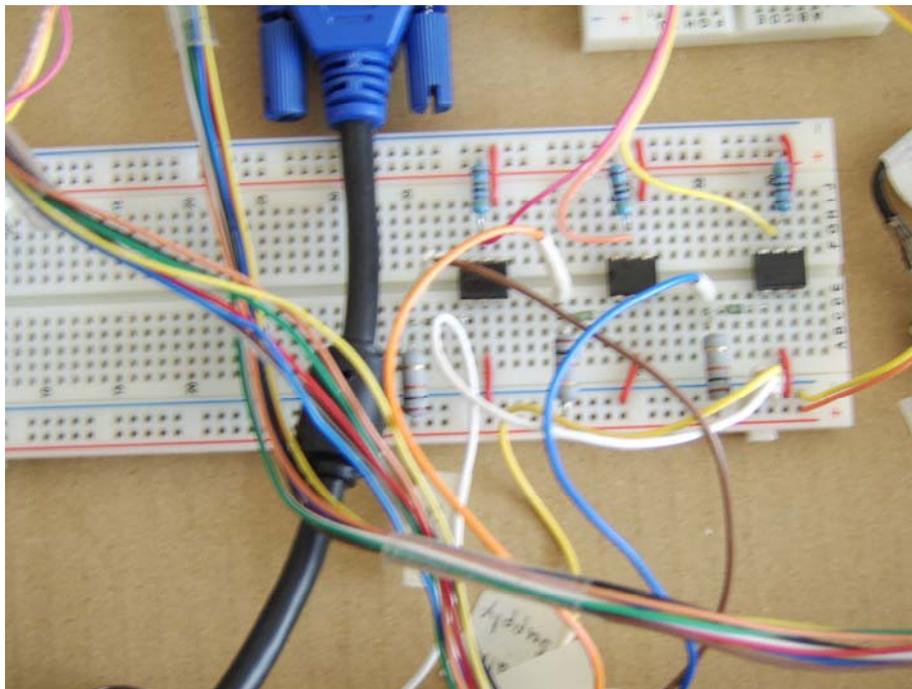


Figura 5.12 Montaje de la etapa de optoacople de los sensores de efecto de Hall.

5.3 Descripción del programa

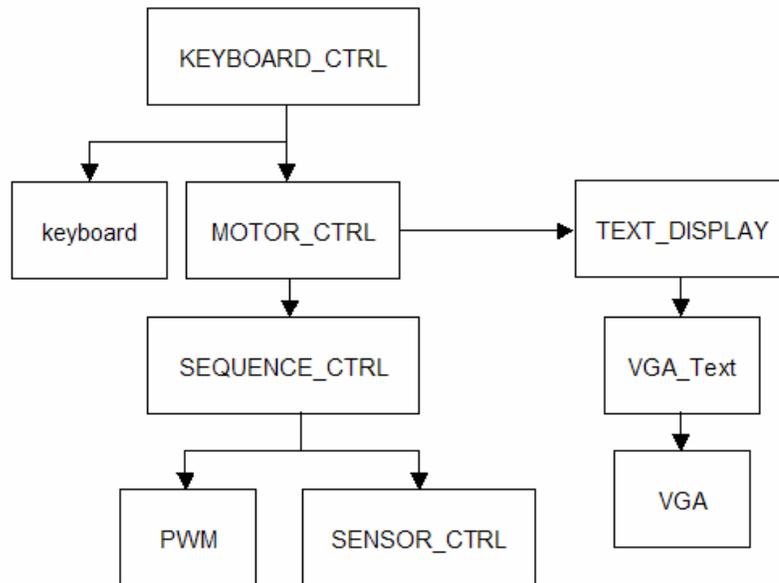


Figura 5.13 Diagrama de objetos del programa del microcontrolador.

En el diagrama de la figura 5.13 se muestra la relación entre los objetos del programa. El objeto “keyboard” espera a que una tecla sea presionada y regresa el código ASCII si esto ocurre. Luego el objeto “KEYBOARD_CTRL” realiza una acción de acuerdo a la tecla presionada, esto puede ser un cambio en la velocidad y dirección de la máquina. El objeto “MOTOR_CTRL” determina los parámetros para la operación de la máquina, estos afectan al objeto “SEQUENCE_CTRL” que ejecuta la rutina de activación de las bobinas basándose en la posición proporcionada por el objeto “SENSOR_CTRL”. El objeto “PWM” genera la señal PWM con una frecuencia de 20 KHz aproximadamente, la activación y el ciclo de trabajo de estas señales las determina el objeto “SEQUENCE_CTRL”. El objeto “SENSOR_CTRL” recibe las señales provenientes de los 3 sensores de efecto de Hall de la máquina y obtiene un código de 3 bits para determinar la posición del rotor. El objeto “TEXT_DISPLAY” despliega un mensaje en un monitor VGA cada vez que un cambio en alguno de los parámetros de la máquina ocurre.

En el diagrama de la figura 5.14 se muestra las rutinas asignadas a cada uno de los *cogs* y como estos se interconectan.

