OPERACIÓN DE MOTORES DE IMANES PERMANENTES DE CORRIENTE DIRECTA MEDIANTE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

Victor Alexis Hernandez Castellanos [1]
Rogelio Ernesto García Chávez [2]
Jessica Marcelino Lopez [3]
Daniel Maldonado Alcala [1]
Ramón Silva Ortigoza [4]
Magdalena Marciano Melchor [4]

[1] Instituto Politécnico Nacional, UPIITA
Ciudad de México, 07340, Mexico
[2] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
PSEI-Cómputo Aplicado,
Estado de México, 56264, Mexico
[3] Instituto Politécnico Nacional, ESCOM
Ciudad de México, 07320, Mexico
[4] Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC
Laboratorio de Mecatrónica y Energía Renovable
Ciudad de México, 07700, Mexico

vhernandezc2200@alumno.ipn.mx
garcia.rogelio@colpos.mx
jmarcelinol2000@alumno.ipn.mx
dmaldonadoa1900@alumno.ipn.mx
rsilvao@ipn.mx
mmarciano@ipn.mx

Resumen

El control de velocidad para motores de corriente directa (CD) es la base para el desarrollo e implementación de muchos dispositivos, equipos y/o máquinas eléctricas diseñadas con tecnología moderna, desde áreas como ciencias de la salud hasta robótica y automatización industrial. Desde un principio, se han desarrollo e implementado métodos analógicos para controlar este parámetro, siendo algunos de ellos a través de potenciómetros o reóstatos variando la resistencia del circuito o el uso de transistores MOSFET operando en su región lineal. Desafortunadamente, estas técnicas presentan varias fallas y son ineficientes, provocan excesivas disipaciones de calor, picos elevados de corriente e inestabilidad en el torque del motor. Como solución a todos estos problemas, se desarrolló la PWM (Modulación por Ancho de Pulso) destacando por su eficiencia y ajuste preciso de velocidad, operando como un interruptor ultra-veloz que se enciende y apaga miles de veces por segundo, entregando cierta cantidad de energía a través de pulsos controlados. Este articulo presenta un breve análisis comparativo entre estas tres técnicas, principalmente la PWM como su principio de funcionamiento, parámetros de operación y puntos a considerar en su diseño.

1. Introducción

El avance tecnológico en la electrónica de potencia ha revolucionado la forma en que interactuamos con los dispositivos mecánicos, combinando las ventajas de los sistemas analógicos y digitales. Actualmente, se busca que el desarrollo de los circuitos eléctricos y/o electrónicos contemple la eficiencia de trabajo aprovechando al máximo su energía, la gestión de calor y el espacio que requiere para operar.

Con el objetivo de integrar estas características en una operación vía PWM que controle la velocidad de un motor DC, este articulo aborda el control de este tipo de motores desde la eficiencia y la optimización energética, desarrollando un circuito simple, pero eficiente que permita controlar esta variable crucial en sistemas más complejos.

2. PWM (Modulación por Ancho de Pulso)

PWM (Modulación por Ancho de Pulso) es la forma más eficiente e inteligente de controlar señales digitales, en donde se busca limitar la cantidad de energía suministrada a una carga eléctrica hasta un valor deseado. La señal PWM se representa como una onda de tipo cuadrada relacionando el tiempo con el estado de la señal, ya sea en alto (encendido) o en bajo (apagado), donde se ajusta el primero de estos y así entregar una determinada cantidad de energía a la carga. Esta relación se conoce como **ciclo de trabajo (duty cycle)** y expresa en porcentaje (%).

Por lo tanto, los dos factores que definen el comportamiento de la señal PWM son:

- **Ciclo de Trabajo (Duty Cycle):** Es el porcentaje del periodo en el que la señal está en estado alto a lo largo del tiempo. Por ejemplo, un ciclo de trabajo del 30 % significa que la señal está en alto el 30 % del tiempo y en bajo el otro 70 %.
- **Frecuencia:** Es la velocidad a la que se repiten los ciclos de encendido y apagado. La frecuencia debe establecerse en un rango determinado, ya que de esto depende la eficiencia del control.

