



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL PARA VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

PRESENTAN

REYNA LETICIA GONZÁLEZ RAMÍREZ
JOEL SÁNCHEZ MARTÍNEZ

ASESORES: DR. ROBERTO BACA ARROYO

M. EN C. JORGE SANDOVAL LEZAMA



México, D.F

El presente trabajo de tesis ha sido posible gracias a:

DIOS

Por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr otra meta más en mi carrera.

MIS PADRES

Bernardo y Crispina, porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de la vida, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mí se depositó y con los cuáles he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecida.

Por brindarme un hogar cálido y enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos.

A MIS HERMANOS

Patricia y Ricardo, a quienes les debo muchas cosas, quienes han vivido de cerca los distintos procesos de mi vida tanto en los momentos felices y tristes que todo ser humano experimenta en el camino a seguir como un destino.

A MI ESPOSO

Por su apoyo, comprensión y amor que me permite sentir que puedo lograr todo lo que me proponga. Gracias por escucharme, por tus consejos y por ser parte de mi vida.

DIRECTORES DE TESIS

Dr. Roberto Baca Arroyo y M. en C. Jorge Sandoval Lezama, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Reyna Leticia González Ramírez.

A Dios quien me ha dejado alcanzar tantas metas
quien me concedió el mejor regalo en la vida; mi familia.

A mis padres Jorge y Reyna;
gracias por sus desvelos, sacrificios y amor infinito,
no bastaría una vida para compensar lo que han dado
para formar al hombre que soy, dios los bendiga siempre.

A mis hermanos Armando y Fabian,
por brindarme su apoyo incondicional a cada momento
por confiar en mí y alentarme a seguir adelante siempre.

A mi esposa,
por acompañar mí camino desde hace tiempo,
por apoyarme, comprenderme y por su infinito amor,
por juntos alcanzar otro objetivo más en nuestras vidas.

Al Dr. Roberto Baca Arroyo y
al M en C. Jorge Sandoval Lezama
por su gran apoyo y por su experiencia
que nos permitieron cerrar este ciclo académico

Joel Sánchez Martínez.

INDICE

I. MARCO TEÓRICO

1.1 Medidas de seguridad	3
1.2 Control de velocidad de motores de CD	5
1.3 Técnica de modulación por ancho de pulso (PWM)	7
1.4 Transistores de potencia	8
1.4.1 Transistor bipolar BJT	9
1.4.2 Transistor MOSFET	10
1.4.3 Transistor IGBT	11

II. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

2.1 Generalidades	14
2.2 Sistemas de almacenamiento	15
2.3 Tipos de baterías	16

III. SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

3.1 Semiconductores de dos y tres terminales	22
3.1.1 Diodo	22
3.1.2 Transistor de Juntura Bipolar (BJT)	23
3.1.3 Transistores MOS	24
3.1.4 Transistor Bipolar de Compuerta Aislada (IGBT)	27
3.2 Respuesta transitoria de un circuito RL	30
3.3 Interruptor Electrónico con Carga Inductiva	32

IV. FUNDAMENTOS DE CONTROL BÁSICO

4.1 Sistemas de control	35
4.2 Comparador de voltaje	39
4.3 Configuración interna del temporizador LM555	40
4.4 Generador de onda PWM de bajo costo	44

V. MOTORES ELÉCTRICOS

5.1 Motores Eléctricos	49
5.1.1 Principios de funcionamiento	50
5.2 Motores de CD	52
5.2.1 Partes que integran un motor de CD	53
5.2.2 Funcionamiento de los motores de corriente continua.	55
5.3 Protección de los motores eléctricos	58

VI. DISEÑO Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL

6.1 Mediciones prácticas	62
6.2 Controlador para MOSFET/IGBT con la técnica de empuje de corriente	63
6.3 Interfases electrónicas	66
6.4 Mediciones de laboratorio	70
6.5 Trabajo futuro	75
CONCLUSIONES	76
ANEXOS	
Apéndice de figuras y tablas	77
Estructura mecánica del vehículo eléctrico	82
Bibliografía	88

OBJETIVO GENERAL.

Diseño, implementación y validación del sistema electrónico de control para vehículos eléctricos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar e implementar el circuito generador de señales PWM para el control de velocidad del vehículo/kart eléctrico mediante un circuito con temporizadores LM555.
- Implementar la etapa de potencia para el control del motor de CD.
- Acoplar la etapa de control con la de potencia, para obtener el control de velocidad de un motor eléctrico de CD.

JUSTIFICACIÓN

Este trabajo está derivado del proyecto de investigación SIP IPN 2012 con registro 20121476 el cual tiene por nombre “Desarrollo de Hardware y Software para la **ESIME TICOMÁN**”.

A través de los años, la necesidad del ser humano de trasladarse ha sido cada vez mayor, desde la aparición del motor de combustión interna el uso de combustibles fósiles ha ido en aumento, el uso excesivo de estos combustibles ha generado grandes problemas de contaminación.

El uso de medios de transporte sustentables es cada vez más notorio por lo que en la actualidad se han desarrollado vehículos a base de celdas solares, bio-combustibles y se ha dado mayor importancia a los vehículos eléctricos, en términos de motores más eficientes y controladores inteligentes, todo lo anterior con base a la electrónica de potencia y la electrónica de control aunado a la nueva tecnología de las baterías, como las de Ion-litio.

El desarrollo de controles eficientes y de bajo costo para este tipo de vehículos es indispensable ya que son totalmente distintos a los controles de velocidad de los vehículos de combustión interna.

Durante el desarrollo de este trabajo de titulación se diseñará, implementará y validará un circuito de control de velocidad para un vehículo/kart eléctrico.

El resultado de este trabajo ayudará a la reafirmación de conocimiento de los alumnos de la carrera de Ingeniería Automotriz e Ingeniería Aeronáutica de la **ESIME TICOMÁN**, ya que podrán hacer uso de la información y diagramas eléctricos que puedan ayudar al desarrollo de sus propios sistemas de control de velocidad en base a las necesidades particulares de cada una de las carreras.

Actualizar la currícula de las carreras de Ingeniería Automotriz y de Ingeniería Aeronáutica con temas/conceptos tales como: Interfaces Electrónicas de Control y de Potencia.

ALCANCE

En este proyecto se busca implementar y validar tarjetas de interface electrónicas del vehículo/kart eléctrico para que sirva como material didáctico y como prototipo de investigación en asignaturas tales como Electrónica 1, Electricidad y Electrónica Automotriz de la carrera de Ingeniería Automotriz; Sistemas Electrónicos Digitales y Sistemas de Control en Aeronaves de Ingeniería Aeronáutica de la **ESIME TICOMÁN**.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 MEDIDAS DE SEGURIDAD.

Al trabajar con corriente eléctrica, se deben tomar en cuenta diversas medidas de seguridad, algunas de ellas se mencionan a continuación.

La electricidad es una parte tan común de nuestras vidas que es fácil olvidar los peligros asociados con su uso. La falta de respeto hacia esos peligros trae como resultado un número elevado de muertes por descarga eléctrica en el trabajo y en el hogar. Los choques eléctricos lo suficientemente fuertes como para matar a una persona ocurren cuando la corriente de la electricidad viaja a través del cuerpo, especialmente cerca del corazón.

Este subtema, es de vital importancia para el Proyecto 20121476, ya que se trabaja con baterías 24/36 Volts de CD y corrientes en el vehículo de hasta 150 Amper.

El choque eléctrico también puede causar: Dolor intenso; daño a los nervios, músculos o tejidos; sangrado interno; pérdida de la coordinación y control muscular e inclusive paro cardiaco

La electricidad siempre fluye a través del camino que ofrezca la menor resistencia. El cuerpo humano presenta poca resistencia a las corrientes eléctricas debido a su alto contenido de agua y electrolitos. Las siguientes condiciones aprovechan de las propiedades de conducción del cuerpo humano y pueden causar electrocución:

- El contacto con cables o alambres que no estén debidamente aislados
- El contacto directo con conductores eléctricos tales como cables eléctricos
- Tocar un equipo cargado con electricidad con las manos mojadas o mientras está parado en agua.

El flujo de la corriente eléctrica corriendo a través del cuerpo puede causar quemaduras graves internas y externas. Más aún, las severas quemaduras externas frecuentemente son el resultado del contacto directo con equipo caliente causado por una corriente eléctrica.

Los circuitos o equipos sobrecargados pueden causar incendios o explosiones, especialmente si ocurren en áreas donde se almacenan sustancias explosivas o inflamables.

Los choques eléctricos pueden evitarse siguiendo los procedimientos de seguridad que se mencionan posteriormente.

