

## **Diseño de un sistema de control de velocidad para el motor dc de la pulidora metalográfica modelo 3E881M**

Autores:

Ing. Eduardo Smith Galano, [esmith@ismm.edu.cu](mailto:esmith@ismm.edu.cu), Departameto de Ing. Eléctrica, ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Ing. Maribel Cañete Utria, [mcutria@ismm.edu.cu](mailto:mcutria@ismm.edu.cu), Departameto de Ing. Mecánica, ISMM "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

### **RESUMEN**

Tradicionalmente el motor de corriente directa (dc) ha sido más empleado en accionamientos que requieren una velocidad regulable y control automático de torques y velocidades. En este trabajo se diseñó un sistema de control de velocidad para el motor dc de la pulidora metalográfica modelo 3E881M, que se encuentra en el laboratorio Ciencia de los materiales, del departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Para el diseño se empleó el método de control del voltaje en los terminales de la armadura con la configuración de voltaje constante de acoplamiento de dc con modulación de ancho de pulso (PWM) de una sola polaridad para el cual se utiliza un microcontrolador del tipo PIC. Como resultado se logró el diseño de un sistema de control eficiente y económico que permitió una mejora en la funcionalidad del equipo, concluyendo que el sistema de control diseñado permite poner en funcionamiento la máquina abriendo la posibilidad de explotación de la misma y permitiendo la adecuada realización de prácticas de laboratorio e investigaciones que involucren este medio.

**PALABRAS CLAVE:** Control de velocidad, motor dc, pulidora metalográfica

### **ABSTRACT**

Traditionally the direct current (dc) motor has been used more in drives that require an adjustable speed and automatic control of torques and speeds. In this work, a speed control system was designed for the dc motor of the metallographic polisher model 3E881M, which is in the material science laboratory of the Mechanical Engineering department of the ISMM. For the design, the voltage control method was used on the armature terminals with the single-polarity pulse width modulation (PWM) DC coupling constant voltage

configuration for which a PIC type microcontroller . As a result, the design of an efficient and economical control system was achieved, which allowed an improvement in the functionality of the equipment, concluding that the control system designed allows the machine to be started up, opening the possibility of operating it and allowing the proper realization of laboratory practices and research involving this medium.

**KEYWORDS:** Speed control, dc motor, metallographic polisher

## INTRODUCCIÓN

Para el adecuado estudio de las características estructurales o de constitución de los metales o aleaciones se emplean varios medios entre ellos la pulidora metalográfica que resulta ser una máquina destinada al pulido de metales duros o blandos. En ella se pueden tratar superficies planas de diferentes aleaciones y minerales por medio de lijas y abrasivos para la rectificación, debido a que trata diferentes tipos de materiales, opera a velocidad variable dependiendo del material, generalmente estas pulidoras son accionadas por motores eléctricos de corriente directa debido a las ventajas que estos ofrecen. Los motores DC, poseen condiciones de operación idóneas para variar su velocidad sin alterar sus parámetros de funcionamiento.

En el laboratorio Ciencia de los Materiales perteneciente al ISMMM "Dr Antonio Núñez Jiménez", se encuentra una pulidora metalográfica modelo 3E881M del año 1985, destinada a la preparación de muestras o secciones de metales para la realización de prácticas de laboratorio e investigaciones de la carrera ingeniería mecánica, estas pulidoras generalmente son accionadas por motores de corriente directa debido al control par-velocidad que ofrecen estos motores. La pulidora metalográfica varía su velocidad mediante el método de control de la resistencia del circuito de armadura. En los últimos años el laboratorio Ciencia de los Materiales se ha visto limitado debido al deterioro paulatino de este medio haciéndose necesario el diseño de un sistema de control de velocidad, que permita la puesta en marcha del mismo, es por esto que el objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de control de velocidad para el motor dc de la pulidora metalográfica modelo 3E881M.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### MÉTODO DE CONTROL A EMPLEAR

Para el diseño se empleará el método de control del voltaje en los terminales de la armadura, con la configuración de voltaje constante de acoplamiento de dc y modulación de ancho de pulso (PWM) de una sola polaridad, para el cual se utilizará un microcontrolador del tipo PIC (*Peripheral Interface Controller*) el cual genera una señal PWM variable que hace conmutar al elemento de potencia y así lograr variar la tensión en la armadura. Como se muestra en la figura 1.

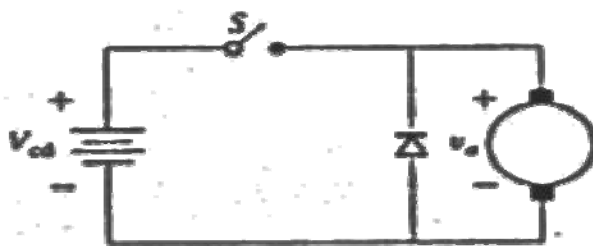


Figura 1. Esquema del control de voltaje en los terminales de armadura

Cuando un motor dc funciona con sus valores de tensión, corriente de excitación y potencia asignadas o nominales se dice que gira a la velocidad base. La regulación por control de la tensión aplicada al inducido se realiza para velocidades inferiores a la velocidad base, pero no para velocidades superiores a ella, ya que requeriría una tensión mayor que la asignada, por lo que podría dañarse el inducido (Fitzgerald 2004). La regulación por control de la corriente de excitación se emplea para velocidades superiores a la velocidad base (Herman 2014). En la regulación de velocidad por ajuste de la tensión aplicada al inducido (caso de motores con excitación independiente), cuanto menor es la tensión aplicada, menor es la velocidad, y cuanto mayor es la tensión, más elevada es la velocidad que alcanza el motor, existe una velocidad máxima que puede alcanzar la máquina con este procedimiento, y corresponde al valor máximo de la tensión permitida (tensión asignada) (Guadalupe 2006). Este método es capaz de ofrecer un par constante mientras varía su velocidad y potencia demostrando ser más factible desde el punto de

vista energético ya que requiere para bajas velocidades ,bajas potencias ,en comparación con el método de control de la corriente de campo que trabaja a potencia constante (Guru, Hiziroglu et al. 2003).