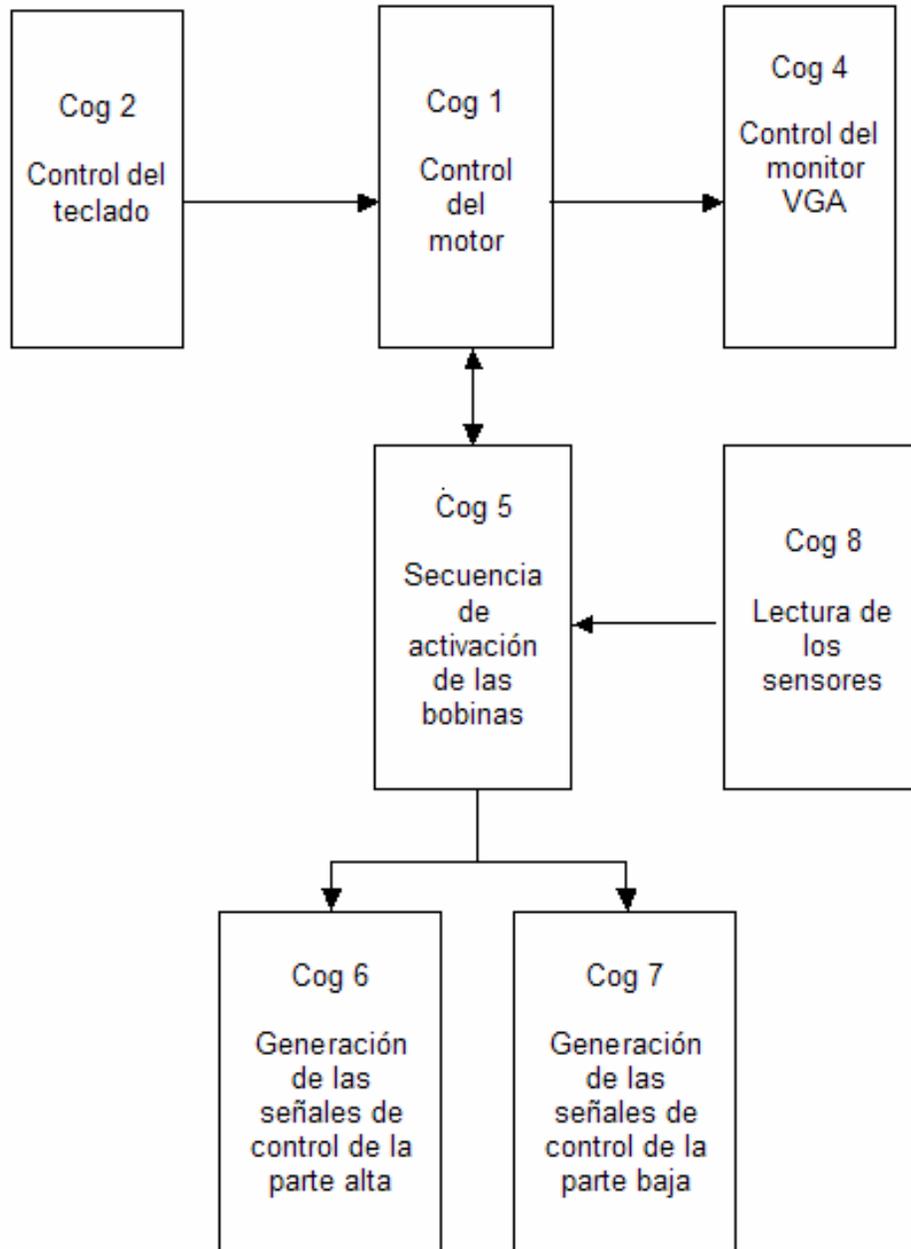


Figura 5.14 Rutinas asignadas a cada uno de los *cogs*.

5.3.1 Control del teclado

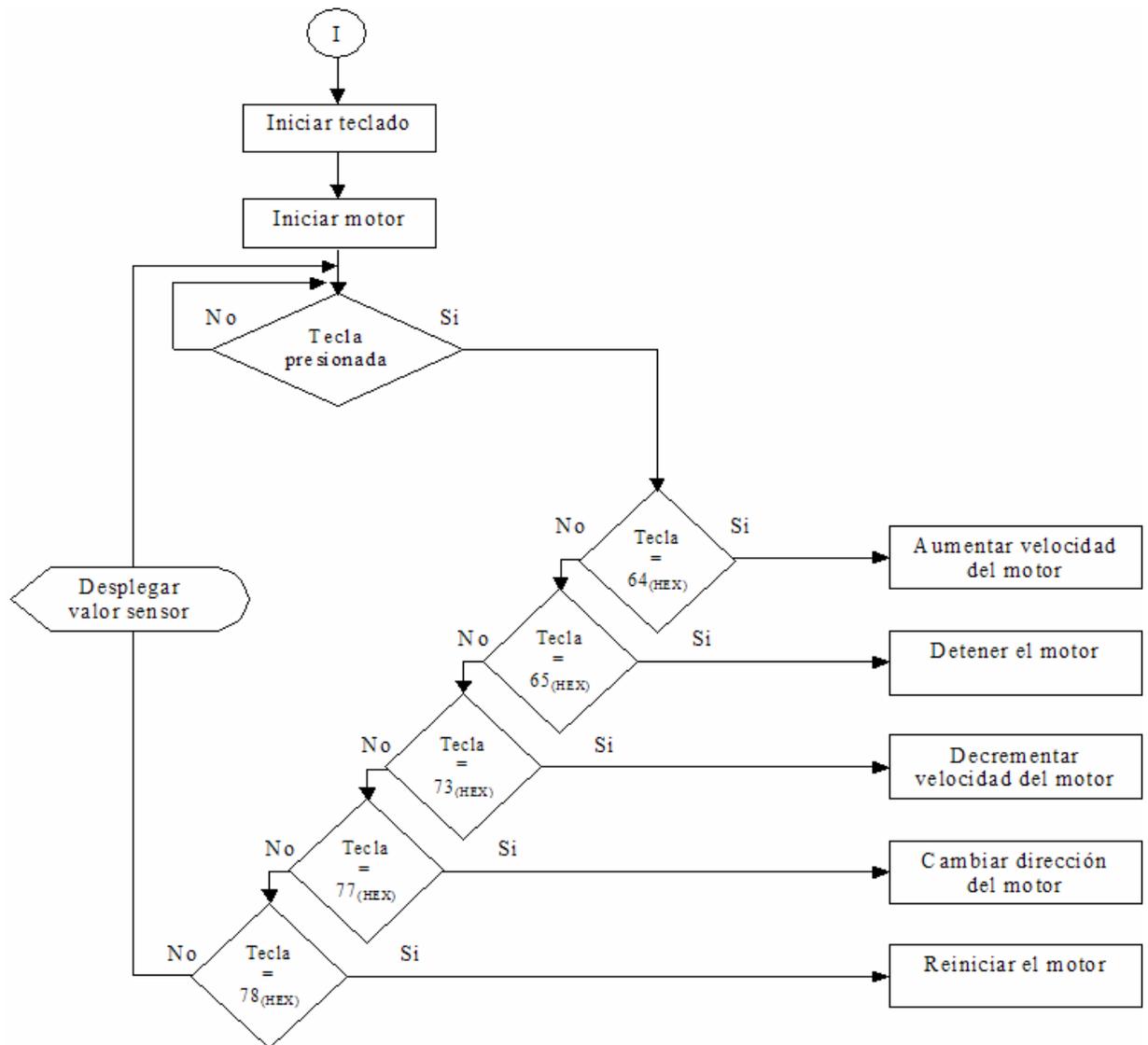


Figura 5.15 Diagrama de flujo del control del teclado

El diagrama de la figura 5.15 muestra el funcionamiento del programa principal el cual aumenta o disminuye la velocidad de la máquina, la detiene o cambia su dirección dependiendo del código enviado por un teclado PS/2. También, tiene la función de iniciar el *driver* del teclado en otro *cog*, establecer los parámetros iniciales de la máquina y desplegar el valor actual del sensor.