Los Reglamentos Generales de la Industria, Código de Reglamentos Federales (CFR) 29 CFR 1910.301-399, contienen disposiciones sobre el diseño de instalaciones eléctricas. Las Normas sobre las Prácticas en el Trabajo para la Seguridad al Manejar Electricidad (Electrical Safety-Related Work Practices Standards) (29 CFR 1910.331-360) limitan ciertas tareas a empleados “calificados”.

El término calificado se define como “Aquellas personas que han sido entrenadas para evitar los peligros eléctricos al trabajar en o cerca de partes energizadas expuestas.” Los empleados calificados deben ser capaces de distinguir partes eléctricas energizadas expuestas y su voltaje nominal así como las distancias requeridas y los voltajes correspondientes a los que serán expuestos.

Se requiere a los trabajadores no calificados expuestos a cables eléctricos elevados que mantengan una distancia mínima de 3 metros aproximadamente respecto de cualquier equipo que no esté debidamente protegido. Los vehículos y el equipo mecánico deben también mantener esta distancia.

Para crear un ambiente de trabajo seguro se requieren prácticas de seguridad en el trabajo y la identificación de peligros comunes.

Los siguientes procedimientos brindan una forma efectiva de reducir accidentes relacionados con la electricidad:

- Use procedimientos de cierre/etiquetado antes de comenzar a trabajar en circuitos y equipos eléctricos;
- Evite trabajar cerca de fuentes eléctricas cuando usted, sus alrededores, sus herramientas o su ropa estén mojadas;
- Tenga una toalla o un trapo a la mano para secarse las manos;
- Suspnda cualquier trabajo de electricidad al aire libre cuando comience a llover
- Ventile el área de trabajo para reducir peligros atmosféricos como polvo, vapores inflamables o exceso de oxígeno
- Mantenga un ambiente limpio y ordenado, libre de peligros
- Disponga ordenadamente las herramientas y equipos, colocando todo en su debido lugar después de cada uso
- Mantenga el área de trabajo libre de trapos, basura y otros escombros o desechos
- Limpie puntualmente los líquidos que se hayan derramado y mantenga los pisos completamente secos
- Use cables que son a prueba de agua al aire libre
- Asegúrese de que las tres patillas del enchufe estén intactas en todos los cables de extensión
- Proteja todos los cables eléctricos cuando los utilice en o alrededor de los pasillos
- Evite usar cables eléctricos cerca de calor, agua y materiales inflamables o explosivos
- Nunca use un cable de extensión con el aislante dañado.

Vestimenta y Equipo de Protección Personal:

- Vista ropa cómoda y práctica para el trabajo.
- Use un buen par de zapatos de seguridad resistentes al aceite con suelas y tacones antiderrapante;
- No use ropa que le restrinja el movimiento
- Use ropa de algodón o ropa incombustible
- Evite la ropa suelta ya que puede enredarse en el equipo
- Quítese las corbatas, joyas, bufandas y relojes de pulsera
- Recoja el cabello largo con gorros o redes
- use cascos protectores clase B cuando trabaje cerca de cables eléctricos elevados
- Evite los cinturones con hebillas grandes de metal
- Cuando use un cinturón para cargar herramientas no deje que las herramientas cuelguen fuera de los sujetadores o que cuelguen fuera del cinturón; y quítese el cinturón de cargar herramientas antes de comenzar a trabajar en lugares pequeños.

Se recomienda el siguiente equipo de protección personal (PPE, por sus siglas en inglés) para evitar que su cuerpo se convierta en un conductor de electricidad:

- Protección para la cabeza, ojos y cara no conductora de electricidad
- Ropa y guantes de goma
- Zapatos o botas con suela de goma.

Trabajar con sistemas eléctricos energizados puede presentar peligros para un trabajador que no esté capacitado o calificado.

Siguiendo los procedimientos indicados anteriormente, se pueden evitar muchos accidentes y lesiones. “SEGURIDAD ANTE TODO” [1]

1.2 CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE CD.

Los motores eléctricos proporcionan una de las fuentes principales de energía para impulsar las modernas máquinas herramientas u otro tipo de equipo industrial. El motor ha llegado a relacionarse tan íntimamente con la fuerza motriz de los elementos de las máquinas que en la mayoría de los casos, se incluye como parte integral del diseño de ella. Esta relación de motor y máquina a través de la propulsión directa ha enfocado la atención en el diseño, construcción, instalación y mantenimiento del equipo para controlar el motor.

Hay numerosas aplicaciones donde el control de velocidad es requerido, así como en los elevadores, máquinas de CD especiales, máquinas herramientas, sistemas de tránsito y locomotoras. Los motores de CD son muy utilizados en muchas de éstas aplicaciones. El control de velocidad de los motores CD por debajo y encima de la velocidad base puede ser fácilmente diseñada. Además, los métodos de control son simples y menos costosos que los controles de los motores de corriente alterna (CA.).

El término control del motor en la comunicación moderna, se refiere al control de la velocidad e inversión de la rotación, métodos de aceleración y desaceleración, y muchas otras funciones de los controladores del motor, que se agregan a los conceptos más antiguos del simplemente arranque y paro de motores.

El funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético del imán permanente y el generado por las bobinas, ya sea una atracción o una repulsión, hacen que el eje del motor comience su movimiento.

Un motor de corriente continua está compuesto de un estator y un rotor. En muchos motores de CD, generalmente los más pequeños, el estator está compuesto de imanes para crear un campo magnético. En motores de CD más grandes este campo magnético se logra con devanados de excitación de campo. El rotor es el dispositivo que gira en el centro del motor y está compuesto de arrollados de cable conductores de corriente continua. Esta corriente continua es suministrada al rotor por medio de las "escobillas" generalmente fabricadas de carbón.

Los motores de corriente continua permiten un amplio rango de velocidad y pueden proporcionar un alto par-motor con control más sencillo y económico que cualquier motor de corriente alterna. En la actualidad los métodos de control de velocidad se han ido desarrollando considerablemente y los más

comunes son el control de velocidad por corriente de campo y el control de velocidad variando el voltaje en la armadura, que son técnicas de control no lineal.

- Control por corriente de campo (I_f).- El modo de control por corriente de campo es usada para obtener una velocidad por encima de la velocidad base. En este modo, el voltaje de armadura V_t permanece constante y la corriente de campo del motor I_{fm} es disminuida para obtener altas velocidades. La corriente de armadura puede ser mantenida constante, consiguiendo operar el motor en un modo de potencia de salida constante. Obviamente el torque disminuye tanto como la velocidad se incrementa, como se observa en la Figura 1.
- Control por voltaje de armadura (V_t).- En el modo de control por voltaje de armadura, la corriente del motor I_{fm} es mantenida constante en su valor determinado. La corriente de campo del generador I_{fg} varía tanto como V_t cambia desde cero a su valor determinado. La velocidad cambiará desde cero a la velocidad base. El torque puede ser mantenido constante durante la operación en este rango de velocidad, así como se observa en la Figura 1.

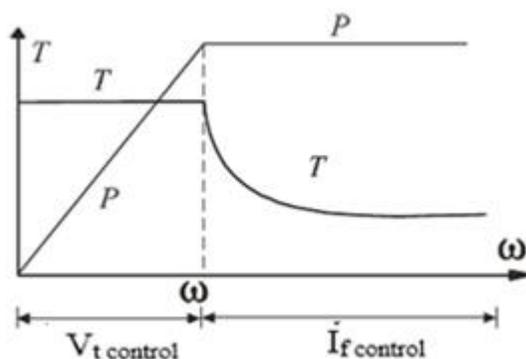


Figura 1.1 Torque que presenta el motor para cada uno de los controles mencionados (Control por corriente de campo o control por voltaje de armadura).

El control de motores de forma precisa, requiere de un circuito electrónico especializado que realiza la regulación de la velocidad mediante una técnica denominada PWM (Pulse Wide Modulation) y que consiste básicamente en variar la cantidad de tiempo que el motor recibe tensión. Si el motor recibe tensión de forma constante, este gira a su máxima velocidad y potencia. Con PWM lo que se hace es aplicar la máxima tensión., pero no todo el tiempo, si no a pulsos, con lo que se consigue regular la velocidad manteniendo la potencia del motor. Otro sistema de control consiste en regular la tensión que se aplica al motor de forma que cuanto menos tensión, menos velocidad. Variando la tensión a aplicada al motor en forma de pulsos, tenemos la posibilidad de controlar la velocidad sin perder la fuerza. Si la tensión fuera aplicada en "impulsos" de corta duración, pero con intervalos mayores, en total, la energía que llega al motor será pequeña. Cada impulso de corta duración lleva apenas un poco de energía. Sin embargo, cada impulso tiene la tensión total de alimentación, es decir, 5 o 12 volts. El resultado será una velocidad pequeña, pues la energía total será pequeña pero el torque será grande, ya que la tensión será la máxima. Si el intervalo entre los pulsos fuera disminuido, la energía total aplicada al motor será mayor y en consecuencia su velocidad también será mayor. Para tener todas las velocidades posibles, lo que precisamos es generar pulsos de todos los "anchos" posibles, lo que se consigue con un oscilador, y después amplificar estos pulsos para que pueda alimentar el motor.