## **HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA EL DISEÑO**

Para el diseño de circuitos a base de microcontroladores se usan herramientas programas como simuladores y compiladores que permiten poner en práctica el desarrollo del diseño, fueron empleadas las herramientas informáticas Proteus 8.1 y Mikro C.

El entorno de diseño electrónico Proteus 8.1 que se muestra en la figura 2, desarrollado por Labcenter Electronics ofrece la posibilidad de simular código de microcontroladores de alto y bajo nivel. Esto permite realizar el diseño y la simulación en un mismo y único entorno (Breijo 2012). Para ello, se suministran tres potentes subentornos:

- El ISIS para el diseño gráfico
- VSM (Virtual SystemModelling) para la simulación
- El ARES para el diseño de circuitos impresos.

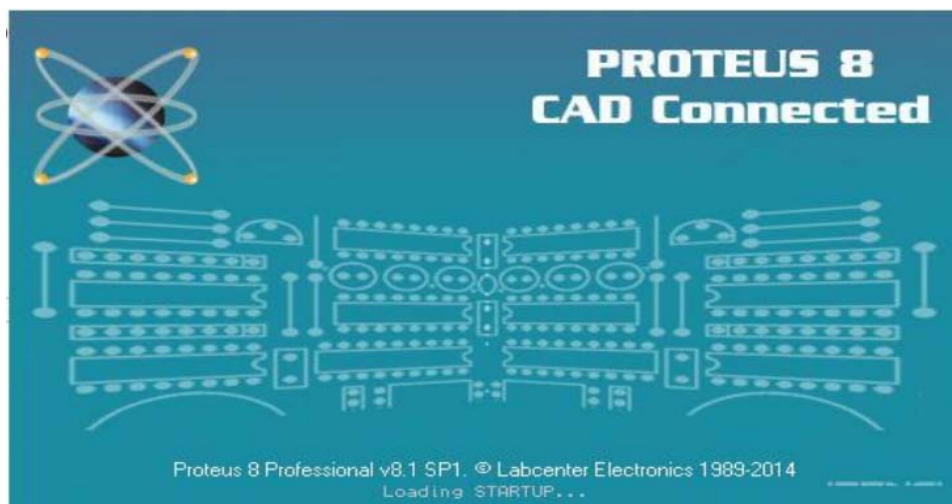


Figura 2. Proteus 8.1.

ISIS es un potente programa de diseño electrónico que permite realizar esquemas que pueden ser simulados en el entorno VSM o pasados a un circuito impreso ya en el entorno ARES. El ISIS permite la simulación de las familias de los PICMicro más populares tales como la: 12F, 16F, 18F. El

software permite, simular actuadores como: motores dc, servo motores, luces incandescentes entre otros. Es posible simular periféricos de entrada y salida como teclados, y puertos físicos del ordenador como: RS232, y USB (Breijo 2012). Este simulador cuenta con una amplia variedad de instrumentos de medición como voltímetros, amperímetros, osciloscopios, y analizadores de señal. En la figura 3 se puede apreciar la apariencia visual del entorno de desarrollo del ISIS.

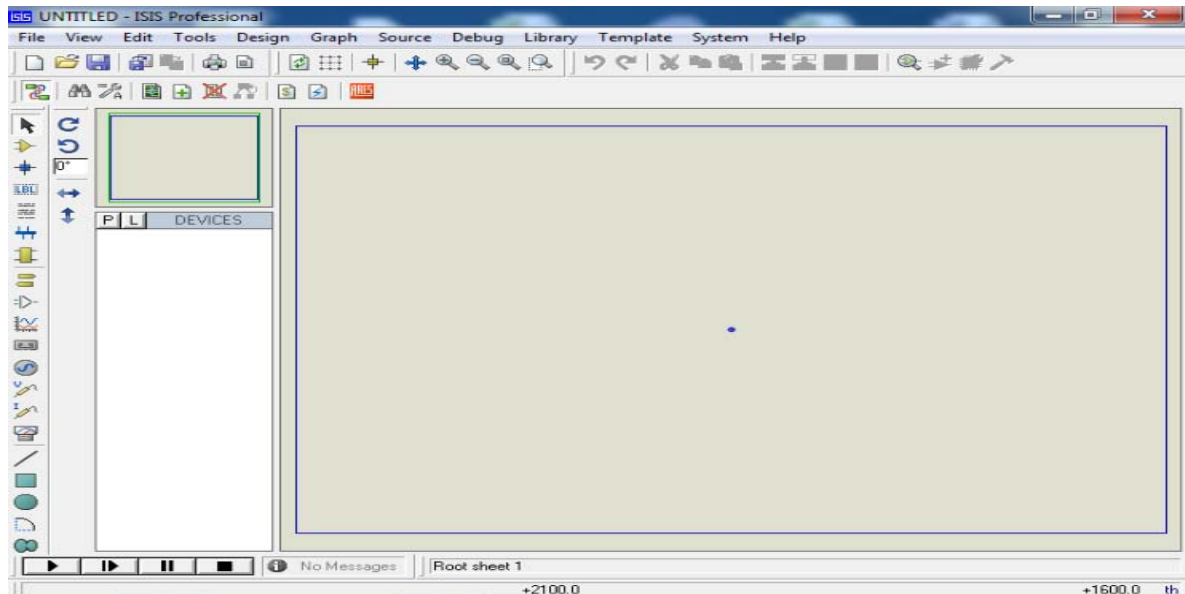


Figura 3.Vista del entorno de desarrollo del ISIS.