5.3.2 Control de la secuencia de activación de las fases

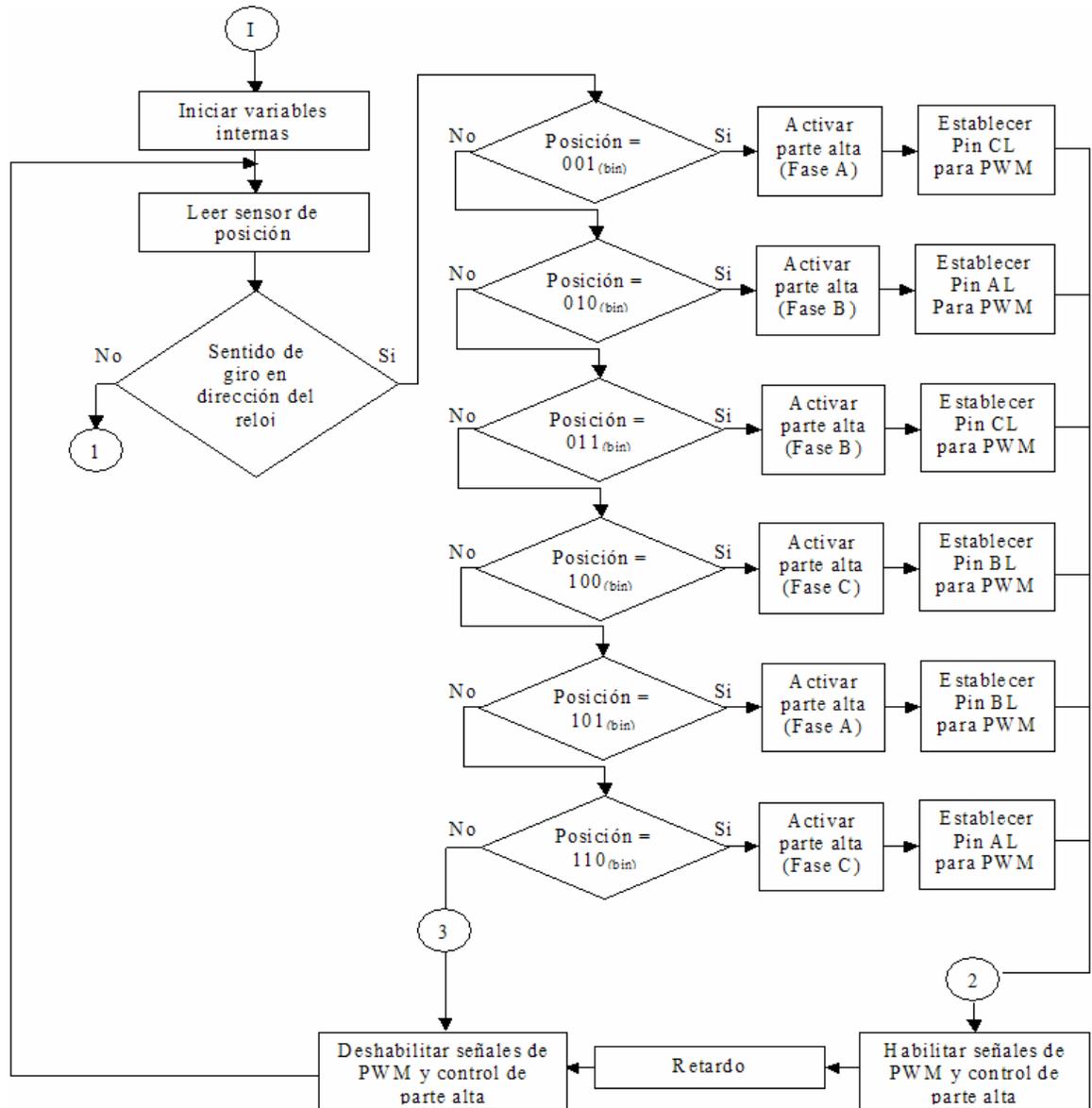


Figura 5.16 Diagrama de flujo del control de secuencia de activación de las fases.

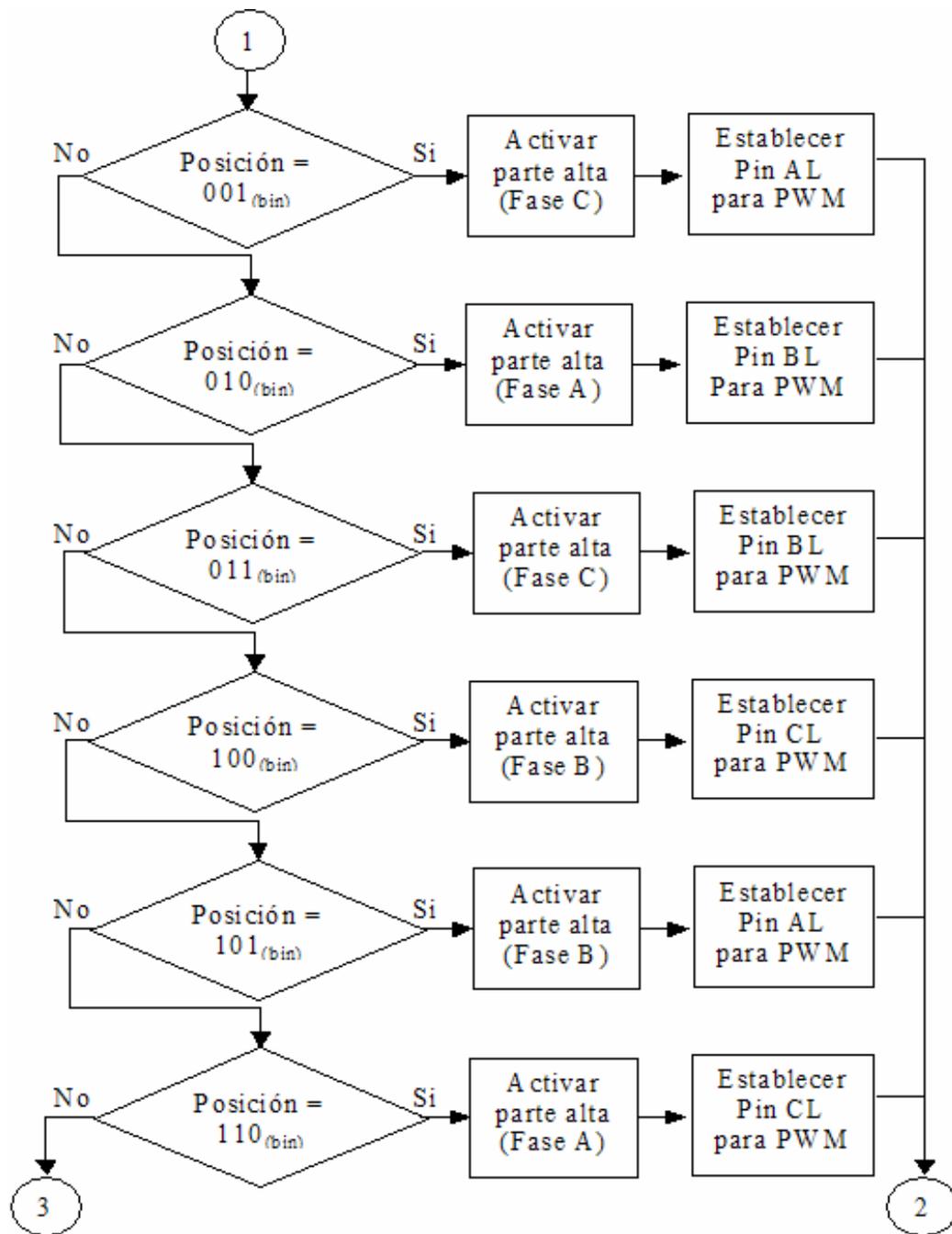


Figura 5.17 Continuación diagrama de flujo del control de secuencia de activación de las fases.

Las figuras 5.16 y 5.17 presentan el diagrama de flujo del control de la secuencia de activación de las bobinas. Después de iniciar las variables internas comienza el ciclo leyendo el valor del sensor de posición. Dependiendo de este valor y de la dirección de la máquina se activan las dos fases (parte alta y baja) de acuerdo a la secuencia que permite al rotor girar. Luego de que se activan las dos fases por un lapso de tiempo se vuelven a deshabilitar todas las fases, se lee de nuevo el valor de posición del sensor y el ciclo continúa. En la tabla 5.1 y 5.2 se indican las bobinas que se activan en cada instante según la posición medida y la dirección de giro.