La velocidad de un motor de C.C. depende, eléctricamente hablando, del valor de corriente promedio que atraviesa sus bobinados. De las distintas formas posibles de limitar la corriente promedio elegimos este método debido a dos parámetros fundamentales. El primero es la simplicidad de diseño, lo que asegura un funcionamiento inmediato y el segundo es que necesita poca disipación de potencia en el elemento regulador, lo que nos brinda un mayor rendimiento. El proceso consiste en entregar al motor pulsos cuadrados de C.C., con lo cual lo hacemos funcionar a un régimen determinado. Luego, para hacerle variar su régimen de trabajo, basta con modificarle el ancho de pulso entregado. A pulsos más anchos el motor trabajará a más RPM, y a pulsos más angostos el motor disminuirá su velocidad.

1.3 TÉCNICA DE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM).

Para el control de la velocidad de un motor de corriente directa se utiliza la modulación del ancho de pulso (PWM – Pulse Width Modulation) de una señal cuadrada. Esta técnica se utilizaba inicialmente, casi exclusivamente para el control de potencia y velocidad de motores de corriente continua, pero con el tiempo se ha ido ampliando el campo de aplicación, por ejemplo ha permitido construir dispositivos mucho más eficientes, más compactos y más ligeros. Muchas aplicaciones de PWM se encuentran actualmente en las fuentes de alimentación conmutadas, circuitos de control de potencia vía radio, etc.

La ventaja de utilizar el ancho de pulso como control de una variable, es que no se ve afectada por ruido eléctrico, inyectado a lo largo de la línea de transmisión, sin importar si la amplitud del pulso se ve reducida por el ruido externo o por la misma resistencia de la línea de transmisión; ya que el circuito no está observando la amplitud de la señal si no la frecuencia que ésta posee además del ancho de pulso T_{on} o T_{off} .

Para controlar la velocidad de un motor de CD se necesita un voltaje variable CD de la fuente de alimentación. Sin embargo si se usa un motor de 12 Volts y se conecta la alimentación, el motor empezará a aumentar su velocidad; los motores no responden inmediatamente, necesitan un pequeño intervalo de tiempo para alcanzar su velocidad máxima. Si se apaga la alimentación en algún momento antes que el motor alcance su máxima velocidad, se notará una disminución de ésta y si se enciende la alimentación y se apaga rápidamente, el motor tomará una velocidad comprendida entre velocidad cero y velocidad máxima. Esto es exactamente lo que hace un controlador PWM: alimentar el motor suministrándole una serie de pulsos. Para controlar la velocidad del motor se varía (modula) el ancho de los pulsos, y como el motor siempre se encuentra alimentado a su tensión nominal nunca se verá reducido su torque nominal [2].

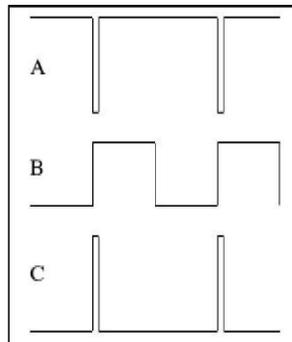


Figura 1.2 En la parte A de la figura se observa la velocidad máxima que se controla con PWM aproximadamente el 90% del tiempo encendido, en la parte B el 50% y en la parte C la velocidad mínima o el 10% del tiempo encendido.

La Regulación por Ancho de Pulso de un motor de CD está basada en el hecho de que si se recorta la alimentación de CD en forma de una onda cuadrada, la energía que recibe el motor disminuirá de manera proporcional a la relación entre la parte alta (habilita corriente) y baja (cero corriente) del ciclo de la onda cuadrada. Controlando esta relación se logra variar la velocidad del motor de una manera bastante aceptable.

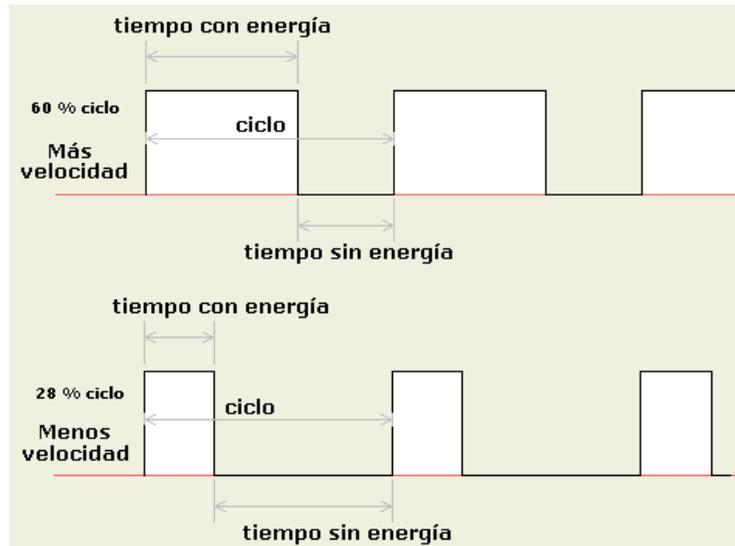


Figura 1.3 Regulación del ancho de pulso para control de velocidad en motores de CD.

1.4 TRANSISTORES DE POTENCIA.

El funcionamiento y utilización de los transistores de potencia es idéntico al de los transistores normales, teniendo como características especiales el alto voltaje y la intensidad de corriente que tienen que soportar y por tanto, las altas potencias a disipar.

Existen básicamente tres tipos de transistores de potencia:

- Bipolar
- Unipolar o FET (Transistor de Efecto de Campo)
- IGBT (Transistor Bipolar de Compuerta Aislada)

El IGBT ofrece a los usuarios las ventajas de entrada de componentes MOS (Semiconductor Metal-óxido), más la capacidad de carga en corriente de los transistores bipolares: Trabaja con tensión, tiempos de conmutación bajos (alta frecuencia de funcionamiento), margen de potencia en conducción mucho mayor (como los bipolares).

Es importante que siempre que trabajamos con dispositivos semiconductores de potencia el transistor sea lo más parecido a un elemento ideal, es decir, que presente pequeñas fugas, alta potencia, bajos tiempos de respuesta (t_{on} , t_{off}) para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento, que el efecto avalancha se produzca a un valor elevado, que no se produzcan “puntos calientes” (grandes di/dt).

Una limitación importante de todos los dispositivos de potencia y concretamente de los transistores bipolares, es que el paso del estado de bloqueo al de conducción y viceversa no se hace instantáneamente, sino que hay siempre un retardo (ton, toff). Las causas fundamentales de estos retardos son las capacidades asociadas a las uniones colector-base y base-emisor y los tiempos de difusión y recombinación de portadores.

La diferencia más notable entre un transistor bipolar y un transistor unipolar o FET es el modo de actuación sobre la terminal de control. En el transistor bipolar hay que inyectar una corriente de base para regular la corriente de colector, mientras que en el FET el control se hace mediante la aplicación de una tensión entre compuerta y fuente. Esta diferencia viene determinada por la estructura interna de ambos dispositivos, que son sustancialmente distintas. Es una característica común, sin embargo, el hecho de que la potencia que consume la terminal de control (base o compuerta) es siempre más pequeña que la potencia manejada en las otras dos terminales.

Se destacan tres cosas fundamentales:

- 1) En un transistor bipolar, I_B controla la magnitud de I_C
- 2) En un FET, la tensión V_{GS} controla la corriente I_D
- 3) En ambos casos, con una potencia pequeña puede controlarse otra bastante mayor.

1.4.1 TRANSISTOR BIPOLAR (BJT).

Es de destacar que el interés actual del BJT es muy limitado, ya que existen dispositivos de potencia con características muy superiores. Sin embargo, es necesario comprender sus limitaciones para poder comprender el funcionamiento y limitaciones de otros dispositivos de gran importancia en la actualidad dentro del campo de la electrónica de potencia.