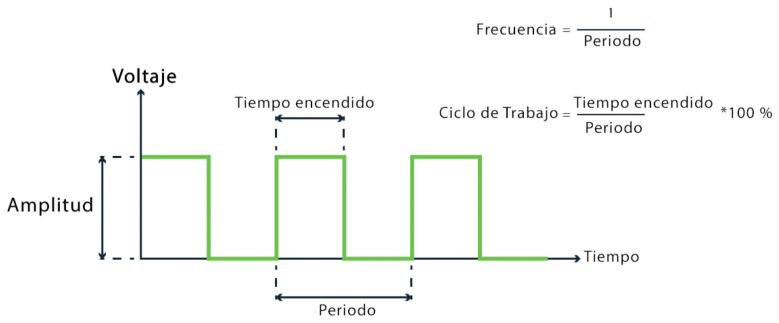


Figura 1: Características de una señal PWM.

En este ámbito, la PWM es una técnica poderosa y versátil, ofreciendo ciertas ventajas:

- **Alta eficiencia:** El cambio instantáneo entre los ciclos encendido y apagado reduce la perdidas de energía, demostrando la eficiencia de esta técnica.
- **Ajuste preciso:** Permite determinar de forma más certera la cantidad de energía que se le entrega al motor.
- **Simplicidad en la implementación:** Su implementación física es bastante sencilla, y se puede acoplar en conjunto con microcontroladores y otros dispositivos digitales.

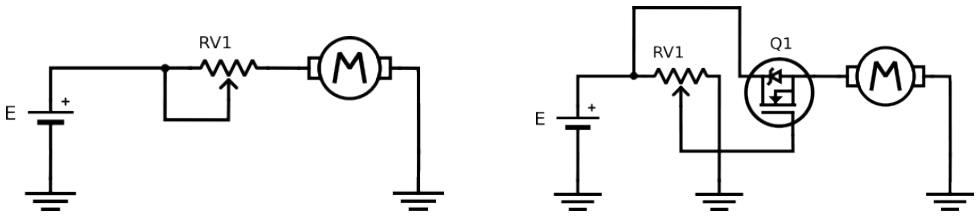
El parámetro crucial a considerar al usar esta técnica es la **frecuencia**, ya que la relación entre esta y las RPM no es directa, cada una se ajusta de forma independiente. Al aumentar la frecuencia PWM causa que las RPM del motor aumenten inicialmente, luego decaigan a frecuencias más altas.

De igual forma, se pueden usar otros métodos analógicos para regular la velocidad; de los primeros, se tiene el uso de un **potenciómetro** que puede variar la cantidad de voltaje que se le entrega el motor. Desafortunadamente, al estar en operación el motor consume grandes cantidades de corriente, lo que provoca una excesiva disipación de energía a través de calor, resultando en un método ineficiente. Ahora, si se añade un elemento de control como un **mosfet** canal N al circuito, las condiciones son más favorables, ya que nos otorga un control en la corriente que se consume gracias a su ganancia,

Cuadro 1: Comportamiento del motor a diferentes rangos de frecuencia.

Rango de Frecuencia	Comportamiento	Problema Típico
$<$500 Hz	Movimiento irregular, zumbido audible	El motor responde mecánicamente a cada cambio de ciclo.
500 Hz - 4 kHz	Respuesta lineal	La corriente alcanza un estado estable por cada ciclo.
4 kHz - 20 kHz	Torque en disminución	La frecuencia es muy alta y el motor se le dificulta detectar los cambios de ciclo.
$>$20 kHz	Pérdida drástica de rendimiento	Casi no percibe los cambios de ciclo.

lo que nos permite tener hasta 100 veces menor corriente que la exigida por el motor. Sin embargo, al minimizar algunos problemas, otros nuevos surgen; el comportamiento lineal que mantiene la corriente vuelve ineficiente el control de velocidad, produciendo torques que varían con la corriente. A velocidades bajas, la corriente es pequeña, por lo que el motor pierde fuerza y resulta complicado que se genere un primer movimiento.



(a) Implementación con un potenciometro.

(b) Implementación en conjunto con un Mosfet

Figura 2: Circuitos alternativos para el control de velocidad.

De lo anterior se demuestra, que la PWM es la técnica más eficiente para implementar en el control de velocidad de un motor DC, cumpliendo con las características de un ajuste preciso, alta eficiencia y simplicidad en su diseño.