### **COMPILADOR MIKROC PRO**

La programación de microcontroladores se basa en un código conocido como ensamblador. El ensamblador crea códigos de programa extensos y de difícil comprensión. La creación de compiladores de alto nivel facilitó la edición y creación de programas en todo modo de programación lógica, comercialmente existen varios compiladores de diferentes fabricantes y diferentes lenguajes de alto nivel como PICC, PIC Basic y el MikroC PRO (figura 4) que es un paquete de software con una amplia variedad de ayudas y herramientas que facilita la creación de proyecto y usa lenguaje C para microcontroladores PICMicro de la familia 12F, 16F, y 18F (Osorio, Vargas et al. 2009). El lenguaje C utiliza estructuras que facilitan la programación, optimiza las operaciones matemáticas y los procesos, por medio del uso de funciones predefinidas y las no predefinidas, así como el uso de un conjunto de variables de diferentes tipos. El compilador crea automáticamente el código ensamblador y a su vez un

código similar en un archivo con extensión \*.hex el cual es empleado tanto en la simulación como en la programación eléctrica del microcontrolador (Chien, Connor et al. 1998).

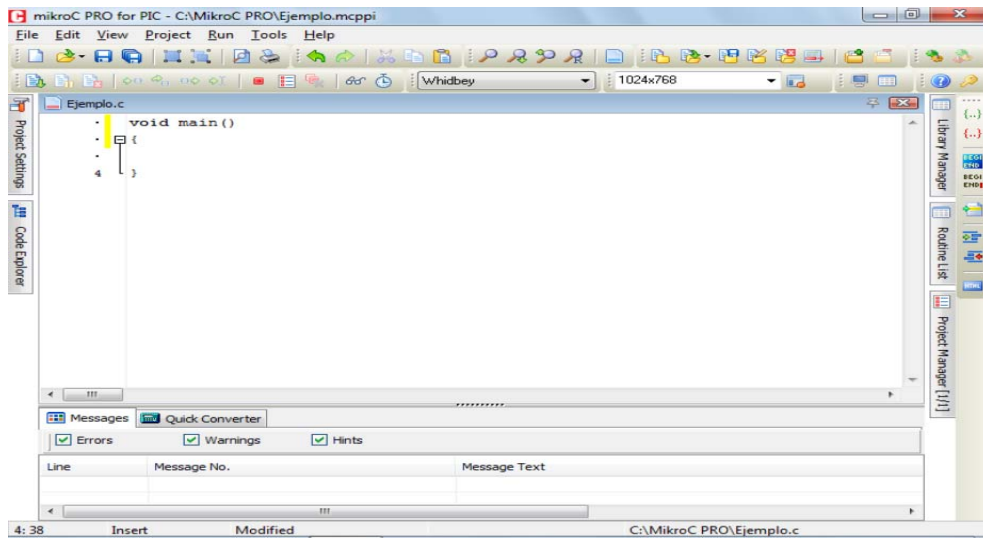


Figura 4.Vista del entorno de MikroC Pro.

## DISEÑO DEL CONTROL DE VELOCIDAD

Uno de los aspectos fundamentales para llevar a cabo el diseño del control de velocidad es conocer las características del motor sobre el cual se va a trabajar (tabla 1) pues este se encarga de las velocidades de giro de la pulidora definiendo así la variedad de materiales que pueden ser tratados.

Tabla 1.Características del motor dc de la pulidora metalográfica.

Magnitud	Valor
Potencia (P)	1,17 kW
Tensión (V)	220 V
Corriente (I)	6,48 A
Corriente de campo (If)	0,35 A
Corriente de armadura (Ia)	6,13 A
Velocidad (n)	3150 rpm
Constante geométrica (Kf)	1,582 V/A·rad/s
Resistencia de armadura (Ra)	6,1Ω
Resistencia de campo (Rf)	632Ω
Eficiencia (η)	78%

Para la preparación de secciones metalográficas, la pulidora gira en un rango de velocidad de 75 rpm a 1500 rpm dependiendo del tipo de material, la cual cuenta con una transmisión por poleas que reduce la velocidad del motor de

3150 rpm a 1500 rpm. Originalmente constaba de 4 pasos de velocidad y con el objetivo de ampliar su funcionalidad se le incrementaron 3 pasos dentro de su rango de velocidad, empezando por la velocidad mínima de 75 rpm hasta la máxima de 1500 rpm.

Utilizando la ecuación de conversión de velocidad de rpm a radianes por segundo sería.

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (1)$$

Donde:

$\omega_m$  : es la velocidad angular en radianes por segundo

n : es velocidad en revoluciones por minuto (rpm)

Debido al método de control a utilizar se hace necesario conocer el voltaje de armadura del motor para cada paso de velocidad (Chapman 2005) mediante la ecuación (2) y realizando un despeje del voltaje de armadura la ecuación sería

$$\omega_m = \frac{(V_a - I_a \cdot R_a)}{K_f \cdot I_f} \quad (2)$$

$$V_a = \omega_m \cdot K_f \cdot I_f + I_a \cdot R_a \quad (3)$$

Va: Voltaje promedio de armadura

Ia: Corriente de armadura

Ra: Resistencia de armadura

Para el primer paso de velocidad el motor gira a 157.5 rpm mientras que el disco de la pulidora gira a velocidad de 75 rpm producto a la transmisión por poleas que posee la máquina que reduce la velocidad del motor utilizando la ecuación (1) y sustituyendo la velocidad del motor en radianes por segundo es.

