

DISEÑO DE UN ACCIONAMIENTO ELECTRONICO DE VELOCIDAD ROTACIONAL PARA UN SERVOMOTOR EC DE BAJA POTENCIA

DESIGN OF A ROTATIONAL SPEED ELECTRONIC DRIVE FOR A LOW POWER EC SERVOMOTOR

Juan Manuel Barrera Fernández

CIDESI Querétaro, México
jbarrera@posgrado.cidesi.edu.mx

Julio César Solano Vargas

CIDESI Querétaro, México
jsolano@cidosi.edu.mx

Jorge Luis Pérez Ramos

CIDESI Querétaro, México
jlper@posgrado.cidesi.edu.mx

Recepción: 14/septiembre/2019

Aceptación: 7/noviembre/2019

Resumen

El objetivo de este artículo es documentar el diseño de un dispositivo electrónico que sea capaz de controlar la velocidad rotacional de un servo motor sin escobillas EC (electrónicamente conmutado) de baja potencia. Para el desarrollo de la propuesta electrónica de control se siguió una metodología dividida en 4 etapas, en las cuales se presenta el análisis de los parámetros máximos de voltaje, corriente y velocidad del servomotor, la selección y análisis de hardware, determinación del diseño electrónico que deberá ser capaz de cumplir con los requisitos de control de velocidad. La construcción del dispositivo tiene como objetivo evaluar las propiedades de control como conmutación de un módulo de control trifásico para un servomotor EC, obteniendo un diseño eficiente, compacto y robusto; llevando a cabo un esquema de diseño basado en el aislamiento electrónico de señales de control y de potencia.

Palabras clave: Controlador, Electrónica, Servomotor, Velocidad rotacional.

Abstract

The purpose of this article is to document the design of an electronic device that is capable of controlling the rotational speed of a low-power EC (electronically switched) brushless servo motor. For the development of the electronic control proposal, a methodology divided into 4 stages will be followed, in which the analysis of the maximum parameters of voltage, current and speed of the servomotor, the selection and analysis of hardware, configuration of the electronic design that Must be able to meet the speed control requirements. The construction of the device aims to evaluate the control properties such as switching of a three-phase control module for an EC servomotor, obtaining an efficient, compact and robust design; It requires a design scheme line based on the electronic isolation of control and power signals.

Keywords: *Controller, Electronic, Servomotor, Rotational Speed*

1. Introducción

En el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI, ubicado en el estado de Querétaro, se han apoyado diversos proyectos para el desarrollo de robots relacionados con el área de hidrocarburos y energías renovables, en concreto, se desarrollan diversos robots que apoyan a los trabajadores de estas áreas para desempeñar su trabajo de forma eficiente y segura; varios de estos robots son catalogados como robots de tracción propia, esto quiere decir que estos robots son capaces de trasladarse de un lugar a otro por sí mismos, por ejemplo, estos robots puedan ser construidos por elementos rotacionales como ruedas u orugas, o bien por patas de varios múltiples grados de libertad, que viene siendo el caso para robots móviles caminantes, el cual es el caso de robots móviles caminantes.

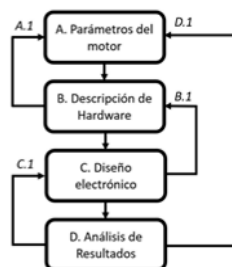
Es evidente, que estos robots son accionados por motores que les brindan la posibilidad de movimiento. Uno de los principales tipos de motores usados para los robots móviles de tracción propia es el servo motor brushless EC, el control de movimiento giratorio de estos motores se realiza a través de la conmutación electrónica de las bobinas y la retroalimentación de posición de su rotor proporcionada por los sensores hall que integra. Este motor se caracteriza por tener un mantenimiento mínimo, alta durabilidad y baja inercia, esto debido a la

construcción de su rotor con imanes permanentes y a que entre éste y el estator no existe contacto alguno; lo cual permite un libre movimiento entre sus componentes; además cuentan con un rango de velocidad alto, alta eficiencia y bajo ruido eléctrico. Entre sus desventajas se tiene un coste de construcción alto, un mantenimiento especializado, además de que es necesaria una electrónica compleja para realizar el control de torque y velocidad de este tipo de motor. Por lo que cabe resaltar la importancia del desarrollo de hardware especializado dedicado a estos motores. [Chang-liang, 2012]

Con el fin de obtener un servo controlador robusto y compacto, el diseño del hardware está basado en un módulo de puente H trifásico con retroalimentación de señales de corriente y temperatura, esto permitirá evaluar en el área de robótica en CIDESI el chip antes definido para el control de servomotores en robots con tracción propia destinados para ser operados en áreas de alto riesgo para el trabajador especialista. Además, el diseño electrónico propuesto nos da la oportunidad de evaluar un controlador que sea capaz de obtener su retroalimentación de posición y velocidad mediante sus sensores hall, evitando así el uso de instrumentación adicional como pueden ser codificadores rotacionales adicionales al dispositivo. [Infineon, 2016]

2. Métodos

La metodología utilizada para llevar a cabo el diseño del hardware de control se basa en el diagrama de flujo presentado en la figura 1, que está constituido por 4 etapas en donde se contemplan el desarrollo completo del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Metodología utilizada para la elaboración del hardware de control.