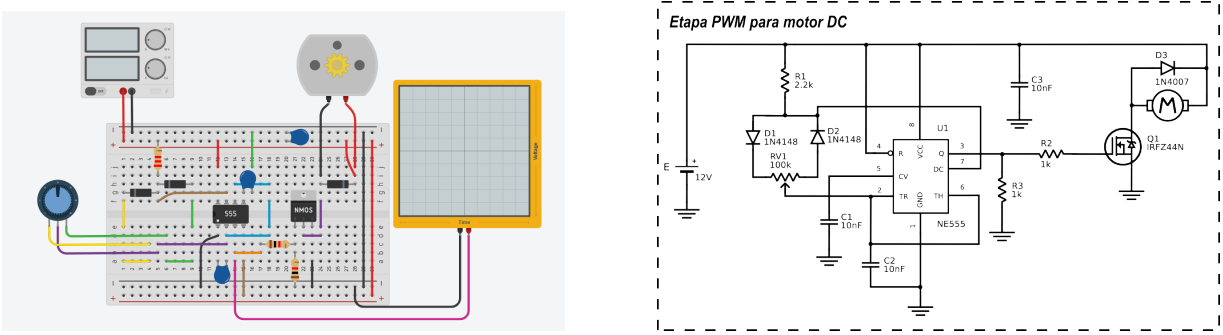
3. Desarrollo de la operación vía PWM con un temporizador 555

Para la implementación de este control, se brindaran las siguientes instrucciones y diagramas, por lo que se requieren de los siguientes materiales:

- Circuito integrado NE555 (o temporizador 555).
- Mosfet IRFZ44N.
- Motor DC +12V.
- 1 resistor de 2.2k ohms.
- 2 resistores de 1k ohm.
- 1 potenciómetro de 100k ohms.
- 1 capacitor de 1nF.
- 3 capactiores de 10nF.
- 1 capacitor de 100nF.
- 2 diodos 1N4148.
- 1 diodo 1N4007.
- 2 borneras de 2 terminales.
- Placa de pruebas (Protoboard).
- 1 metro de alambre para protoboard.

En físico, el único parámetro que se podra variar es el ciclo de trabajo a través del potenciómetro.

Las conexiones físicas se realizan de la siguiente manera:



(a) Conexiones fisicas de la operación vía PWM.

(b) Esquematico de la etapa vía PWM.

Figura 3: Construcción de la etapa PWM para motor DC.

En este sentido, para conocer de forma aproximada el valor de los parametros que rigen la señal PWM, se tomarán de apoyo las siguientes ecuaciones:

Tiempo de carga:

$$t_{alto} = In(2) \cdot C_1 \cdot (R_1 + RV1(ent)) \tag{1}$$

Tiempo de descarga:

$$t_{bajo} = In(2) \cdot C_1 \cdot RV1(sal)) \tag{2}$$

Periodo:

$$T = t_{alto} + t_{bajo} \tag{3}$$

Frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{alto} + t_{bajo}} \tag{4}$$

Ciclo de trabajo:

$$CT = \frac{t_{alto}}{t_{alto} + t_{bajo}} \tag{5}$$

Se continua con el armado del físico del circuito.

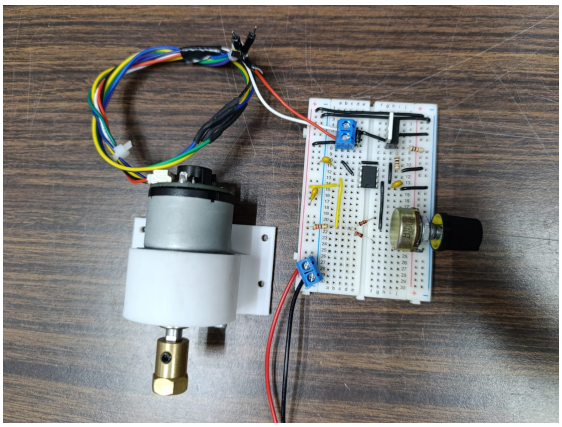


Figura 4: Armado físico de la etapa vía PWM para motor DC.

Para la visualización de la señal PWM entregada al motor, se utilizó un osciloscopio colocando sus puntos a la salida del temporizador 555.