Existen cuatro condiciones de polarización posibles. Dependiendo del sentido o signo de los voltajes de polarización en cada una de las uniones del transistor pueden ser:

- a) Región activa directa: Corresponde a una polarización directa de la unión emisor-base y a una polarización inversa de la unión colector-base. Esta es la **región de operación normal del transistor para amplificación**.
- b) Región activa inversa: Corresponde a una polarización inversa de la unión emisor-base y a una polarización directa de la unión colector-base. Esta región es usada raramente.
- c) Región de corte: Corresponde a una polarización inversa de ambas uniones. La operación en esta región corresponde a aplicaciones de conmutación en el modo apagado, pues el transistor actúa como un interruptor abierto ($I_C=0$).
- d) Región de saturación: Corresponde a una polarización directa de ambas uniones. La operación en esta región corresponde a aplicaciones de conmutación en el modo encendido, pues el transistor actúa como un interruptor cerrado ($V_{CE}=0$).

Las principales características que se deben considerar en los transistores bipolares de potencia son:

- I_{Cmax} : Intensidad máxima de colector
- V_{CEO} : Tensión de ruptura de colector-emisor
- P_{max} : Potencia máxima disipable en régimen continuo

Los transistores utilizados en circuitos de potencia, trabajan generalmente en corte y saturación (régimen de conmutación), resulta de interés la caída de tensión colector-emisor en saturación V_{CEsat} y los tiempos de saturación y corte para aplicaciones de alta frecuencia.

Las cargas inductivas someten a los transistores a las condiciones de trabajo más desfavorables dentro de la zona activa, en el sentido de que se oponen a las variaciones de corriente que imponen los transistores al conmutar de saturación a corte y viceversa.

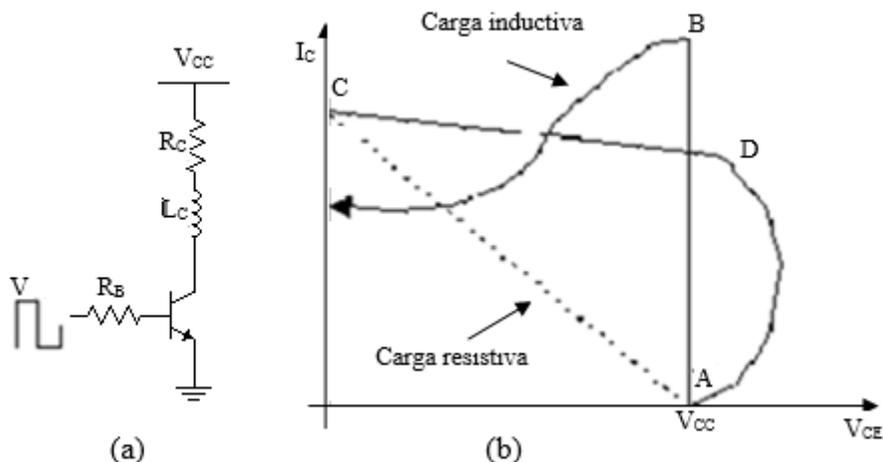


Figura 1.4 a) Circuito con carga inductiva, b) Característica de transferencia para el transistor en conmutación con carga inductiva

En la figura 4 se han representado los diferentes puntos idealizados de funcionamiento del transistor en corte y saturación. Para una carga resistiva, el transistor pasará de corte a saturación por la recta que va desde A hasta C, y de saturación a corte desde el punto C al punto A. Sin embargo, con una carga inductiva como se muestra el circuito en la figura 4 de lado izquierdo, el transistor pasa a saturación recorriendo la curva ABC, mientras que el paso a corte lo hace por el tramo CDA. Puede verse que este último paso lo hace después de una profunda incursión en la zona activa que podría fácilmente sobrepasar el límite de avalancha secundaria con valor V_{CE} muy superior al valor de la fuente (V_{CC}). [3]

1.4.2 TRANSISTOR MOSFET.

MOSFET, está dado por las iniciales de los elementos que componen al transistor; una fina película metálica (Metal- M); óxido de silicio (Óxido - O); región semiconductor (Semiconductor-S).

Las aplicaciones más típicas de los transistores de potencia MOSFET se encuentran en la conmutación a altas frecuencias, sistemas inversores para controlar motores, generadores de altas frecuencias para inducción de calor, generadores de ultrasonido, amplificadores de audio y transmisores de radiofrecuencia.

La principal diferencia entre los transistores bipolares (BJT) y los MOSFET consiste en que estos últimos son controlados por voltaje aplicado en la compuerta (G) y requieren solo una pequeña corriente de entrada, mientras que los transistores bipolares (BJT), son controlados por corriente aplicada a la base.

Existen dos tipos de transistores MOSFET:

- 1) Mosfet de empobrecimiento: Existe un canal por el cual circula la corriente aunque no se aplique voltaje en la compuerta.
- 2) Mosfet de enriquecimiento: El canal por el cual circula la corriente se crea cuando se aplica un voltaje en la compuerta. A su vez, dentro de los transistores Mosfet de enriquecimiento podemos distinguir dos tipos: de canal n o canal p, dependiendo del tipo de sustrato utilizado y del tipo de portadores mayoritarios por el canal.

Las ventajas de los Mosfet con respecto a los BJT son:

- La velocidad de conmutación para los Mosfet está en el orden de los nanosegundos, por esto los Mosfet son muy utilizados en convertidores de pequeña potencia y alta frecuencia.
- Mayor área de funcionamiento.
- Mayores ganancias.
- Circuito de control más simple
- Alta impedancia de entrada

Los inconvenientes que presentan estos transistores son:

- Son muy sensibles a las descargas electrostáticas y requieren un embalaje especial.
- Es relativamente difícil su protección
- Son más costosos que los transistores bipolares.
- La resistencia estática entre drenador-fuente, es más grande, lo que provoca mayores pérdidas de potencia cuando trabaja en conmutación.

Los Mosfet se dividen en 3 regiones de trabajo:

- 1) Región de corte: En esta región la corriente que circula por el drenador es prácticamente nula.
 $V_{DS} > 0$
 $i_D \approx 0$
- 2) Región activa (saturación de canal): Se utiliza el transistor como amplificador. El valor del voltaje entre compuerta y fuente, controla la magnitud de la corriente del drenador (i_d), como la tensión entre el drenador y la fuente (V_{ds}).
 $i_G \approx 0 \longrightarrow i_D \approx i_S$
- 3) Región óhmica.

1.4.3 TRANSISTOR IGBT.

El IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) combina las ventajas de los BJT y los Mosfet. Tiene una impedancia de entrada elevada como los Mosfet y bajas pérdidas en conmutación como los BJT; puede trabajar con frecuencias altas y corrientes grandes.

Los IGBT han demostrado tener una resistencia en conducción muy baja y una elevada velocidad de conmutación (la transición desde el estado de conducción al de bloqueo se puede considerar de unos dos microsegundos, y la frecuencia puede estar en el rango de los 50 KHz), además de una elevada

tensión de ruptura. Los IGBT se fabrican desde una tensión de 600 V y una corriente de 50 A, a una tensión de 1400 V y una corriente de 300 A.

El control por voltaje hace que el IGBT sea más rápido que el BJT, pero más lento que el Mosfet. La energía aplicada a la compuerta que activa el dispositivo es pequeña con una corriente del orden de los nanoampers, esta pequeña potencia necesaria para conmutar el dispositivo, hace que pueda ser controlado por circuitos integrados. [4]

CAPITULO II

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

2.1 GENERALIDADES.

Un vehículo eléctrico es un vehículo que utiliza energía eléctrica almacenada y es impulsado por uno o más motores eléctricos.

A diferencia de un motor de combustión interna que está diseñado específicamente para funcionar quemando combustible, un vehículo eléctrico obtiene la tracción de los motores eléctricos.

Un vehículo eléctrico se compone esencialmente de una batería eléctrica para el almacenamiento de energía, un motor eléctrico y un sistema electrónico de control.

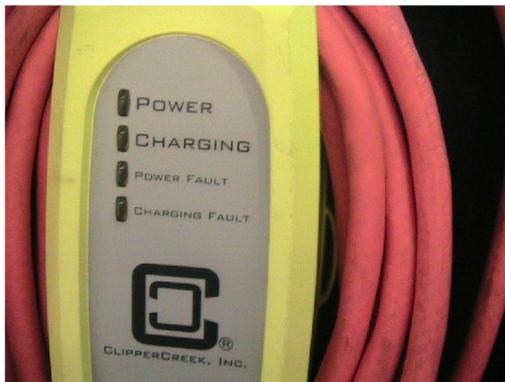
Normalmente la batería se recarga de la red eléctrica a través de un enchufe y una unidad de carga de la batería o cargador, que puede llevarse a bordo o integrado en el punto de carga. El controlador normalmente controla la potencia suministrada al motor, y por lo tanto la velocidad del vehículo, adelante y atrás. Por lo general, conviene hacer uso del freno regenerativo, tanto para recuperar la energía como una forma de frenado sin fricción [5]



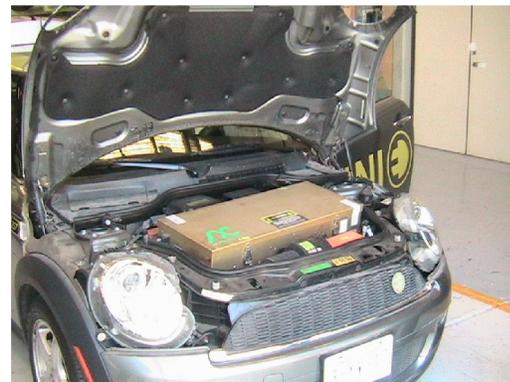
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.1 Vehículo eléctrico (a) Prototipo Vehículo MiniE de la marca BMW que se utilizó en las instalaciones de ESIME TICOMÁN, (b) y (c) Conexión del vehículo a la red eléctrica, (d) Controlador del vehículo

2.2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.