Parámetros del motor

El motor utilizado para este desarrollo fue un servo motor sin escobillas o brushless, esto quiere decir que implementa la tecnología de imanes permanentes en su rotor para realizar su movimiento de rotación a partir de la combinación de conmutación secuencial de sus bobinas, además de tener tres sensores hall que se utilizaron para obtener la retroalimentación de posición, y en este caso también la retroalimentación de velocidad. El servomotor EC usado frecuentemente para los desarrollos tecnológicos en el laboratorio de robótica en CIDESI es el servomotor brushless EC máx. de 40 W el cual tiene como características principales:

- Conexión tipo Y (trifásico)
- Voltaje nominal 24 V
- Corriente nominal 1.5 A
- Corriente sin carga 123 mA
- Corriente con carga 6.57 A durante 777 s
- Torque inicial 33.8 mN·m
- Velocidad máxima 9250 rpm
- Rango de temperatura -44 a 100 °C
- Temperatura máxima de operación de 150 °C

Los parámetros de temperatura de trabajo del motor se requieren ya que es una constante para la selección de los componentes electrónicos.

Para efectos más prácticos se llevó a cabo la obtención de la función de transferencia del servomotor brushless EC max 30 de 40 W de la marca Maxon motor con una configuración Y. Entonces, la función de transferencia que define el par de carga entre la velocidad rotacional, se indica con la ecuación 1.

$$G_L(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = \frac{r_a + L_a s}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_e K_T)} \quad (1)$$

Donde:

- G_L Función de transferencia
- Ω Velocidad de rotación angular (salida)
- T_L Par de carga (entrada)

r_a	Resistencia de devanado
L_a	Inductancia del devanado
J	Momento de inercia del motor
B_v	Coefficiente de fricción viscosa
K_e	Coefficiente FEM (fuerza electromotriz)
K_T	Coefficiente de carga

Al sustituir los valores de cada una de las constantes del servo motor se obtuvo la función de transferencia, ecuación 2.

$$G_L(s) = \frac{0.00031s + 3.65}{3.41 \times 10^{-6}s^2 + 0.04015s + 0.23328} \quad (2)$$

Cabe resaltar que la obtención de la función de transferencia es para un objetivo específico, el cual es poder obtener la sintonización para las pruebas del controlador tipo PID. La figura 2 muestra el diagrama de control mediante un controlador PID.

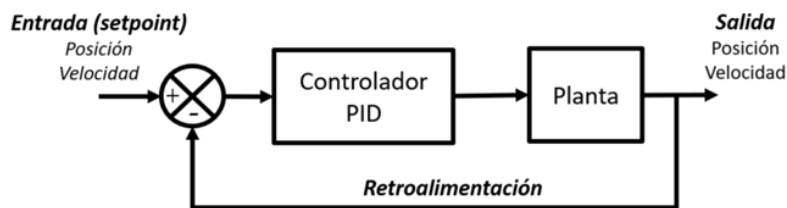
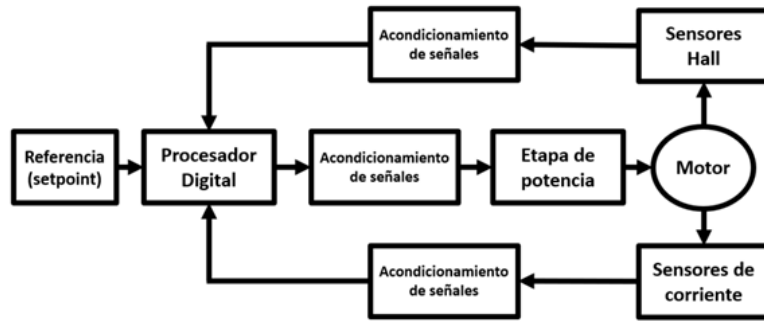


Figura 2 Diagrama de control propuesto mediante un controlador PID.

Descripción de hardware

Al obtener el análisis del tipo y características del motor se procede a realizar el esquema eléctrico para el control de este motor, siendo así que se contemplen las etapas principales: electrónica de control, electrónica de potencia y retroalimentación de las señales principales del motor. En la figura 3 se muestra el diagrama electrónico para el control del servomotor.

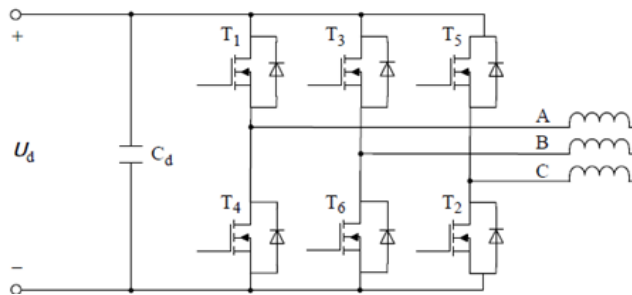
Al realizar la investigación de los servomotores sin escobillas que usaran en este trabajo se determinó que es necesario un puente trifásico para la etapa de potencia del servo controlador a diseñar.