Tabla 5.1 Secuencia de activación de fases en dirección a favor de las manecillas del reloj.

Fase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	CH	CL	BH	BL	AH	AL
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1

Tabla 5.2 Secuencia de activación de fases en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Fase	Sensor C	Sensor B	Sensor A	CH	CL	BH	BL	AH	AL
6	0	0	1	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	1	1	0
5	0	1	1	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0

5.3.3 Generación de señal PWM

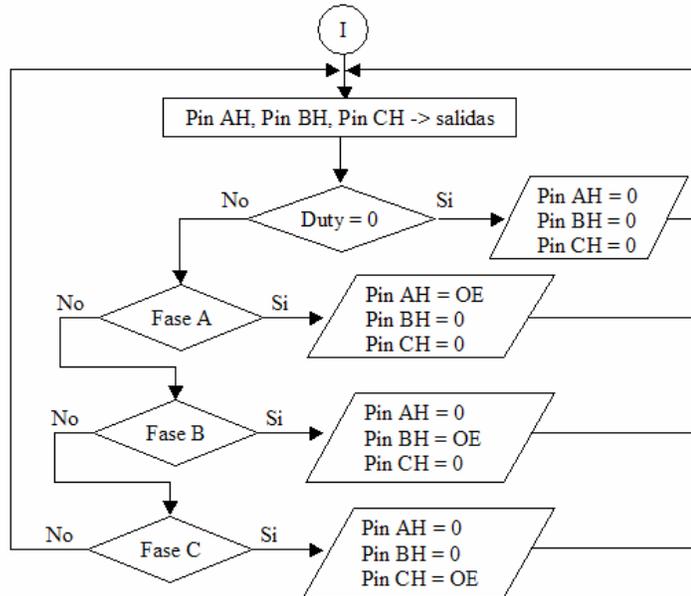


Figura 5.18 Diagrama de flujo para el control de la parte alta de la etapa de potencia.

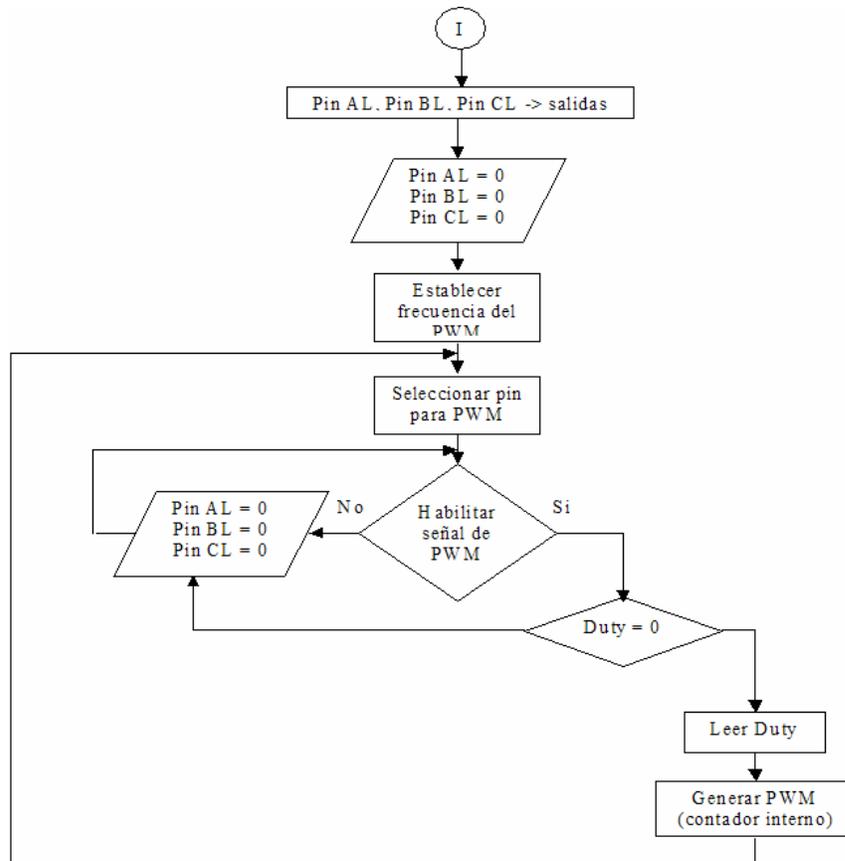


Figura 5.19 Diagrama de flujo para la generación de la señal de PWM.

Para generar el flujo de corriente que mueve el rotor, es necesario activar dos fases al mismo tiempo, una conectada a VCC y la otra a GND. Para esto se podría utilizar dos señales de PWM para activar cada una de las fases, pero esto no es necesario ya que con sólo dejar activa la parte alta y aplicando la señal de PWM a la parte baja se obtiene el mismo resultado. En el caso del diagrama de flujo de la figura 5.18 se muestra el ciclo de control de la parte alta del puente de tres fases, todas las fases se desactivan si el ciclo de trabajo es 0 o la señal de habilitación es 0. En caso contrario se activa la fase según la secuencia establecida. En la figura 5.19 se observa el ciclo para generar la señal PWM de aproximadamente 20 KHz aplicada a la parte baja del puente de tres fases. Esta señal se deshabilita si el ciclo de trabajo o la señal de habilitación son 0.

5.3.4 Control del sensor

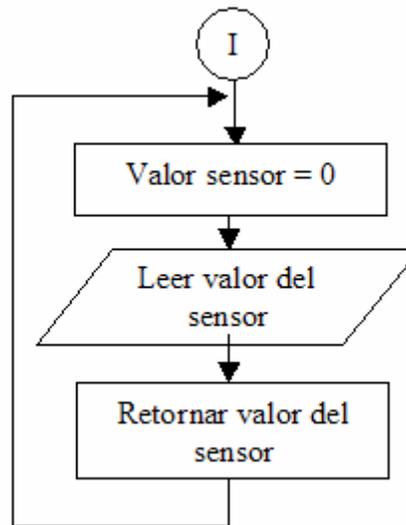
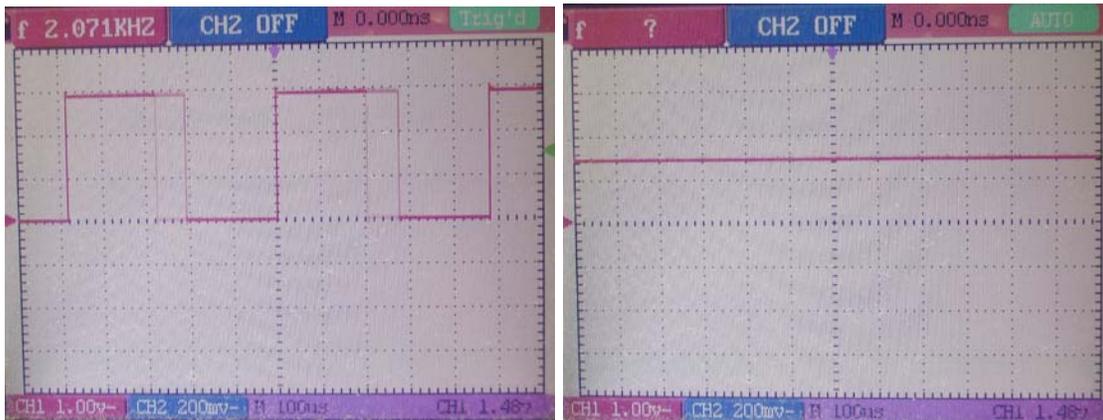


Figura 5.20 Diagrama de flujo para la lectura del sensor.