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot 157.5}{60} = 16.5 \text{ rad/s}$$

Sustituyendo el valor de velocidad en la ecuación (3) el voltaje de armadura para una velocidad de 75 rpm es:

$$V_a = 16.5 \cdot 1.582 \cdot 0.35 + (6.13 \cdot 6.1) = 46.5 \text{ V}$$

Por lo tanto utilizando la ecuación (4) y despejando el ciclo de servicio de la señal PWM seria.

$$V_a = D \cdot V_{cd} \quad (4)$$

$$D = \frac{V_a}{V_{cd}} \quad (5)$$

$$D = \frac{46,5}{220} = 0,21 \text{ o } 21\%$$

Para los siete escalones de velocidad se realizaron los cálculos pertinentes y los principales resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Relación de velocidad, ciclo de servicio de la señal y voltaje de armadura.

Velocidad de la pulidora (rpm)	Velocidad del motor (rpm)	Velocidad del motor en (rad/seg)	Voltaje de armadura del motor (V)	Ciclo de servicio de la PWM (%)
75	157.5	16.5	46.5	21
350	735	76.9	79.9	36
550	1155	120.8	104.3	47
750	1575	164.9	128.6	58
1000	2100	219.8	159	72
1250	2625	274.7	189.5	86
1500	3150	329.7	219.9	99

Para la realización del control de velocidad de la pulidora metalográfica quedó definida la utilización de un método de variación de velocidad, empleando un control con un microcontrolador del tipo PIC16F877A, mediante la generación de una señal PWM que controla un dispositivo semiconductor en función de chopper.

El circuito de fuerza está compuesto por un transistor del Tipo IGBT (Insulated Gated Bipolar Transistor) realizando la función de pulsador o chopper y un diodo de potencia del tipo de recuperación rápida en función de marcha libre para proveer una trayectoria a la corriente de la carga inductiva del motor. La figura 5 muestra el circuito de fuerza de la aplicación.



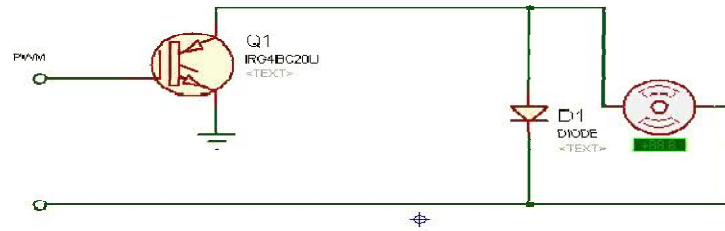


Figura 5 Vista esquemática del circuito de fuerza.

En la realización del diseño se escogió el transistor IGBT IRG4PC40U debido a su capacidad de manejar grandes corrientes, sus bajas pérdidas en operación, así como su velocidad de conmutación (Blake and Bull 2001). La tabla 3 muestra los parámetros eléctricos del elemento.

Tabla 3. Parámetros eléctricos del transistor IGBT IRG4PC40U.

Parámetros Eléctricos	Símbolos	Valor
Voltaje colector - emisor	$V_{ce}$	600 V (dc)
Voltaje gate-emisor	$V_{ge}$	$\pm 20$ V (dc)
Corriente de colector	$I_c$	40 A
Pulso repetitivo de corriente por colector	$I_{cm}$	160 A

En el diseño se emplea además diodo de recuperación rápida, este es un diodo de potencia con un menor tiempo de recuperación inversa. Si un diodo se encuentra conduciendo una intensidad, la zona central de la unión P-N está saturada de portadores mayoritarios. Si mediante la aplicación de una tensión inversa forzamos la anulación de la corriente con cierta velocidad resultará que después del paso por cero de la corriente existe cierta cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten que el diodo conduzca en sentido contrario durante un instante (Rashid 2004). La tensión inversa entre ánodo y cátodo no se establece hasta después del tiempo llamado tiempo de almacenamiento, en el que los portadores empiezan a escasear y aparece en la unión la zona de carga espacial. La intensidad todavía tarda un tiempo llamado tiempo de caída en pasar de un valor de pico negativo ( $I_{RRM}$ ) a un valor despreciable mientras van desapareciendo el exceso de portadores a la suma de estos dos tiempos se le conoce como tiempo de recuperación inversa.

La tabla 3 muestra los parámetros eléctricos del diodo de recuperación rápida escogido para el trabajo.

Tabla 3. Parámetros eléctricos del diodo de recuperación rápida.

Parámetros Eléctricos	Símbolo	Valor
Tensión inversa de pico repetitivo	$V_{RRM}$	400 V
Tensión inversa continua	$V_R$	400 V
Intensidad media nominal	$I_F$	7.5 A
Perdidas en conducción	$V_f$	0.90 V
tiempo de recuperación inversa	$t_{rr}$	50 ns

MICROCONTROLADOR PIC16F877A

El elemento fundamental en el circuito propuesto lo constituye precisamente el microcontrolador, debido a que realiza todas las funciones de control en los dispositivos que intervienen directamente en la regulación de la velocidad del motor dc, su programación constituye unas de las tareas fundamentales en el control del motor dc de la pulidora metalográfica.

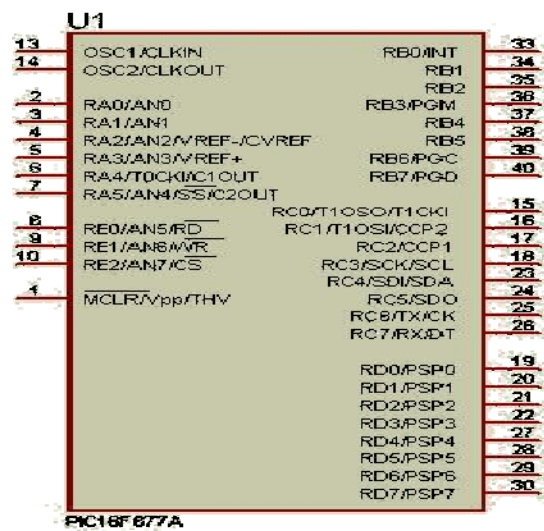


Figura 6. PIC16F877A

El microcontrolador PIC16F877A es el encargado de producir una señal del tipo PWM variable dependiendo del usuario, además de visualizar en un dispositivo LCD (*Liquid Crystal Display*) información generada por la aplicación. Este PIC

es uno de los microcontroladores de la familia Microchip más comunes actualmente, poseen características que hacen a estos microcontroladores dispositivos muy utilizados en diferentes ramas de la industria y la sociedad (Microchip 2009). Algunas de sus características más importantes son:

- Frecuencia máxima 20MHz
- Memoria de programa FLASH (palabra de 14 bits) 8k
- Memoria RAM de datos (bytes) 368
- Memoria EEPROM de datos (bytes) 256
- Puertos E/S A,B,C,D,E
- Número de terminales 40
- Tres temporizadores
- Dos módulos CCP(Capture/Compare/PWM)
- Comunicaciones serie MSSP, USART
- Comunicación paralelo PSP
- Ocho módulo de CAD ( Conversor A/D) de 10 bits
- Arquitectura Harvard
- Dos canales PWM
- Dos comparadores analógicos
- CPU RISC

El control PWM es uno de los tres posibles modos de operación del módulo CCP de los microcontroladores PIC. En este modo, el terminal CCP1 produce una señal de hasta 10 bits de resolución (Microchip 2009). Este terminal tiene que configurarse como salida por medio del registro TRIS.

El siguiente diagrama de flujo que se muestra en la figura 7 representa el algoritmo seguido para la elaboración del programa principal.

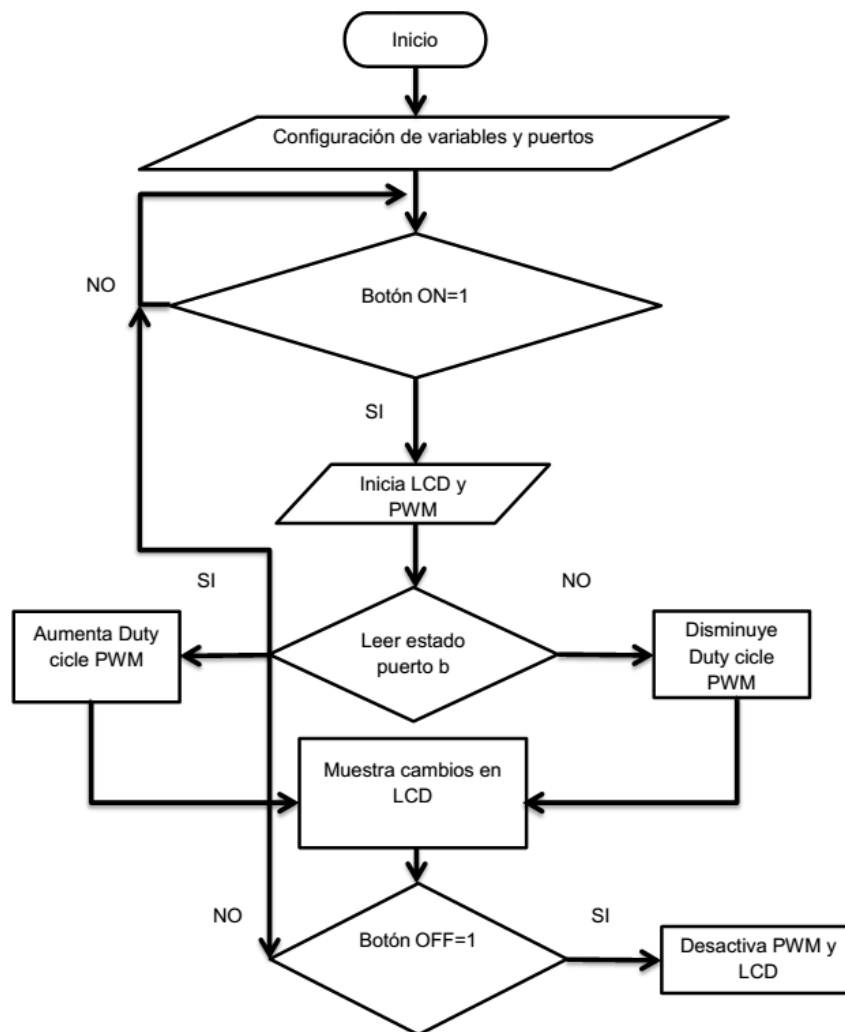


Figura 7. Diagrama de flujo.

En este algoritmo se puede apreciar el procedimiento a seguir, que básicamente consiste en la configuración de variables y puertos utilizados por el sistema, la lectura del botón (POWER ON) que es quien permite la puesta en marcha del sistema de control, posteriormente se inicializa el módulo LCD para la visualización de mensajes y parámetros que genera la aplicación, luego se inicializa la señal PWM del microcontrolador para proceder a la lectura de los botones del puerto B del microcontrolador, dependiendo del botón pulsado y de la duración del pulso se incrementan o decrementan los valores del ciclo de trabajo de la señal PWM, se actualizan los nuevos valores en el visualizador LCD y se pregunta por el estado del botón (POWER OFF) dependiendo de su estado y duración del pulso se procede a desactivar la señal PWM y apagar el sistema de control o a repetir el ciclo del programa.

## PANEL DE BOTONES

Para el control de cualquier sistema de regulación de velocidad para motores dc se necesita de al menos un panel de botones que permitan la puesta en marcha y parada, además de la selección del sentido de giro del motor. Los botones en cuestión se muestran en la figura 10.