Fuente: Elaboración propia.

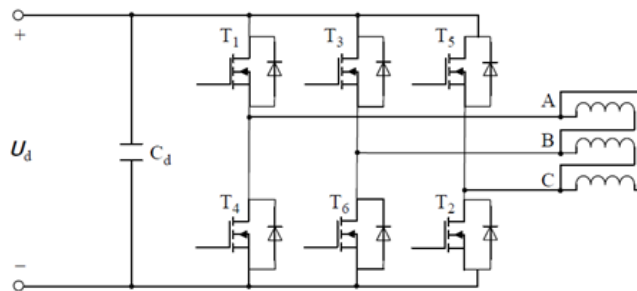
Figura 3 Diagrama electrónico propuesto para el control del servomotor.

La conmutación del motor sin escobillas EC entre sus tres fases tiene un circuito de conducción tipo inversor de 3 ramas el cual se muestran en las figuras 4 y 5. Cada interruptor de alimentación realiza la conmutación en 180° eléctricos el cual energiza cada una de las ramas correspondientes al movimiento que se quiera realizar. Por ejemplo, en la figura 4, para energizar la bobina A, se necesita la conmutación de T1 y T2, para la bobina B la conmutación de T3 y T4 y para la bobina C la conmutación de T5 y T6.



Fuente: Microchip.

Figura 4 Circuito de un controlador puente completo (configuración para un motor tipo Y).



Fuente: Microchip.

Figura 5 Circuito de un controlador puente completo (configuración para un motor tipo Δ).

El modo de conducción trifásico puede aumentar aún más la utilización de los devanados, así como reducir las ondulaciones de torsión. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el modo de conducción trifásico puede conducir a que los interruptores superior e inferior del mismo puente se realicen al mismo tiempo.

El diagrama de un sistema de control de motor sin escobillas DC de puente completo trifásico conectado en Δ (Delta) se muestra en la figura 5 en el cual hay pocas diferencias entre los circuitos de transmisión conectados en Δ y en los conectados en Y (estrella) de la figura 4. Lo único que debemos hacer es considerar el punto de conexión de la fase A y B en el motor conectado en Δ como el punto A en el motor conectado en Y, mientras que el punto de conexión de la fase B y C como punto B, y la conexión Punto de la fase C y A como punto C. Además, se tiene que usar una configuración tipo Delta en el motor cuando se requiera un alto torque de arranque y una configuración Y cuando se requiera una baja corriente de arranque en el motor.

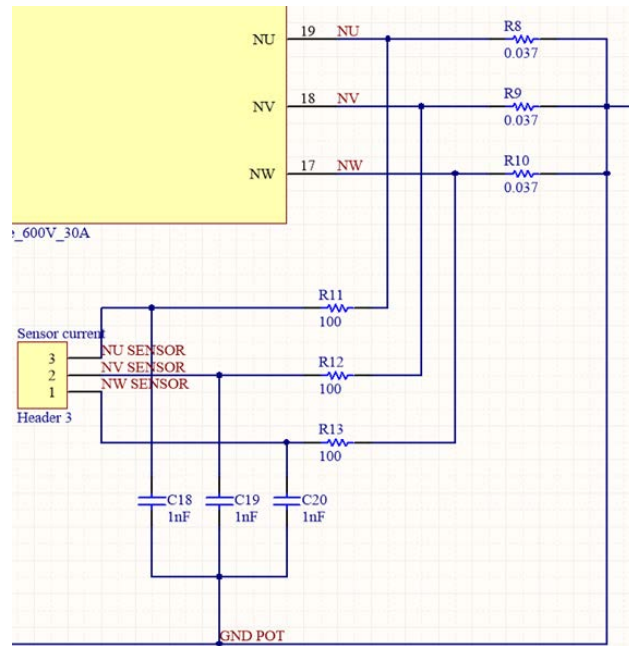
Sensores Hall

En el diagrama electrónico de la figura 3, se contemplan 3 de sensores hall, los cuales permiten al sistema obtener una retroalimentación de velocidad y posición del rotor del motor. Estos sensores hall están incorporados internamente en el cuerpo del motor.

Sensores de corriente

La parte baja de los emisores del puente están disponibles para las mediciones actuales de cada etapa de fase, permitiendo obtener la medición de corriente de cada una de las fases mediante la conexión de cada una de las resistencias de derivación del módulo de control (NU, NV, NW).

Este arreglo electrónico dentro del módulo de control IKCM30F60GD nos ofrece una medida de intensidad mediante una resistencia shunt y filtro de señal resistencia-capacitor para calcular de forma analógica el voltaje obtenido de la corriente, esto como una medida de protección y control del servomotor. En la figura 6 se muestra el diagrama electrónico del monitoreo de corriente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Diagrama electrónico del monitoreo de corriente.