El ciclo de control del sensor toma los valores de los pines conectados a los sensores de efecto de Hall de la máquina y los concatena de tal forma que se forme un código de tres bits que indique la posición actual de la máquina.

Capítulo 6: Análisis de Resultados



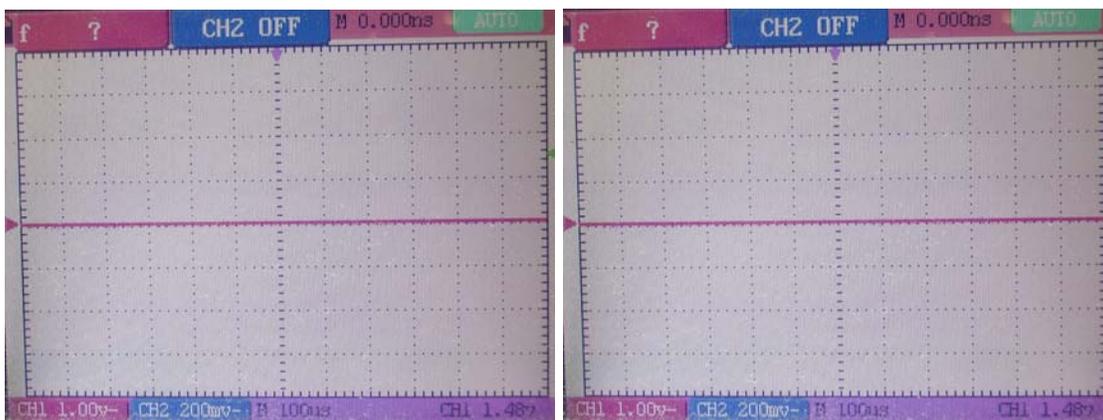
AH

AL



BH

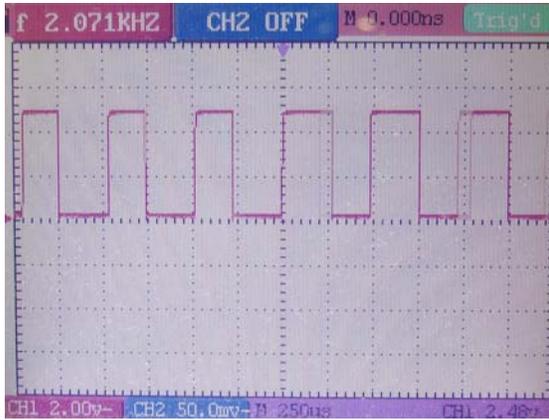
BL



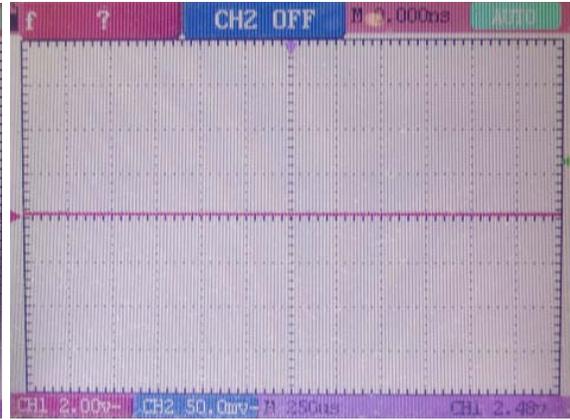
CH

CL

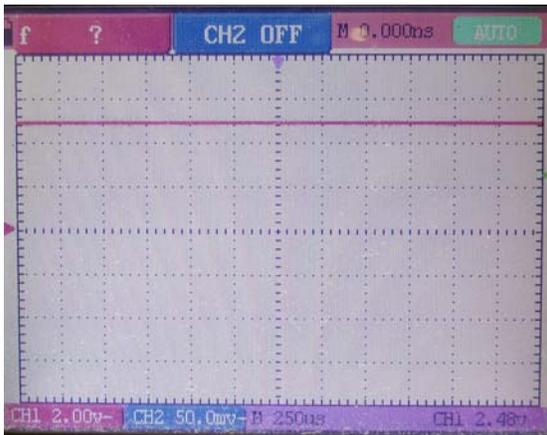
Figura 6.1 Señales de salida de control del *Propeller*.



AH



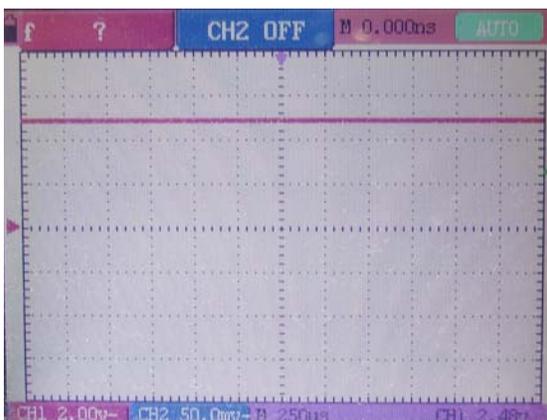
AL



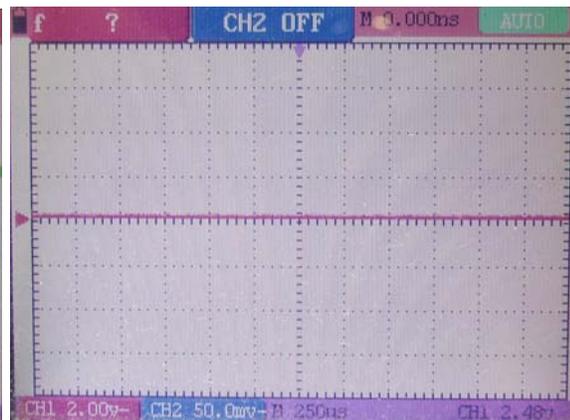
BH



BL



CH

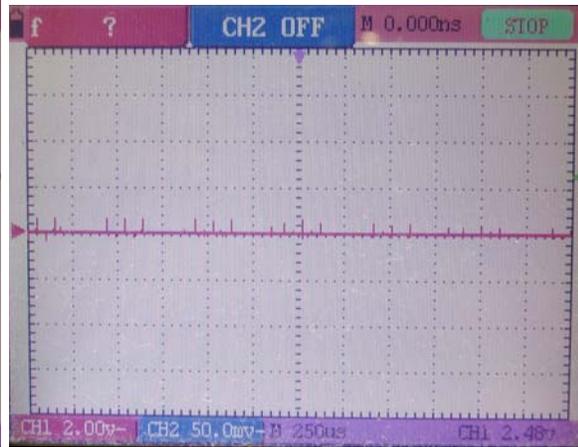


CL

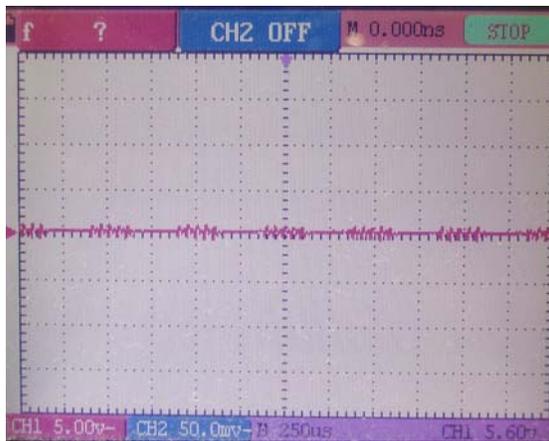
Figura 6.2 Señales de salida del opto acoplador.