Actualmente el sistema básico de almacenamiento de energía eléctrica portátil son los acumuladores eléctricos o baterías, en el mercado actualmente existen diferentes tipos de baterías las cuales están dedicadas a diferentes tipos de aplicaciones.

Cada tipo de batería comparte el tipo de funcionamiento básico de transferencia de electrones, este proceso de transferencia de electrones es conocido como efecto REDOX. En este efecto intervienen dos elementos fundamentales los cuales son el electrodo y el electrolito, en el cual uno de los dos pierde electrones al cerrar de manera externa el circuito, en función de la capacidad de recuperación de electrones del electrolito esta la funcionalidad de las baterías.

Dentro de las características que se deben tomar en cuenta para la elección de la batería son las siguientes:

➤ **Ciclo de carga – descarga.**

El ciclo de carga y descarga puede ser repetido indefinidamente en condiciones ideales; en la práctica este proceso esta limitado a diferentes condiciones tanto ambientales como de reacciones químicas de los electrodos y electrolitos.

En los procesos de descarga el electrodo pierde parte de si en cada reacción y el electrolito cada vez se cristaliza por lo que en cada uso se reduce la vida de las baterías y la capacidad de carga.

➤ **Capacidad de descarga en Amper-hora (Ah)**

El parámetro de Ah de una batería es la capacidad de descarga de la misma y se especifica por el fabricante de las mismas. Una batería que inicialmente se encuentra cargada al 100% es descargada a una corriente determinada hasta que su energía se ve reducida en un 20% de su valor inicial. El valor de esa corriente de descarga, multiplicado por la duración de la prueba (20 horas es un valor típico), es el valor en Ah de esa batería. Un ejemplo práctico servirá para reforzar este concepto. Si una batería solar tiene una capacidad (C) de 200 Ah para un tiempo de descarga de 20hrs, el valor de la corriente durante la prueba es de 10A.

En muchas ocasiones se tiene la idea de extender este concepto para corrientes de descarga EN EXCESO del máximo determinado por el método de prueba (10A en nuestro ejemplo). La batería del ejemplo no puede entregar 200A durante una hora. El proceso electroquímico no puede ser acelerado sin que la batería incremente su resistencia interna en forma sustancial. Este incremento disminuye el voltaje de salida auto-limitando la capacidad de sostener corrientes elevadas en la carga. Si la corriente de descarga es menor que la especificada, digamos 5A, la relación Ah es válida. La batería de 200Ah del ejemplo puede sostener este valor de corriente por 40 horas.

Los fabricantes de baterías expresan el valor de la corriente de carga (o descarga) como un valor fraccional de su capacidad en Ah. En el ejemplo, $C/20$ representa 10A y $C/40$ representa un valor de 5A. Esta forma de dar el valor de la corriente de descarga (o carga) parece arbitraria, pero no lo es si recordamos que la capacidad en Ah de una batería, por definición, requiere un número específico de horas de descarga [6].

2.3 TIPOS DE BATERÍAS.

➤ Baterías de Ácido-Plomo

Las baterías de plomo son un tipo de batería muy común en vehículos convencionales, no híbridos. Suelen dar 6V, 12V u otro múltiplo, pero la tensión que suministra cada celda es de 2 V. Tienen una gran capacidad de corriente que las hacen ideales para los motores de arranque.

Su forma más conocida es la batería de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y dentro de él una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente. Para evitar arco eléctrico de las placas positivas, se dispone una negativa adicional, de forma que siempre haya una placa negativa exterior. Generalmente, en su fabricación, las placas positivas están recubiertas o impregnadas de dióxido de plomo (PbO_2), y las negativas están formadas por plomo esponjoso. Este estado inicial corresponde a la batería cargada, así que el electrolito agregado inicialmente debe corresponder a la batería con carga completa. Según el número de placas, la corriente (intensidad) suministrada será mayor o menor. Debajo de las placas se deja un espacio para que se depositen eventuales desprendimientos de los materiales que forman las placas. Para que no haya contacto eléctrico directo entre placas positivas y negativas, se disponen separadores aislantes que deben ser resistentes al ácido y permitir la libre circulación del electrolito.

La batería de plomo está constituida por dos tipos de electrodos de plomo que, cuando la batería está descargada, se encuentra en forma de sulfato de plomo ($PbSO_4$ II) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb); el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico.

Este tipo de acumulador se usa en muchas aplicaciones, además de los automóviles.

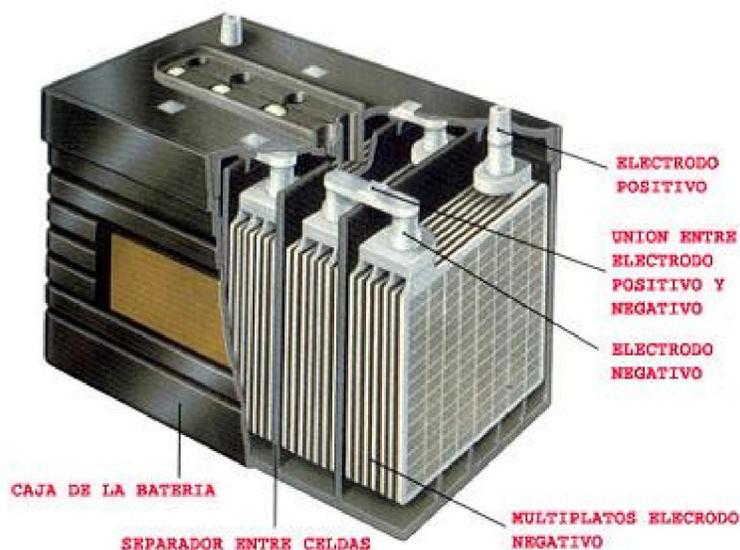


Figura 2.2 Estructura de una batería de Ácido-Plomo.

➤ Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd)

Las baterías de níquel cadmio (que suelen abreviarse "NiCd") son baterías recargables de uso doméstico e industrial (profesionales). Cada vez se usan menos, debido a su efecto memoria y al

cadmio (que es muy contaminante). Sin embargo, poseen algunas ventajas, como por ejemplo los ciclos de carga (1 ciclo = 1 carga y descarga), que oscilan entre los 1000 y 1500 ciclos. En condiciones estándar dan un potencial de 1.3 V en reposo mientras que la tensión de trabajo nominal es de 1.2V.

➤ **Baterías de Litio (Li-Ion)**

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las propiedades de las baterías de Li-Ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, junto con la ausencia de efecto memoria o su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Desde la primera comercialización de un acumulador basado en la tecnología Li-Ion a principios de los años 1990, su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles y lectores de música.

Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, requieren en su configuración como producto de consumo, la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones.

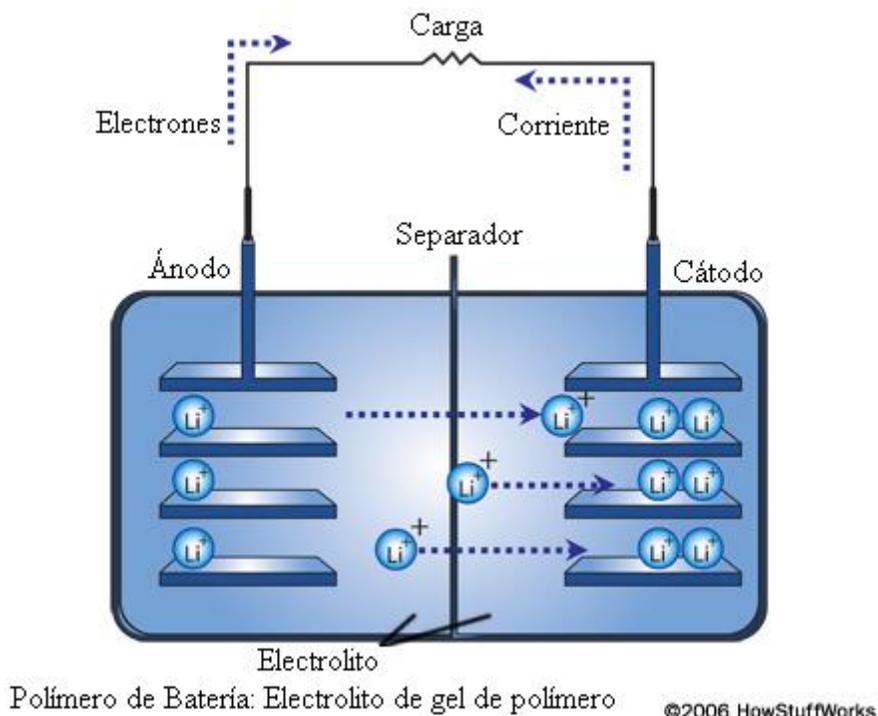


Figura 2.3 Mecanismo de descarga de una batería Li-Ion.