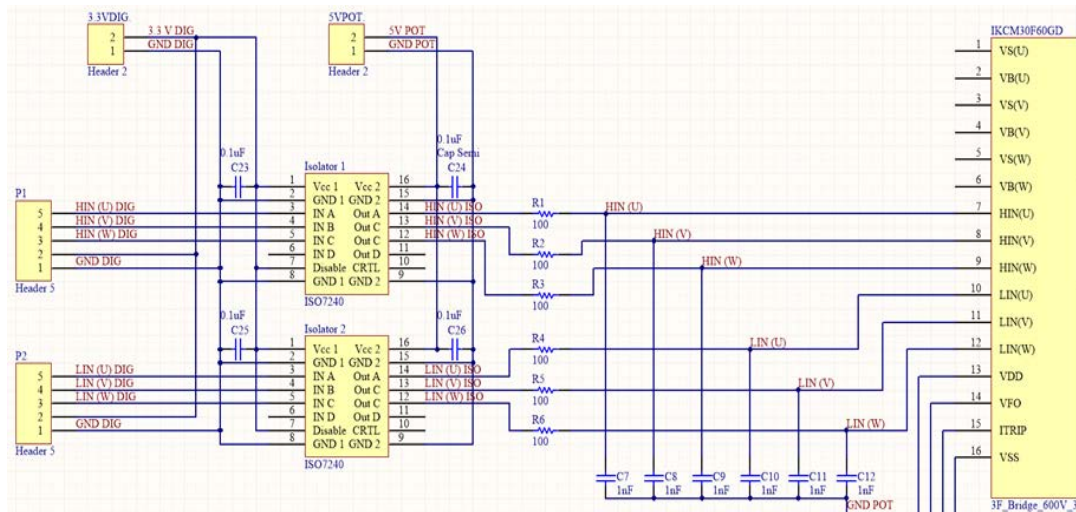
Aislamiento de señales de conmutación

En cuanto al acondicionamiento de señales digitales del procesador de señales digitales desde el procesador de señales digitales DSP hacia el módulo controlador dual de 3 fases IKCM30F60GD se utilizaron aisladores digitales de cuatro canales ISO7240 con configuraciones de múltiples entradas y funciones de salida. Estos dispositivos tienen buffers de entrada y salida lógica separados por la barrera de aislamiento capacitiva que son utilizados junto con fuentes de alimentación aisladas; estos dispositivos ayudan a bloquear el alto voltaje, aíslan las conexiones a tierra y evitan que las corrientes de ruido entren en la tierra local e interfieran o dañen los circuitos sensibles. En la figura 7 se muestra el circuito electrónico de aislamiento de señales digitales.

Acondicionamiento de señales analógicas para protección sobre-corriente

De igual manera que las señales digitales, se debe de diseñar un circuito electrónico de aislamiento de señales analógicas, esto es llevado a cabo mediante la implementación del amplificador de error aislado de alta estabilidad ADUM4190 este dispositivo electrónico es ideal para fuentes de retroalimentación lineal en

comparación con los optoacopladores utilizados comúnmente, ya que es capaz de permitir mejoras en la respuesta transitoria y de la respuesta de salida, siendo ideal para circuitos de monitoreo de señales.



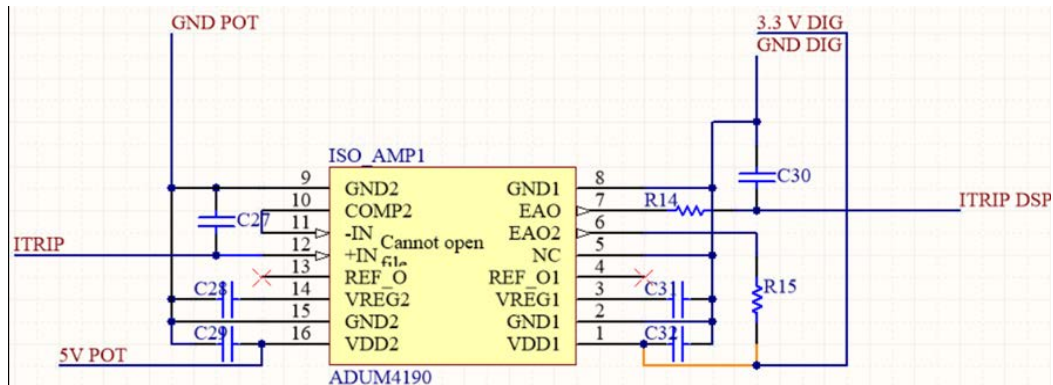
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Circuito electrónico de aislamiento de señales digitales.

A diferencia de un optoacoplador que tiene una relación de transferencia de corriente imprecisa durante su vida útil y variación en su corriente a altas temperaturas, la función y capacidad del aislador analógico no cambia durante su vida útil y permitiendo obtener un funcionamiento ideal en rangos de temperatura de -40 a 125°C.