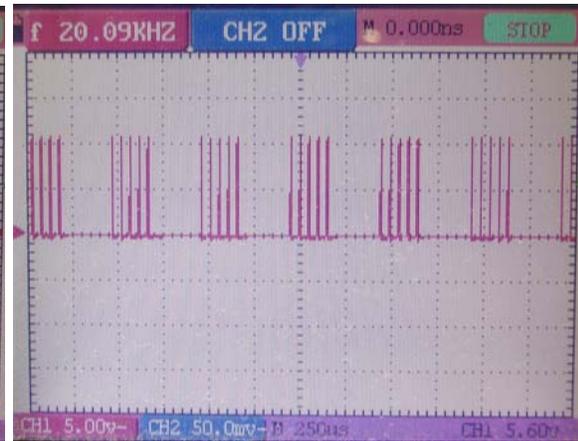
AH



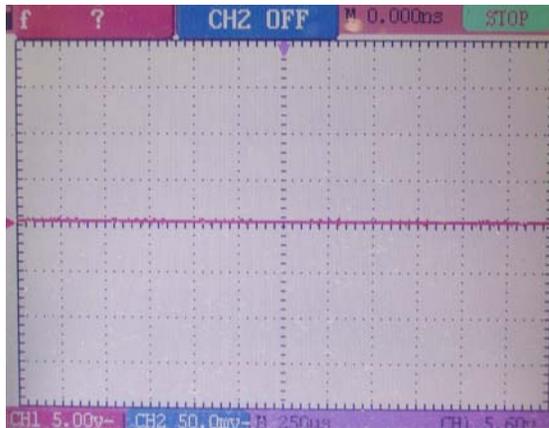
AL



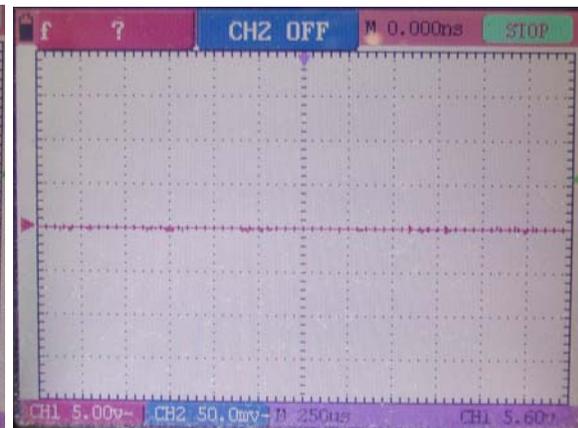
BH



BL



CH



CL

Figura 6.3 Señales de tensión en las compuertas de los MOSFET.

Los resultados mostrados en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se obtuvieron utilizando un osciloscopio digital, y corresponden a una de las combinaciones de la secuencia de activación de las bobinas, para un ciclo de trabajo de aproximadamente el 25%. Para cada una de las seis posiciones del rotor, en ambas direcciones, se realizó la misma medición de tal forma que se pudiera corroborar que las fases activas fueran las correctas.



Figura 6.4 Velocidades medidas para la máquina CD sin escobillas.

En la figura 6.4 se muestran algunas velocidades medidas con un tacómetro óptico, estas se obtuvieron variando el ciclo de trabajo de 0 al 100%.

En la figura 6.1 se muestra las señales de salida del *Propeller* para la activación de dos de las fases siguiendo la secuencia que se presenta en la tabla 5.1 y 5.2. Para controlar la parte baja se aplica una señal de PWM de 20 KHz, en este caso el ciclo de trabajo es de aproximadamente el 25%. Por otro lado, para la parte alta se aplica una señal continua. Las señales de control de la parte baja se encuentran invertidas ya que la etapa de opto acople invierte las señales de entrada. Para las señales de la parte alta se tenía que considerar que el HIP4086 requiere que se encuentren invertidas a la entrada por lo que las salidas del *Propeller* no se invierten. En este caso las señales activan la fase A para la parte alta y la fase B para la parte baja, ver figura 3.4 (a) para observar el flujo de corriente en este caso.

En la figura 6.2 se muestra las salidas de la etapa de opto acople. La señal de PWM para controlar la parte baja es intermitente porque la secuencia deshabilita la señal después de un lapso antes de activar el siguiente par de bobinas y así evitar cortos (figura 5.16), esto ocurre igualmente con las señales de la parte alta.

En la figura 6.3 se muestra las señales de control aplicadas a las compuertas de los MOSFET de la etapa de potencia (figura 5.2), como se observa en este caso se activan las fases A y B (parte alta y baja respectivamente). En la figura 6.5 se muestra un bosquejo de la secuencia de activación de los MOSFET.

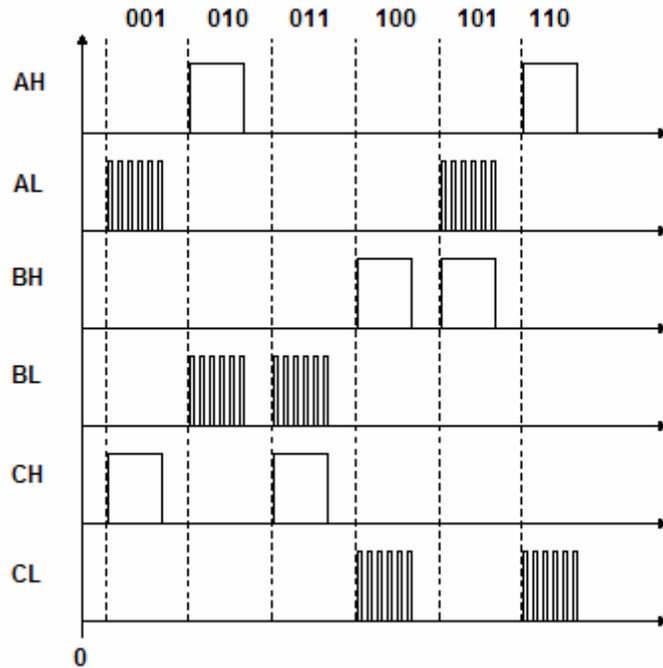


Figura 6.5 Bosquejo de las Señales de control para las compuertas de los MOSFET.