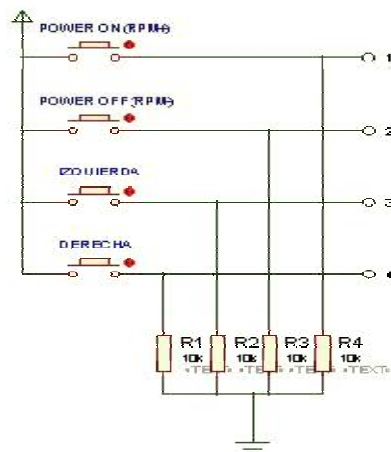


Figura 10. Vista esquemática del panel de botones desde el software Proteus.

## CONTROL DEL PULSADOR

El acoplamiento entre el circuito de fuerza y el microcontrolador se realiza a través de un optoacoplador (figura 11) para aislarlos galvánicamente y proteger de esta forma al microcontrolador, a través del optoacoplador se activa directamente el transistor encargado de realizar la función de pulsador que en este caso fue un transistor del tipo IGBT.

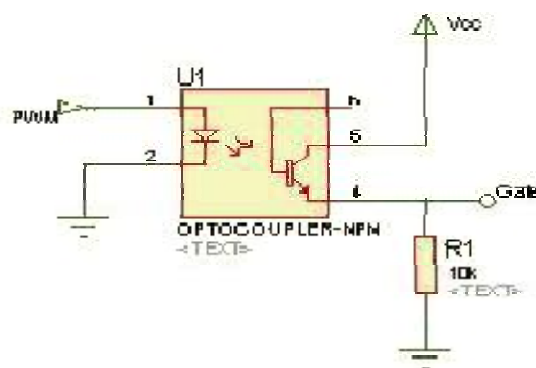


Figura 11 Circuito de disparo.

## CIRCUITO OSCILADOR

El microcontrolador PIC 16F877A, al igual que cualquier microcontrolador de la familia Microchip necesita de una señal de reloj que le servirá como base de

tiempo para la ejecución de las instrucciones, a pesar de poseer un fuente de reloj interna que brinda la comodidad de reducir el número de componentes externos su precisión y estabilidad frente a los cambios de temperatura no es la mejor (Microchip 2009). Por lo tanto se utilizara un oscilador a cristal externo de 4 MHz (figura 12) el cual se conecta a través de los terminales OSC1 y OSC2 del microcontrolador. El diseño de la oscilación externa tuvo en cuenta los datos suministrado por el fabricante.

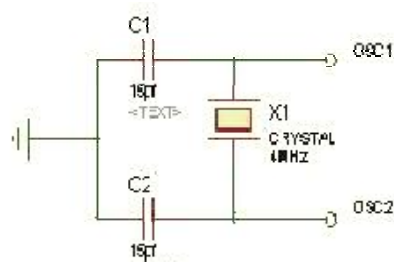


Figura 12. Circuito Oscilador.

### FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL CIRCUITO DE CONTROL

El microcontrolador necesita una fuente de alimentación que le proporcione corriente continua al igual que otros módulos del circuito que necesiten de otros voltajes. La fuente debe ser capaz de entregar 12 V para del chopper, en tanto son necesarios 5 V para el resto de los componentes del circuito. La figura 15 muestra el diseño de la fuente de alimentación.

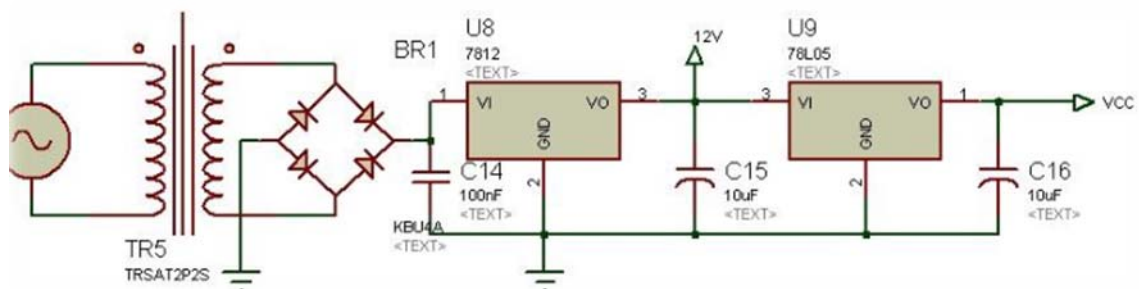


Figura 13. Vista esquemática de la fuente de alimentación.

### RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Las gráficas que se muestran a continuación son el resultado de la simulación en el software Proteus 8.1, en ellas se observa el diseño del circuito y el comportamiento que debe tener luego de montado experimentalmente. La figura 16 muestra el diseño de la aplicación mientras las figuras 15 y 16

muestra las formas de onda de entrada y salida del circuito de fuerza de la aplicación para una velocidad de 75 RPM y 1500 RPM respectivamente.