Además, este aislador analógico es lo suficientemente rápido como para permitir que un circuito de retroalimentación reaccione a condiciones transitorias rápidas y condiciones de sobre corriente.

En la figura 8, se muestra el circuito propuesto para el acondicionamiento de señales analógicas, teniendo en la parte izquierda del circuito la entrada de la señal analógica junto con un voltaje de referencia a tierra de potencia, de igual manera en la parte derecha del circuito muestra una señal de salida con sus filtros de salida resistencia-capacitor junto con su voltaje de referencia digital, cabe resaltar que esta señal de salida es acondicionada para su monitoreo llevado a cabo mediante un procesador de señales digitales y sus puertos de conversión analógico digital.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Circuito electrónico de aislamiento de señales digitales.

Procesador de señales digitales DSP

En cuanto al controlador de las señales de conmutación y protección del driver, se propuso el uso del DSP TMS320F28335 esto por capacidad de ejecutar hasta 150 millones de instrucciones por segundo, canales exclusivos de convertidores analógico-digital y además, contiene 6 canales de salida de alta resolución PWM (Modulación por ancho de pulsos) para el control del servo driver de hasta 5 MHz, lo que nos permite obtener un rango superior de frecuencia para el control y conmutación del servomotor.

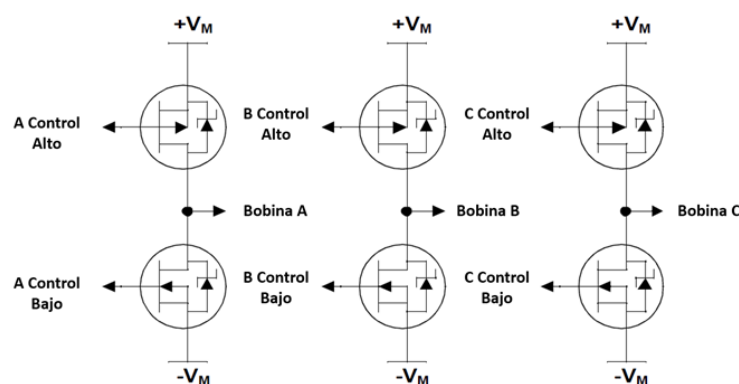
Etapa de potencia

El dispositivo IKCM30F60GD de la marca Infineon ofrece la posibilidad de integrar varios impulsores potencia y control en un solo circuito empaquetado y optimizar el tamaño de la PCB y costos del sistema principal dentro de los robots de inspección de tracción propia. Además, este dispositivo ofrece la oportunidad de desarrollo de un servo driver capaz de manejar motores de baja potencia trifásicos, esto quiere decir que puede soportar motores de 600 V a 30 A en su condición nominal de operación. En la figura 9 se muestra el circuito electrónico para la etapa de potencia del servomotor.

Método de control para el servo motor “six step”

El método de control para el funcionamiento del servo driver que se selecciono fue “six step” el cual consiste en la combinación y conmutación secuencial de cada

El modo más fácil para saber el momento correcto para la conmutación de las bobinas es por medio de la detección de su posición. Muchos fabricantes de motores sin escobillas proveen motores con tres elementos con sensores de posición tipo Hall. Cada sensor provee una salida digital en nivel alto por cada 180 grados eléctricos de rotación, y un nivel bajo para los otros 180 grados eléctricos. Los tres sensores están separados 60 grados eléctricos uno del otro de modo que cada salida del sensor este alineada con uno de los circuitos electromagnéticos. El diagrama de tiempos de la figura 10, muestra una relación entre las salidas de los sensores y el voltaje de control del motor requerido. Los números en la parte superior de la figura 11 corresponde a las fases de la corriente en la figura 10. Es evidente a partir de la figura 11 que las tres salidas de los sensores se superponen de tal manera que se crean seis códigos únicos de tres bits correspondientes a cada una de las fases del variador. Los números que se muestran alrededor del periférico del diagrama del motor en la figura 10 representan el código de posición del sensor. El polo norte del rotor apunta al código que se emite en esa posición del rotor. Los números son los niveles lógicos del sensor, donde el bit más significativo es el sensor C y el menos significativo es el sensor A. Cada rama de conmutación consta de un terminal alto, bajo y flotante. En la figura 12 se muestra un circuito de unidad simplificado. Los controles de cada unidad son individuales para las terminales altas y bajas permiten el accionamiento de cada ramificación. Una precaución que debe tomar con este tipo de circuito es que los controladores de lado alto y de lado bajo de la misma rama nunca deben activarse al mismo tiempo.