➤ **Baterías VRLA (De libre mantenimiento y ciclo profundo)**

Existe un tipo de batería que debido a su manufactura se le conoce como VRLA (**Valve Regulated Lead Acid**) y su traducción: Batería Regulada por Válvula.

Toda batería de Plomo-ácido genera en su interior gasificación. Por este motivo las baterías de electrolito líquido que usan tapones, tienen unos agujeros de ventilación en el cuerpo de los tapones. Ese agujero es para evacuación de gases. Las baterías Libre de Mantenimiento, de electrolito líquido, que no tienen tapones, cuentan con unas pequeñas ventanitas en los extremos de la cubierta, también con el propósito de evacuar los gases que se forman al interior de la batería.

Existe una generación de baterías que son totalmente selladas. No hay ventilación, pero estas baterías poseen en cada celda, unos pequeños tapones a base de hule. Este tapón se coloca con presión negativa. Es decir en el interior de la batería hay menos presión que la atmosférica. Este tapón convierte a la batería en un dispositivo que bajo condiciones normales de servicio, no emitirá gasificación al exterior. En estas baterías el electrolito está inmovilizado. Se les conoce también como baterías no derramables o sin posibilidad de filtración.

Las baterías de plomo siempre emiten gasificación. Algunas más que otras. Las VRLA por su construcción tienen un nivel reducido de gasificación, por eso se sellan con el tapón de hule. Pero si por circunstancias extrañas hay excesiva producción de gases y por tanto la presión interna de la batería se eleva por encima de un nivel de riesgo establecido en fábrica, el tapón de hule se abre y deja salir al gas [7].

Medidas de Seguridad

La sobrecarga excesiva o un método incorrecto de carga podrían producir un volumen desmedido de gas. La batería VRLA está construida con una válvula de seguridad que detecta el aumento de la presión interna y permite que el gas sea expulsado hacia fuera.

La Batería VRLA está lista para ser usada al cargarse aún después de estar almacenada por período extendido.

El uso de una estructura de malla de aleación de plomo-calcio en vez de una estructura de malla convencional de aleación de plomo-antimonio en la batería permite que la cantidad de auto descarga sea de 1/3 a 1/4 menor. Esto incrementa enormemente el período de almacenamiento aumentando el tiempo de vida de la batería.

Las baterías VRLA pueden ser usadas para 260 o más ciclos de descarga al 100% en servicio cíclico y tres a cinco años en servicio de respaldo. La batería no necesita mantenimiento y tiene un bajo costo de operación haciendo que su uso sea económico. El ser compacto, de peso liviano y alto rendimiento contribuye a disminuir el costo global de una fuente de energía [8].

Dentro de las baterías VRLA existen dos tipos principales y se diferencian por el tipo de electrolito que las componen y son:

Batería VRLA-GEL (Electrolito gelificado)

Las baterías de gel, o celdas de gel, contienen ácido que ha sido “gelificado” mediante la adición de gel de sílice, lo cual lo convierte en una masa sólida con una apariencia similar a la de una gelatina espesa. La ventaja que ofrecen estas baterías es que es imposible derramar el ácido incluso si la batería se rompe.

Una de las desventajas de las celdas de gel es que deben cargarse a una tensión inferior en comparación con las baterías de inmersión o AGM. Si se sobrecargan, se pueden formar vacíos en el gel, los cuales nunca desaparecen y provocan pérdidas en la capacidad de la batería.

En los climas cálidos, la pérdida de agua que se produce en un período de 2 a 4 años puede ser suficiente para provocar la muerte prematura de la batería.

Batería VRLA - AGM (Material separador de vidrio absorbente)

Existe un tipo de batería sellada más moderna que utiliza separadores de vidrio absorbente, denominados AGM, entre las placas. Éstos son separadores muy delgados de fibra de vidrio de borosilicato. Estas baterías ofrecen todas las ventajas de las baterías de gel, pero pueden soportar condiciones de uso mucho más duras. Las placas de las baterías AGM se encuentran colocadas de modo apretado y montadas con rigidez, y son capaces de soportar los choques y las vibraciones mucho mejor que cualquier batería convencional.

Dado que todo el electrolito se encuentra en los separadores de vidrio, éste no puede derramarse, ni siquiera si la batería se rompe. Esto significa asimismo que, dado que no ofrecen peligros, sus costos de envío son menores. Además, dado que no contienen ningún líquido que pueda congelarse y expandirse, son prácticamente inmunes al riesgo de congelamiento.

Las tensiones de carga son las mismas que para cualquier batería convencional; no hay necesidad de hacer ninguna modificación especial ni existen problemas de incompatibilidad con los cargadores.

Las baterías AGM exhiben una auto-descarga muy baja; lo habitual es que se descarguen de 1 % a 3 % por mes. Esto significa que pueden almacenarse durante períodos mucho más prolongados sin cargarse [9].



Figura 2.4 Batería VRLA.

A continuación se muestra una tabla en la que se comparan los diferentes tipos de baterías:

Tipo de Batería	Ventajas	Desventajas
Ácido Plomo	Grandes cantidades de corriente en corto plazo Económicas	Pocos ciclos de carga y descarga Peso y dimensiones grandes Mantenimiento continuo Fugas de electrolito Efecto de memoria Ciclos de descarga bajos
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Muchos ciclos de carga y descarga Pequeños tamaños Poco mantenimiento	Pocas cantidades de corriente Costosas para corrientes altas
Litio (Li-Ion)	Grandes cantidades de corriente Tamaños pequeños Mantenimiento mínimo	Para tener una cantidad de corriente alta las baterías se hacen costosas Se han diseñado para equipos portátiles Medidas de seguridad excesivas debido que pueden explotar si se exponen a sobre cargas Limitados ciclos de carga Costosas
VRLA	Cantidad de corriente alta Medidas y pesos moderados Costos bajos Mantenimiento nulo Seguras, ya que cuentan con un mecanismo de seguridad que deja salir el gas producido de la reacción química por la válvula de seguridad. Ciclos de descarga profundos (hasta del 90%) Sin efecto de memoria Tiempos de almacenamiento largos.	Casi ninguna.

Tabla 2.1 Comparativo entre los diferentes tipos de baterías.

CAPITULO III

SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

3.1 SEMICONDUCTORES DE DOS Y TRES TERMINALES

Los "semiconductores" como el silicio (Si), el germanio (Ge) y el selenio (Se), por ejemplo, constituyen elementos que poseen características intermedias entre los cuerpos conductores y los aislantes, por lo que no se consideran ni una cosa, ni la otra. Sin embargo, bajo determinadas condiciones esos mismos elementos permiten la circulación de la corriente eléctrica en un sentido, pero no en el sentido contrario. Esa propiedad se utiliza para rectificar corriente alterna, detectar señales de radio, amplificar señales de corriente eléctrica, funcionar como interruptores o compuertas utilizadas en electrónica digital, etc.

3.1.1 DIODO.

Un diodo semiconductor moderno está hecho de cristal semiconductor como el silicio con impurezas en él para crear una región que contiene portadores de carga negativos (electrones), llamado semiconductor de tipo N, y una región en el otro lado que contiene portadores de carga positiva (huecos), llamado semiconductor tipo P.

Las terminales del diodo se unen a cada región. El límite dentro del cristal de estas dos regiones, llamado una unión PN, es donde la importancia del diodo toma su lugar. El cristal conduce una corriente de electrones del lado n (llamado cátodo), pero no en la dirección opuesta; es decir, cuando una corriente convencional fluye del ánodo al cátodo (opuesto al flujo de los electrones).

Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial (V_D) es de 0.7 Volts en el caso del silicio y 0.3 Volts para los cristales de germanio.

La anchura de la región de agotamiento una vez alcanzado el equilibrio, suele ser del orden de 0.5 micras pero cuando uno de los cristales está mucho más dopado que el otro, la zona de carga espacial es mucho mayor.

Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización directa o inversa.

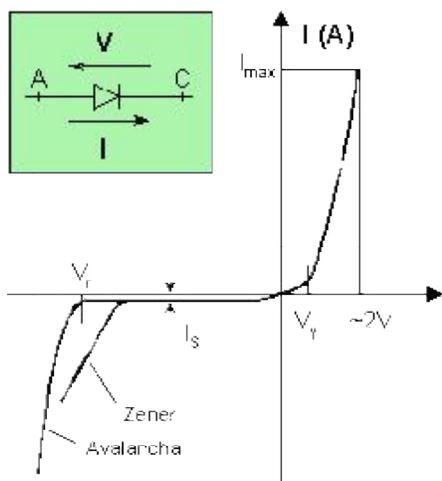


Figura 3.1 Curva característica del diodo.

3.1.2 TRANSISTOR DE JUNTURA BIPOLAR (BJT).

El transistor de unión bipolar (del inglés Bipolar Junction Transistor, o sus siglas BJT) es un dispositivo electrónico de estado sólido consistente en dos uniones PN muy cercanas entre sí, que permite controlar el paso de la corriente a través de sus terminales. La denominación de bipolar se debe a que la conducción tiene lugar gracias al desplazamiento de portadores de dos polaridades (huecos positivos y electrones negativos), y son de gran utilidad en gran número de aplicaciones; pero tienen ciertos inconvenientes, entre ellos su impedancia de entrada bastante baja.

El funcionamiento de un BJT, se basa en la modulación de corriente, que se inicia cuando se polariza directamente la unión base-emisor, e inversamente la unión base-colector, entonces los portadores mayoritarios, serán inyectados hacia el interior de la región de base, hasta que alcancen a la unión base-colector, donde serán acelerados por el potencial positivo, que corresponde al voltaje de polarización, y así los portadores electrones se colectarán en la región n del colector, como se ilustra en figura 3.4, donde WB representa la región de base, WE, representa la región de emisor, y WBE, es la región de carga de espacio.

Para comprender como un transistor BJT puede usarse como interruptor, tal como en los circuitos lógicos digitales, se deben estudiar sus modos de operación, a saber: (a) operación en la región de corte y (b) operación en la **región de saturación**. Cuando el transistor BJT transporta altas corrientes y funciona como interruptor, se debe tomar en cuenta el tiempo requerido para el reordenamiento de los portadores minoritarios, en la región de base del transistor BJT, que es dependiente del tiempo de tránsito de los electrones, para evitar fallas por fenómenos de ruptura. En la figura 3.3, se presenta el circuito equivalente π -híbrido de un BJT para conocer de que parámetros depende su funcionamiento. [10].

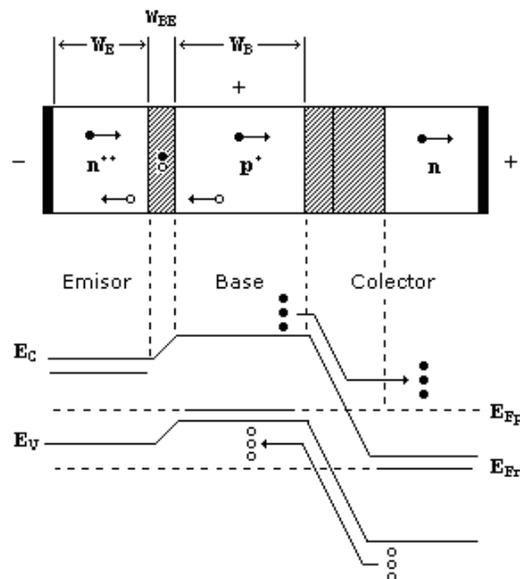


Figura 3.2 Representación de un transistor NPN y su diagrama de bandas de energía.

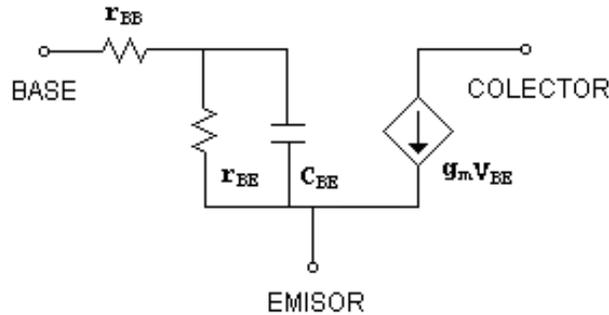


Figura 3.3 Circuito equivalente π -híbrido de un BJT.

Los transistores bipolares son los transistores más conocidos y se usan generalmente en electrónica analógica aunque también en algunas aplicaciones de electrónica digital, como la tecnología TTL o BICMOS.

Un transistor de unión bipolar está formado por dos Uniones PN en un solo cristal semiconductor, separados por una región muy estrecha. De esta manera quedan formadas tres regiones:

Emisor, que se diferencia de las otras dos por estar fuertemente dopada, comportándose como un metal. Su nombre se debe a que esta terminal funciona como emisor de portadores de carga.

Base, la intermedia, muy estrecha, que separa el emisor del colector.

Colector, de extensión mucho mayor.

En su funcionamiento normal, la unión base-emisor está polarizada en directa, mientras que la base-colector en inversa. Los portadores de carga emitidos por el emisor atraviesan la base, porque es muy angosta, hay poca recombinación de portadores, y la mayoría pasa al colector. El transistor posee tres estados de operación: estado de corte, estado de saturación y estado de actividad.

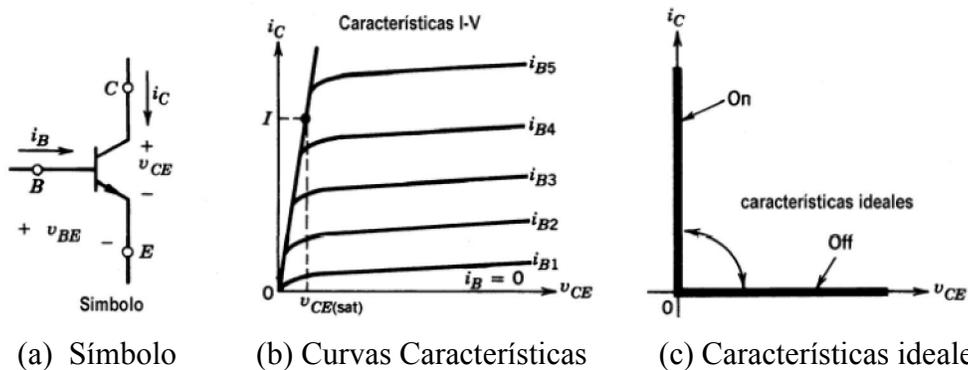


Figura 3.4 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características del Transistor BJT.

3.1.3 Transistores MOS.

El MOS fue desarrollado para resolver las limitaciones de operación de los transistores bipolares. La alta impedancia existente por la capa aislante presenta una ventaja ya que simplifica el diseño del circuito de disparo de compuerta. Para comprender como un MOS puede usarse como interruptor, se debe estudiar su modo de operación en la región de saturación.

Para su activación, se inyecta una señal al electrodo de compuerta, que se separa de la superficie del semiconductor por una película aislante de dióxido de silicio (**SiO₂**), como se observa en la figura 3.5. Una de las limitaciones de operación de un transistor MOS, es que es susceptible a fallas debido a fenómenos de ruptura. El MOS puede bajo un voltaje máximo en la unión drenaje-fuente y baja corriente de drenaje fallar, debido a la presencia de transistores bipolares parásitos en la estructura del dispositivo MOS, que se observan en la figura 3.5. Otro fenómeno que causa su ruptura ocurre a voltajes de drenaje altos, por que el campo eléctrico intenso en esa región causa ruptura de la base del transistor parásito N^+PN , cuya trayectoria se observa en la figura 3.5.

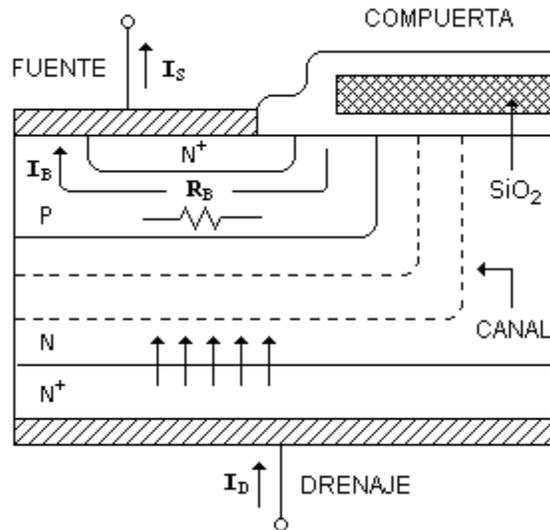


Figura 3.5 Sección transversal de un transistor MOS.