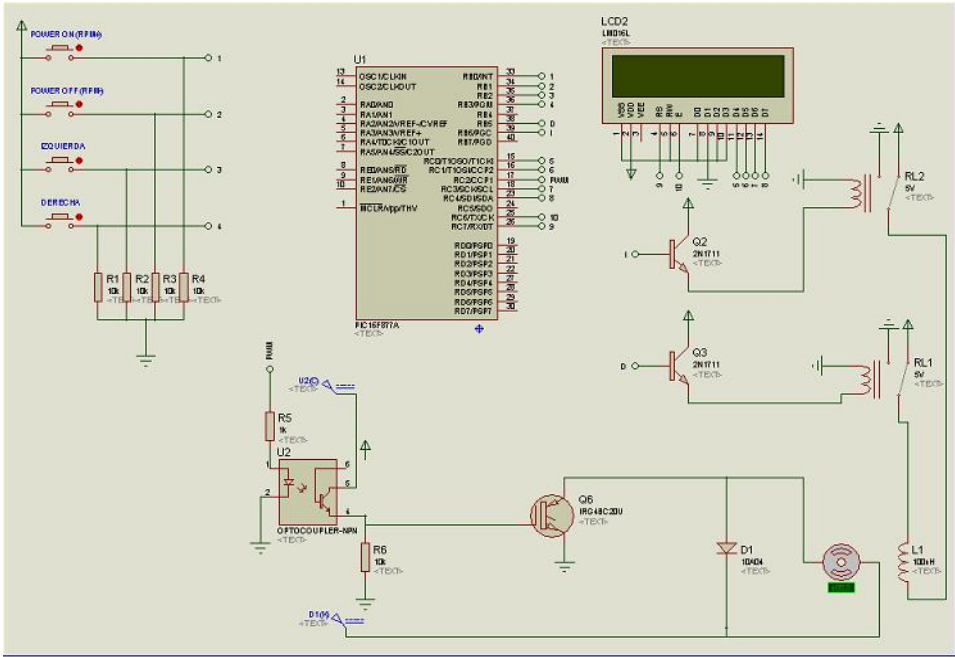


Figura 14. Diseño de la aplicación.

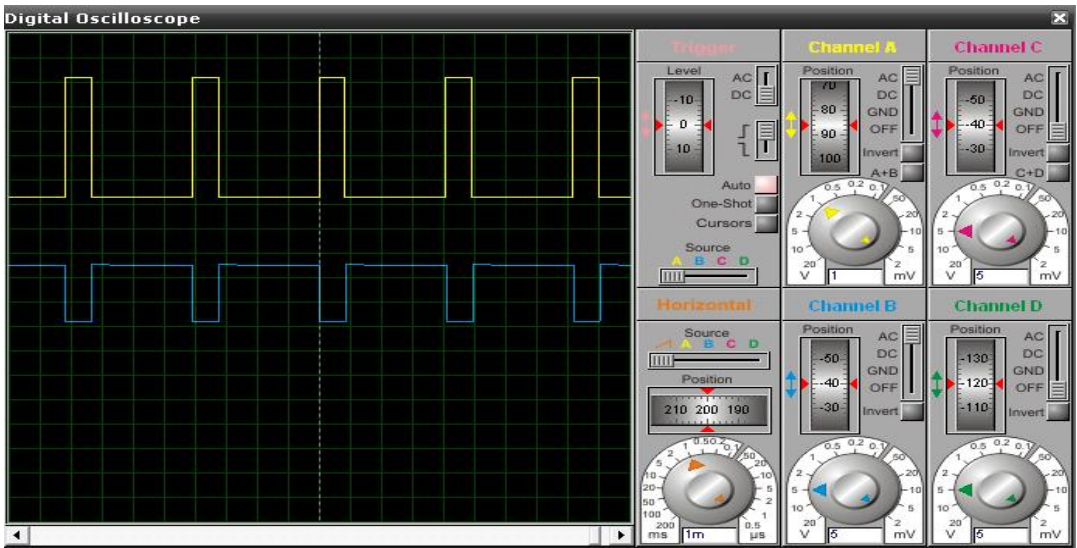
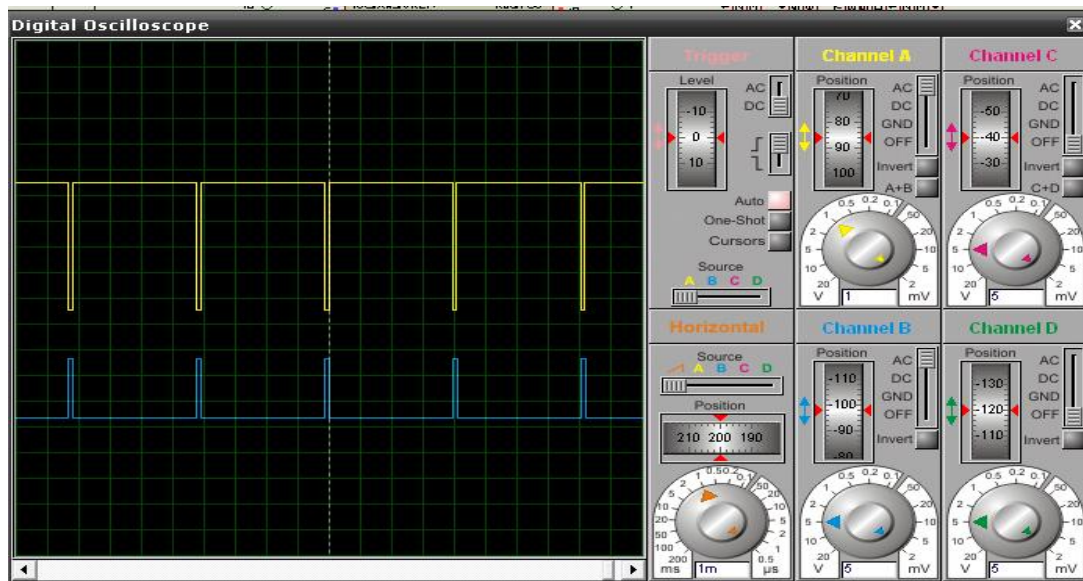