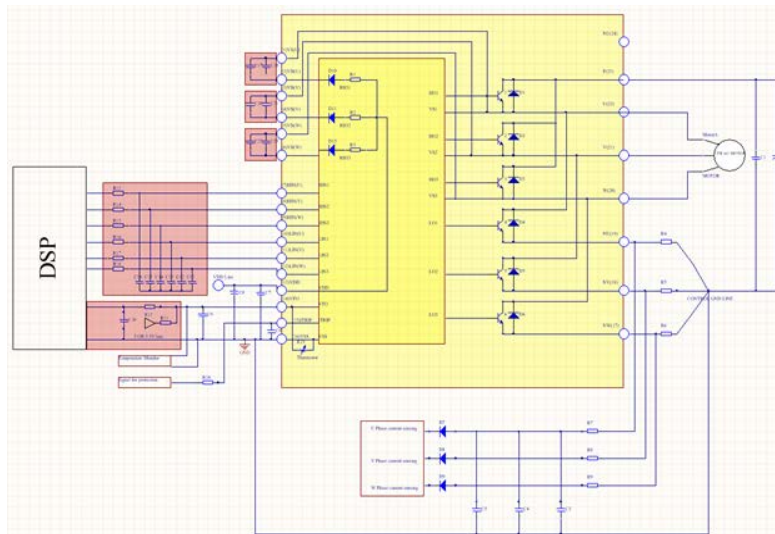
Fuente: Microchip.

Figura 12 Puente completo de tres fases.

En cuanto al punto de referencia se fija un valor constante mediante software; relacionando las mediciones de los sensores hall para establecer una retroalimentación de velocidad rotacional mediante las interfaces de codificación de cuadratura que incluye el DSP.

Diseño electrónico

Como se mostró en el diagrama de la figura 3 el diseño electrónico se basa en varias etapas para la generación de las señales de control del servomotor. Especialmente para este desarrollo se consideró la implementación del módulo de control trifásico IKCM30F6GD como se muestra en la figura 13.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13 Propuesta de diseño electrónico para servo driver.

Ventajas:

- Capacidad de 600 VDC.
- Capacidad de 30 A valor nominal.
- Tecnología con un controlador de compuerta SOI resistente con estabilidad contra voltaje transitorio y voltaje negativo.
- Monitor de temperatura.
- Pines de monitoreo de cada una de las corrientes de fase.
- Circuito de prevención contra la conducción cruzada.

- Todos los 6 interruptores se apagan durante la protección del módulo.
- Bloqueo y sensor de tensión en todos los canales.
- Funcionalidad del circuito Bootstrap integrada.

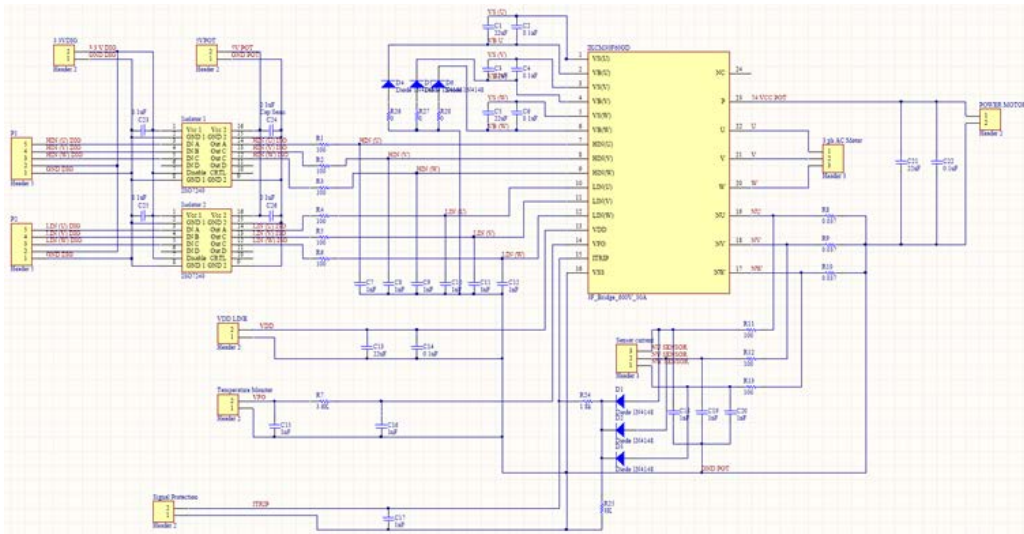
Desventajas:

- Baja resistencia térmica.
- Software especializado para el control de sus fases.
- Hardware especializado para la protección de cada una de sus terminales de potencia.
- Acondicionamiento adecuado para cada uno de sus canales.
- No contiene aislamiento entre sus señales de control y sus señales de potencia.
- Tipo de empaquetado.

El módulo de control IKCMF60GD tiene como finalidad proveer de un diseño robusto, eficaz y compacto para ser implementado en los robots de tracción diseñados en el laboratorio de robótica e inspección dentro de CIDESI. Cabe resaltar que las principales características de este módulo son la capacidad de soportar motores de hasta 600 V y 30 A nominales, lo que hace de este dispositivo uno de los más capaces para controlar motores trifásicos.