La figura 6.4 muestra algunos valores de velocidades medidas. Para realizar estas mediciones se utilizó el tacómetro óptico A2103. La velocidad más baja medida fue de 646 RPM y la más alta fue de 10559 RPM. Este rango aproximado fue obtenido en ambas direcciones variando el ciclo de trabajo de 0 a 100%. Para lograr velocidades más bajas no es suficiente sólo variando el ciclo de trabajo.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La velocidad de la máquina varía en un rango aproximado de 650 a 10000 rpm en ambos sentidos.
- Para lograr velocidades altas variar el ciclo de trabajo es suficiente.
- La frecuencia de la señal de PWM puede variar entre 9 y 50 KHz.
- La arquitectura del *Propeller* permitió simplificar el diseño del circuito de control con respecto a la versión previa y simplificó la integración de la máquina de CD sin escobillas, los sensores, el monitor VGA y el teclado.

Recomendaciones

- Para lograr abarcar el rango de velocidades bajas que no se logró con la variación del ciclo de trabajo, esto es de 0 a 650 revoluciones por minuto, es necesario modificar el software del microcontrolador para variar también la frecuencia de activación de las bobinas y cubrir este rango.
- En posteriores versiones del circuito de control de la máquina debe considerarse los efectos de la carga.

Bibliografía

- [1] Austriamicrosystems. Application note: AN5000-20, “AS5040/AS5043/AS5045 360° MAGNETIC ROTARY ENCODER”.
<www.austriamicrosystems.com/03products/products_detail/AS50xx_Software_download/AN5000_20.pdf> [Consulta: 27 feb. 2007].
- [2] Microchip. Application note: AN885, “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”.
<www.industrialcontrols.eetchina.com/PDF/2007JUL/ICCOL_2007JUL11_IODR_TA_02.pdf?SOURCES=DOWNLOAD> [Consulta: 27 feb. 2007].
- [3] Silicon Labs. Application note: AN208, “SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR REFERENCE DESIGN”.
<www.silabs.com/tgwWebApp/public/web_content/products/Microcontrollers/en/SLBLDC_MTR_RD.htm> [Consulta: 28 feb. 2007].
- [4] Microchip. Application note: AN857, “Brushless DC Motor Control Made Easy”.
<ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857a.pdf> [Consulta: 27 mar. 2007].
- [5] Intersil. Application note: AN9642.3. “HIP4086 3-Phase Bridge Driver Configurations and Applications”. <www.intersil.com/data/an/an9642.pdf> [Consulta: 27 feb. 2007].
- [6] Microchip. Application note: AN957. “Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010”.
<ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/BLDC%20MC%2000957a.pdf> [Consulta: 1 mar. 2007].

- [7] Microchip. Application note: AN901. "Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control".
<www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en019525> [Consulta: 1 mar. 2007].
- [8] Silicon Labs. "SENSORLESS BLDC MOTOR REFERENCE DESIGN KIT USER'S GUIDE".
<www.silabs.com/.../tpub_doc/uguide/Microcontrollers/Small_Form_Factor/en/Sensorless_BLDC_Motor-RD.pdf> [Consulta: 28 feb. 2007].
- [9] Atmel. Application note: AVR443. "Sensor-based control of three phase Brushless DC motor".
<www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2596.pdf> [Consulta: 3 abr. 2007].
- [10] Atmel. Application note: AVR440. "Sensorless Control of Two-Phase Brushless DC Motor".
<www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8007.pdf> [Consulta: 28 feb. 2007].
- [11] Pontificia Universidad Javeriana. "Control de un motor brushless DC con frenado regenerativo". Carlos Escobar, José Alejandro, Germán Téllez. Bogotá: 2006. <www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis89.pdf> [Consulta: 2 mar. 2007].
- [12] Fairchild Semiconductor. Application Brief: 42020. "The Smart Start™ Technique for BLDC Motors". <www.fairchildsemi.com/an/AB/ABR-42020.pdf> [Consulta: 2 mar. 2007].

- [13] Agile Systems. "Advances in Sensorless Control of BLDC Motors".
<www.agile-systems.com/pdfs/WP_Published/Agile_WPP_Advances_in_Sensorless_Control_of_BLDC_Motors_04-05.pdf> [Consulta: 27 feb. 2007].
- [14] Parallax. "Propeller Manual".
<www.parallax.com/dl/docs/prod/prop/WebPM-v1.01.pdf> [Consulta: 28 feb. 2007].

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Driver: circuito manejador del encendido y apagado de un MOSFET, que actúa sobre la compuerta del mismo.

Efecto Hall: efecto que induce una tensión eléctrica sobre dos placas, las cuales atraviesan un campo magnético.

EEPROM: ROM programable y borrable eléctricamente.

Estator: parte estacionaria del motor.

F.E.M de retorno (B.F.E.M): fuerza electromotriz inducida en los embobinados del motor, debido al paso cercano del rotor (imán permanente) a las fases.

MOSFET: transistor de efecto de campo.

Motor asincrónico: tipo de motor en el que el flujo, generado por el estator y el rotor, tienen diferentes frecuencias.

Motor sincrónico: tipo de motor en el que el flujo, generado por el estator y el rotor, tienen las mismas frecuencias. Puede haber corrimiento de fase.

PLL: lazo de seguimiento de fase.

Puente de tres fases: circuito de conmutación que se utiliza para manejar motores CD de tres fases.

PWM (Pulse Width Modulation): modulación de ancho de pulso.

RAM: memoria de acceso aleatorio.

ROM: memoria de solo lectura.

Rotor: parte rotatoria del motor.

Torque: fuerza rotatoria en Newtons-Metro.

Velocidad angular: velocidad en radianes ($2\pi \times$ frecuencia).

Velocidad de deslizamiento: se define por la correspondiente diferencia de frecuencia entre los campos magnéticos del estator y el rotor (sólo para motores de inducción)

Velocidad nominal: velocidad especificada en la placa del motor.

Velocidad sincrónica: velocidad del motor correspondiente a la frecuencia nominal.

A.2 Hoja de información

Información del estudiante:

Nombre: Diego Robles Morales
Cédula o No. Pasaporte: 1-1189-0109
Carné ITCR: 200210032
Dirección de su residencia en época lectiva: Praga, República Checa
Dirección de su residencia en época no lectiva: Pinares, Curridabat, San José, Costa Rica
Teléfono en época lectiva: (+420)776218247
Teléfono época no lectiva: (+506)2713935
Email:
diego.robles.m@gmail.com

Información del Proyecto:

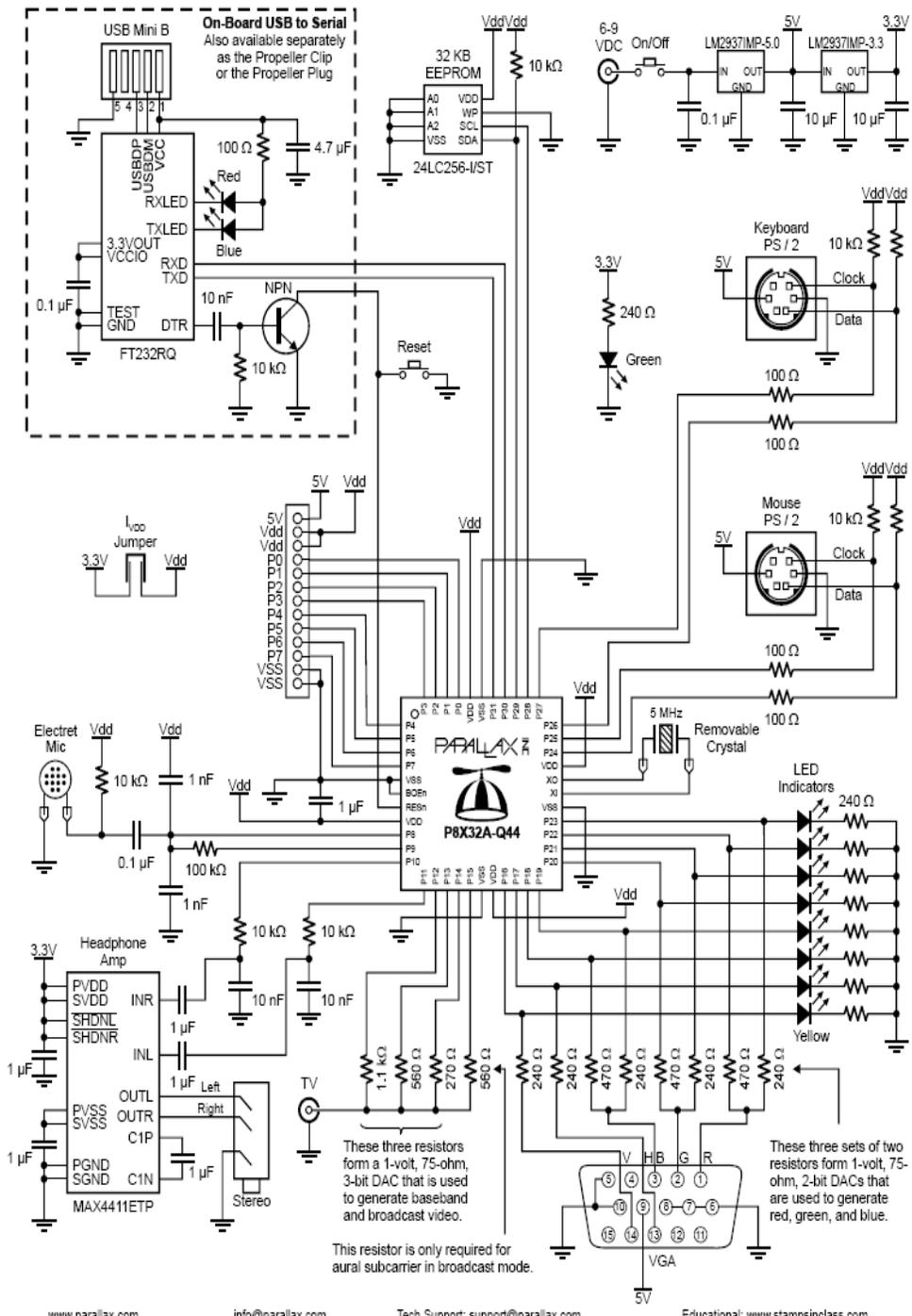
Nombre del Proyecto: Control electrónico para la velocidad y sentido de giro de una máquina de corriente directa sin escobillas
Profesor Asesor: Eduardo Interiano
Horario de trabajo del estudiante: Lunes a Viernes de 8 am a 5 pm

Información de la Empresa:

Nombre: Universidad Técnica de República Checa en Praga
Zona: Bohemia, Bohemia Central, Praga
Dirección: Technická 2, 166 27 Praha 6
Departamento: Departamento de Telecomunicaciones
Teléfono: (+420)224351111 ó (+420)234351111
Actividad Principal: Enseñanza universitaria

Anexos

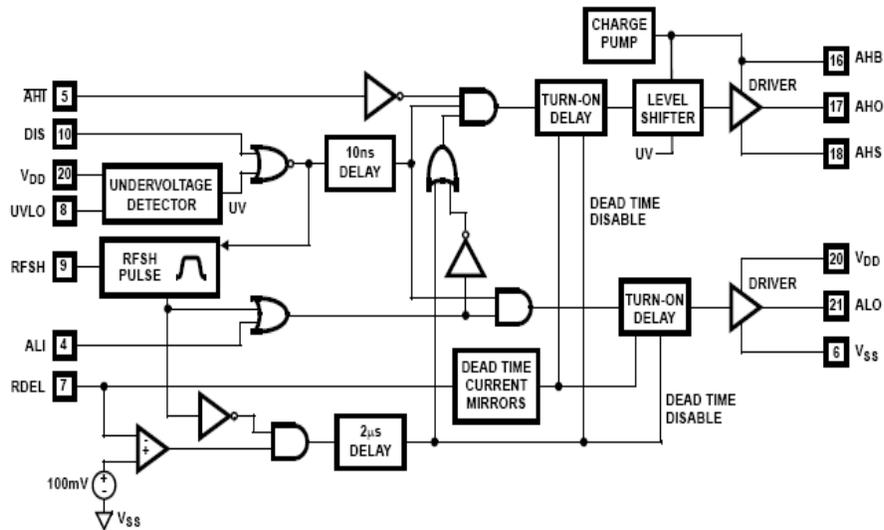
Anexo B.1 Esquemático del Propeller Demo Board



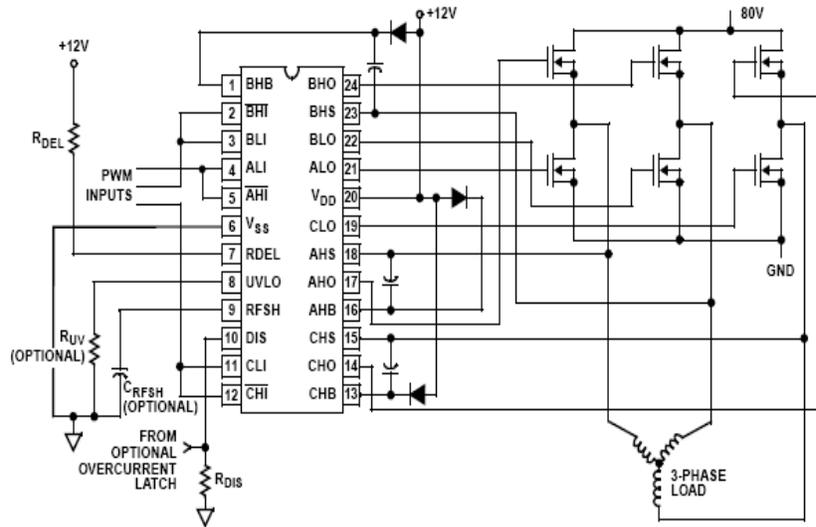
Anexo B.2 Diagrama de bloques funcional del HIP4086

Application Note 9642

Functional Block Diagram (1/3 of HIP4086)



Typical Application (PWM Mode Switching)



Anexo B.3 Carta de entendimiento

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Diego Robles Morales carné 200210032, autorizo a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título “Control electrónico para la velocidad y sentido de giro de una máquina de corriente directa sin escobillas” para ser ubicado en la Biblioteca Digital y ser accedido a través de la red Internet.

Diego Robles Morales

Firma de estudiante

Cédula 1-1189-0109