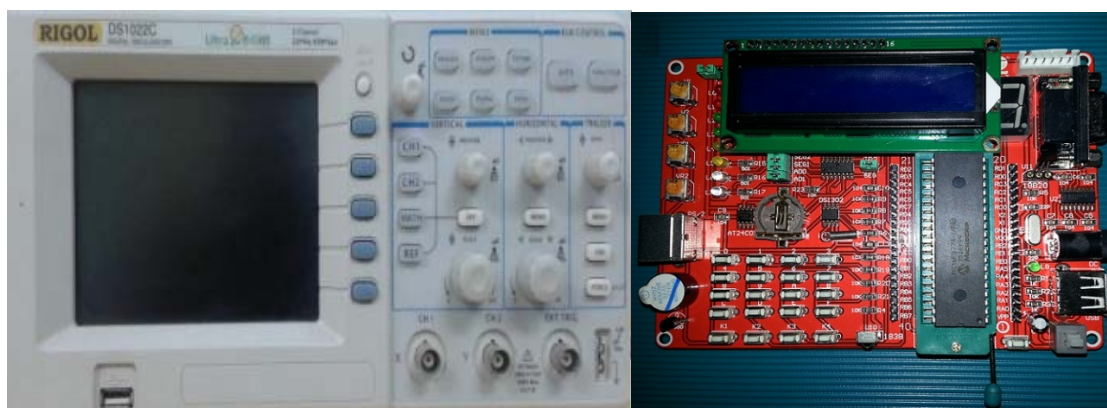
Figura 15. Señal de entrada y salida del circuito de fuerza de la aplicación para una velocidad de 75 RPM.





## RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Las mediciones obtenidas del montaje experimental con motor a escala en el laboratorio (figura 19), fueron realizadas utilizando un osciloscopio digital de la marca RIGOL modelo DS1022C de 2 canales de 25 MHz, además fue utilizada una tarjeta de entrenamiento para microcontroladores PIC modelo HJ-5G V2.0 contando esta con un módulo LCD 16x2 ,40 pines entrada salida, un puerto USB y de un teclado matricial 4x4. Para el ajuste del control de velocidad se utilizó un pequeño motor (dc). La figura 17 muestra la imagen de los instrumentos utilizados.



En las figuras 18 a) y 18 b) se muestra la variación del ancho de pulso en la señal PWM medida por el osciloscopio. La forma de onda 1 corresponde a la



señal PWM enviada desde el microcontrolador hacia el optoacoplador, mientras que la forma de onda 2 es tomada a la salida del IGBT para una velocidad de 75 rpm y 1500 rpm respectivamente, si se compara con los resultados obtenidos de la simulación figuras 15 y 16 del se observa que guardan semejanza con la realidad.



a) Velocidad 75 rpm.

b) Velocidad 1500 rpm.

Figura 18. Señal PWM.

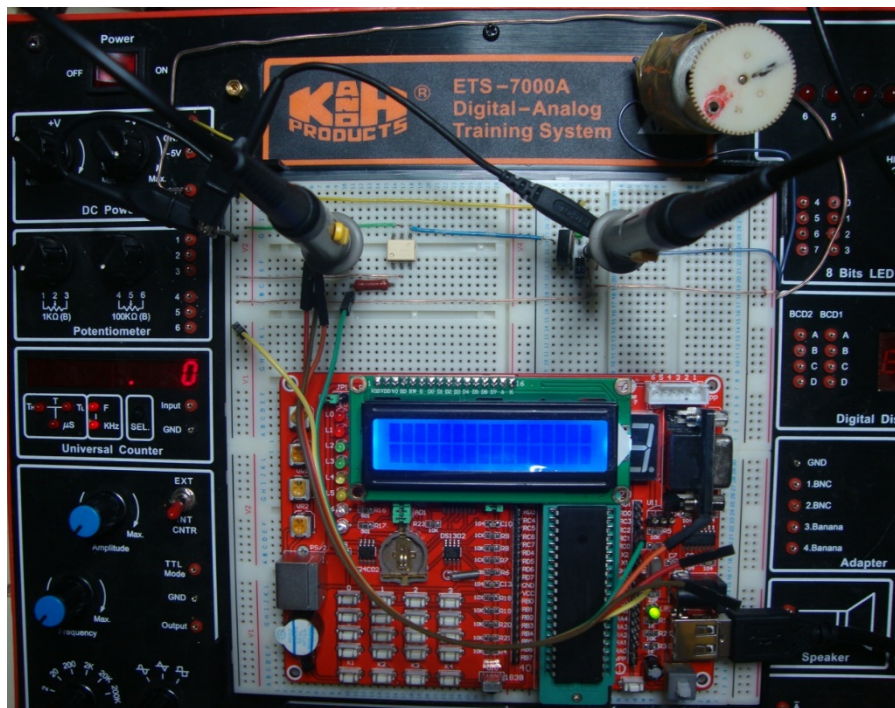


Figura 19. Montaje experimental.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

- Se diseñó el circuito de control para variar la velocidad del motor dc de la pulidora metalográfica.
- Se analizaron los resultados obtenidos después del montaje, observando que realmente se asemejan con los de la simulación.
- Se realizó el montaje experimental con un motor a escala del diseño propuesto.
- Se le agregaron tres velocidades más dentro del rango de trabajo de la pulidora permitiendo el pulido metalográfico de otros materiales, como los aceros al carbono.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blake, C. and C. Bull (2001). "IGBT or MOSFET: choose wisely." International Rectifier.
- Breijo, E. G. (2012). Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC, Marcombo.
- Chapman, S. (2005). Electric machinery fundamentals, Tata McGraw-Hill Education.
- Chien, Y.-P. S., W. D. Connor and C. D. Jeffares (1998). Microcontroller development tool using software programs, Google Patents.
- Fitzgerald, A. E. (2004). "Máquinas Eléctricas."
- Guadalupe (2006). "Control de velocidad en motores de corriente directa con proposito de bombeo en sistemas hidráulicos."
- Guru, B. S., H. R. Hiziroglu and B. J. E. (2003). "Máquinas eléctricas y transformadores." Oxford University Press.
- Herman, S. (2014). Electric Motor Control, Cengage Learning.
- Microchip (2009). PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet.
- Osorio, J. A. C., J. A. M. Vargas and J. A. M. Escobar (2009). "Criterios de selección de las herramientas de desarrollo para microcontroladores pic." Scientia et technica **3**(43).
- Rashid, M. H. (2004). Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones, Pearson Educación.