3. Resultados

Considerando los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la metodología, se estableció un circuito electrónico completo para el control del servo motor como se muestra en la figura 14; dicho circuito se basó en el diagrama a bloques de la figura 3 con las configuraciones y protecciones necesarias para el funcionamiento del servo driver en robots de tracción propia, esto quiere decir que cuenta con los circuitos electrónicos de acondicionamiento, protección y monitoreo de señales, ya sean digitales o analógicas, para su funcionamiento en tiempo real; estos sensores son de monitoreo de corriente, temperatura y protección ante corto circuito, proporcionados directamente por el módulo IKCMF60GD.

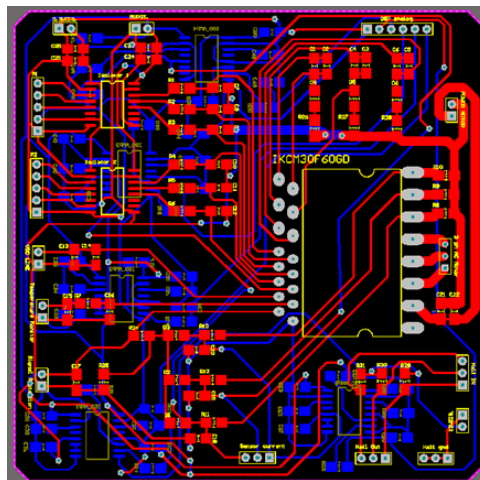


Fuente: Elaboración propia.

Figura 14 Diseño electrónico del prototipo para el dispositivo servo drive.

En el caso de alimentación del servo driver requiere de una fuente de corriente directa a 24 V, dicha señal de alimentación es manipulada por el módulo de control trifásico, dando el movimiento rotacional mediante el control por conmutación mostrados en las figuras 10 y 11.

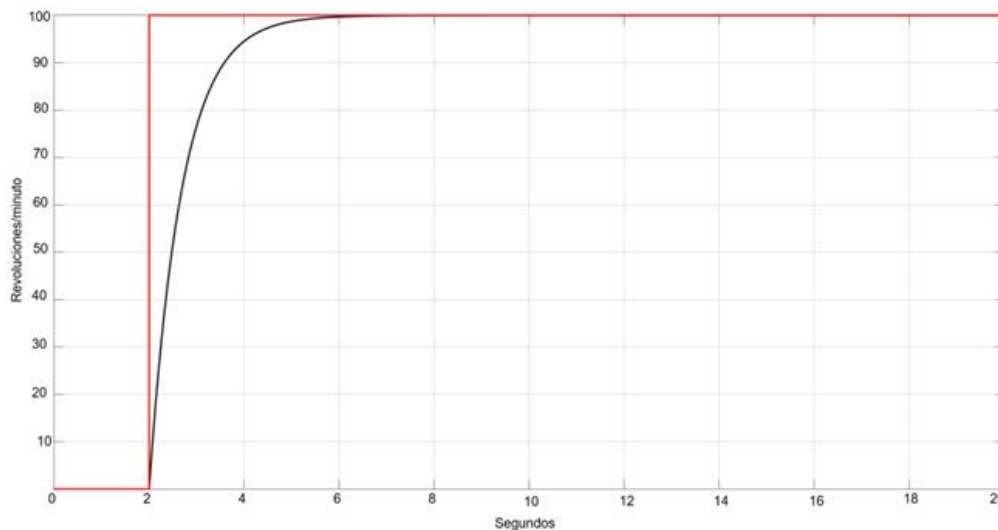
En la figura 15 se muestra el diseño final para el ruteo en una placa PCB de dos caras con dimensiones de 7 cm de lado, aclarando que este es un prototipo para corroborar su funcionamiento de los procesos electrónicos mostrados en la etapa de metodología.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Diseño PCB del prototipo para el dispositivo servo drive.

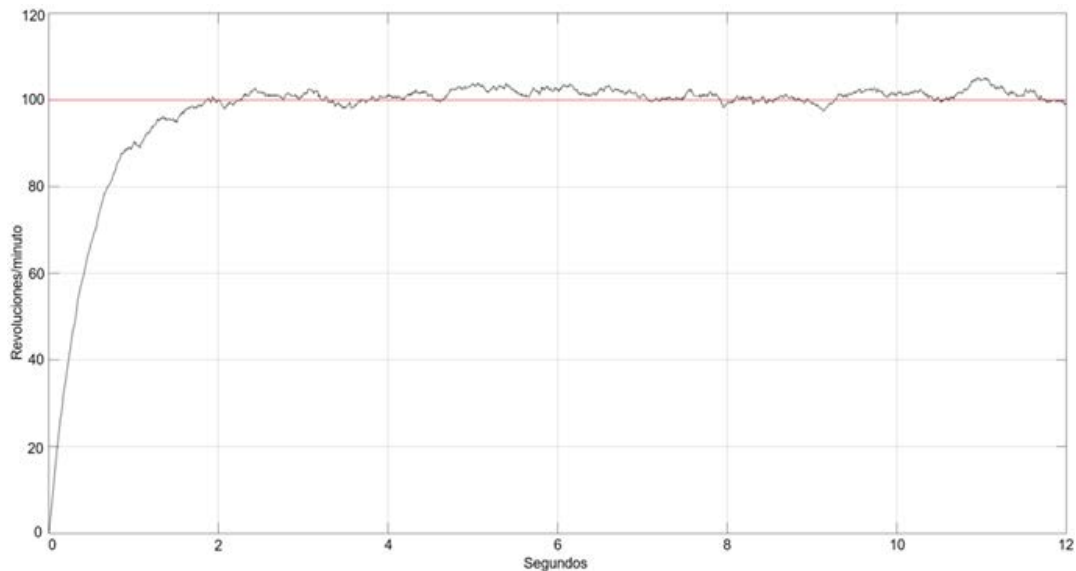
En la primera etapa de la metodología se obtuvo el modelo, tipo de motor y función de transferencia del servomotor, con ello también la simulación y simulación de las respuestas con la sintonización de un control PID convencional, como se muestra en la figura 16, donde se contempla la respuesta a una referencia de 100 rpm (revoluciones por minuto) en donde alcanza la referencia en aproximadamente 6 segundos. Con este resultado queda que probado que la sintonización del controlador PID funciona correctamente para este sistema.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Grafica de respuesta a una entrada de 100 rpm mediante un control PID.