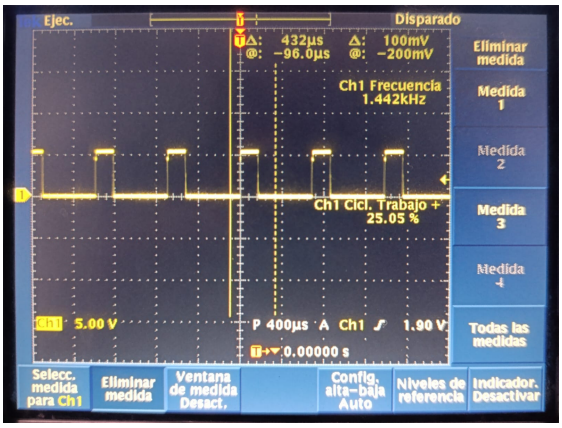


Figura 5: Ciclo de trabajo del 25 %.

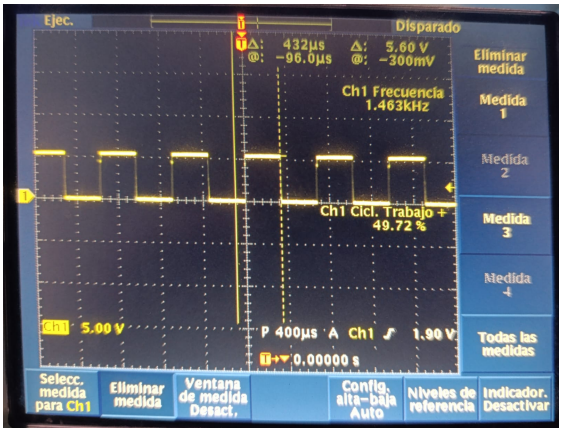


Figura 6: Ciclo de trabajo del 50 %.

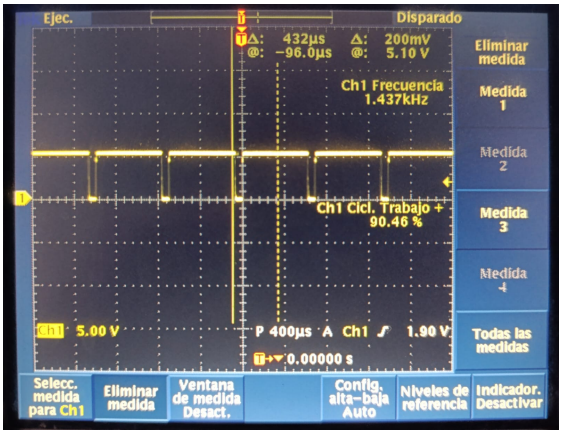


Figura 7: Ciclo de trabajo del 90 %.

4. Conclusión

Al analizar cada técnica presentada, se demuestra que la PWM es la más eficiente y viable en el control de la velocidad, ya que a diferencia de los otros métodos lineales basados en potenciómetros o

transistores Mosfet, el PWM cambia de ciclos de estado alto a bajo para transferir la potencia requerida evitando pérdidas de energía, únicamente considerando los rangos estables de frecuencia para su operación. Para complementar se realizó la implementación de un circuito físico para la construcción de la etapa PWM.

Referencias

[1] Tecneu, “Principios de la Modulación por Ancho de Pulso (PWM),” Tecneu, Jul. 03, 2024. https://www.tecneu.com/blogs/noticias/principios-de-la-modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm?srsltid=AfmBOooYvdRezbg1kcC19e-LK_j2ZeBDeiXyNZWoNrNQlQfXH2xKf9iV

[2] T. Garrett, “Frecuencia PWM vs Velocidad del Motor CC: Por Qué la Frecuencia Afecta las RPM,” Industrial Monitor Direct, Apr. 20, 2026. https://industrialmonitordirect.com/es/blogs/know ledgebase/pwm-frequency-vs-dc-motor-speed-why-frequency-affects-rpm?srsltid=AfmBOorQbP1BUvCqqVGPzOIzUx kK89IoqnvGNkFpdZNvroxe2DKQBEa

[3] N. C. Braga, “Control de Velocidad para Motores CC”, INCB. https://www.incb.com.mx/articulos/9-articulos-tecnicos-y-proyectos/823-control-de-velocidad-para-motores-cc-art139s