Durante las pruebas físicas del servo driver se dio a la tarea de sintonizar y adecuar el controlador PID de la simulación hacia el hardware, dando pequeñas diferencias entre el resultado obtenido y el resultado de simulación figura 16 y 17, por ello se dio a la tarea de modificar tenuemente los valores obtenidos de la simulación, obteniendo una respuesta en estado estable en aproximadamente 2 segundos con un error del 10% ósea más menos 5 rpm oscilantes en su referencia. Para la evaluación experimental del controlador, se empleó una señal de entrada de 100 rpm en conjunto a un controlador PID y el acondicionamiento de las señales digitales de los sensores hall para el cálculo de la velocidad rotacional del motor, observando que se necesita obtener un método de retroalimentación con menor ruido o un filtro para las señales de velocidad del eje del motor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17 Grafica de respuesta a una entrada de 100 rpm mediante un control PID.

Cabe resaltar que el propósito de este documento es evaluar el comportamiento y funcionamiento del diseño del accionamiento o driver para servomotores de baja potencia como este fue el caso, mediante un integrado de mayor capacidad y, además, corroborar el funcionamiento de este integrado, para en futuros trabajos considerar el aumento de la potencia del servomotor.

4. Discusión

El objetivo de este proyecto fue proponer una solución alterna para la implementación y control para los motores sin escobillas EC, aunque únicamente en este trabajo se trate el diseño para el control en específico de uno de ellos; este dispositivo nos proporciona la facilidad de fabricación, experimentación y adaptabilidad para diversos proyectos sin la necesidad de depender de un proveedor especialista para cada uno de los servomotores utilizados.

La parte de control junto con el método de conmutación del motor debe ser evaluado para observar el comportamiento de los diferentes tipos de motores, sea brushless EC, brushless DC, brushless AC, servomotor o inclusive motor tipo jaula de ardilla; mencionado esto, este dispositivo es capaz de controlar una gama amplia de motores de baja potencia; cabe resaltar que debe ser monitoreado y demostrar el

buen funcionamiento para los tipos de motores antes mencionados, además de destacar las ventajas y desventajas de la implementación en diferentes áreas de trabajo.

También, se obvia que dependiendo el tipo de motor y el área de trabajo, la respuesta del motor va a tener una discrepancia en el comportamiento de este, cambiando el desempeño del dispositivo propuesto; en base a este último comentario es evidente observar que el método propuesto para el control de conmutación depende de la retroalimentación de posición, por lo cual se tiene que implementar un método diferente al propuesto, si es dado el caso para implementar el dispositivo en motores trifásicos sin la tecnología servo; asimismo, se debe considerar un tipo de algoritmo y teoría de control en conjunto para obtener resultados aceptables de la respuesta del motor. Además, el diseño de este controlador nos permite obtener un dispositivo capaz de ser reprogramado para utilizar diferentes algoritmos de control y probar su veracidad ante diferentes tipos de motores.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Chang-liang, Xia, Permanent magnet brushless dc motor drives and controls, pag. 25-62, 2012.
- [2] Microchip, Brushless DC motor Control Made Easy, pag. 1-48, 2002.
- [3] Firoozian, Riazollah, Servo motor and industrial control theory, pag. 1-225, 2009.
- [4] Miller, T.J.E., Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives, 1989.
- [5] Krishnan, R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives, 2010.
- [6] Infineon, Control integrated power system, 2016.
- [7] Texas Instruments, ISO724x High Speed, Quad-channel digital isolators, 2017.
- [8] Maxon motors, EC-max 30 brushless motor 40 watt, pag.226, 2015.
- [9] Analog Devices, High stability isolated error amplifier ADuM4190, 2013.
- [10] Floyd, Thomas, Dispositivos electrónicos, cap. 2 y 5, 2008.