El transistor MOS es capaz de operar en altas frecuencias por la ausencia de portadores minoritarios de transporte, pero existe una limitación de operación en altas frecuencias, que es el tiempo de tránsito y el proceso de carga y descarga del capacitor de compuerta C_{GS} . Un circuito equivalente para el transistor MOS, se ilustra en la figura 3.6, en el cual se observa el capacitor de compuerta C_{GS} formado por su estructura física. [11]

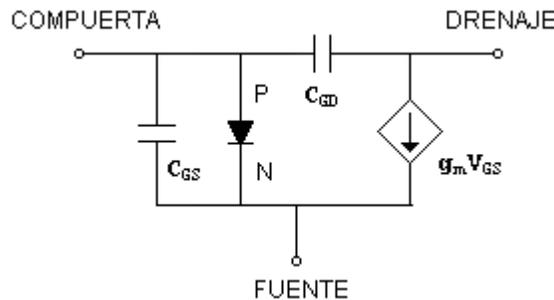


Figura 3.6 Circuito equivalente de un transistor MOS.

Transistor de efecto de Cambio de Juntura (JFET).- El JFET (Junction Field-Effect Transistor, en español transistor de efecto de campo de juntura o unión) es un dispositivo electrónico, esto es, un circuito que, según unos valores eléctricos de entrada, reacciona dando unos valores de salida. En el caso de los JFET, al ser transistores de efecto de campo eléctrico, estos valores de entrada son las tensiones eléctricas, en concreto la tensión entre los terminales S (fuente) y G (puerta), VGS. Según este valor, la salida del transistor presentará una curva característica que se simplifica definiendo en ella tres zonas con ecuaciones definidas: corte, óhmica y saturación.

Físicamente, un JFET de los denominados "Canal P" está formado por una pastilla de semiconductor tipo P en cuyos extremos se sitúan dos patillas de salida (drenado y fuente) flanqueada por dos regiones con dopaje de tipo N en las que se conectan dos terminales conectados entre sí (puerta). Al aplicar una tensión positiva VGS entre puerta y fuente, las zonas N crean a su alrededor zonas en las que el paso de electrones (corriente ID) queda cortado, llamadas **zonas de exclusión**. Cuando esta VGS sobrepasa un valor determinado, las zonas de exclusión se extienden hasta tal punto que el paso de electrones ID entre fuente y drenaje queda completamente cortado. A ese valor de VGS se le denomina Vp. Para un JFET "Canal N" las zonas P y N se invierten, y las VGS y Vp son negativas, cortándose la corriente para tensiones menores que Vp.

Así, según el valor de VGS se definen dos primeras zonas; una activa para tensiones negativas mayores que Vp (puesto que Vp es también negativa) y una zona de corte para tensiones menores que Vp. Los distintos valores de la ID en función de la VGS vienen dados por una gráfica o ecuación denominada ecuación de entrada.

En la zona activa, al permitirse el paso de corriente, el transistor dará una salida en el circuito que viene definida por la propia ID y la tensión entre el drenaje y la fuente VDS. A la gráfica o ecuación que relaciona estas dos variables se le denomina ecuación de salida, y en ella es donde se distinguen las dos zonas de funcionamiento de activa: óhmica y saturación.

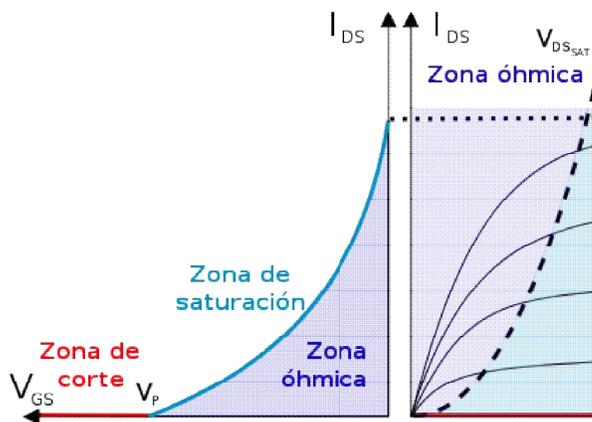
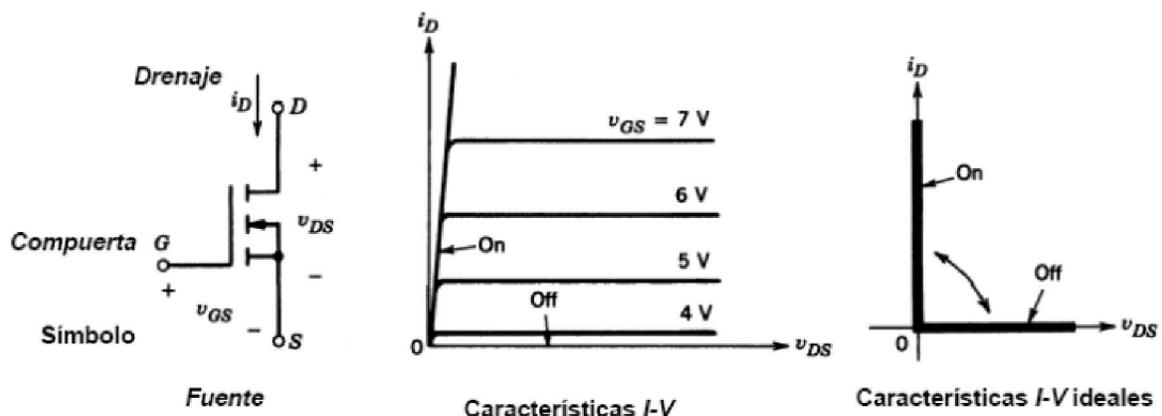


Figura 3.7 Curva característica del transistor JFET.

Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFET).- El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o MOSFET (en inglés Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor) es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Aunque el MOSFET es un dispositivo de cuatro terminales llamadas Fuente (S), Drenaje (D), Compuerta (G) y Sustrato (B), el sustrato generalmente está conectado internamente a la terminal de la fuente, y por este motivo se pueden encontrar dispositivos de tres terminales similares a otros transistores de efecto de campo. El transistor MOSFET está basado en la estructura MOS. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica, ya sea en circuitos analógicos o digitales, aunque el transistor de unión bipolar fue mucho más popular en otro tiempo. Prácticamente la totalidad de los microprocesadores comerciales están basados en transistores MOSFET.

En los MOSFET de enriquecimiento, una diferencia de tensión entre el electrodo de la compuerta y el sustrato induce un canal conductor entre los contactos de drenaje y fuente, gracias al efecto de campo. El término enriquecimiento hace referencia al incremento de la conductividad eléctrica debido a un aumento de la cantidad de portadores de carga en la región correspondiente al canal, que también es conocida como la zona de inversión. El canal puede formarse con un incremento en la concentración de electrones (en un NMOSFET o NMOS), o huecos (en un PMOSFET o PMOS), en donde el sustrato tiene el tipo de dopado opuesto: un transistor NMOS se construye con un sustrato tipo P, mientras que un transistor PMOS se construye con un sustrato tipo N. Los MOSFET de empobrecimiento tienen un canal conductor que se debe hacer desaparecer mediante la aplicación de la tensión eléctrica en la compuerta, lo cual ocasiona una disminución de la cantidad de portadores de carga y una disminución respectiva de la conductividad.



(a) Símbolo (b) Curvas Características (c) Características ideales

Figura 3.8 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características del Transistor MOSFET.

3.1.4 Transistor Bipolar de Compuerta Aislada (IGBT).

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT, del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una

puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del transistor BJT.

Por sus significativas características de operación en altas corrientes y aplicaciones de bajas y altas frecuencias, cuando es comparado con ambos transistor de unión bipolar y transistor MOS; el transistor bipolar de compuerta aislada (conocido en ingles por IGBT), es el dispositivo avanzado más comercialmente.

Considerando la estructura del IGBT de la figura 3.9, el flujo de corriente no puede ocurrir, cuando un voltaje negativo es aplicado al colector con respecto al emisor, por que la unión J3 es polarizada en forma inversa. Pero, cuando un voltaje positivo es aplicado al colector con la compuerta en corto circuito con el emisor, el IGBT opera en su modo de bloqueo directo. Si el voltaje de compuerta es aplicado con una magnitud suficiente y el dispositivo opera en su estado de conducción directa, los electrones (I_e) pueden ahora fluir en la región N+ (emisor) a la región de base (N). En este estado de conducción directa, la unión J3 es polarizada directamente y la región P+ del sustrato inyecta huecos (I_h) dentro de la región de base (N).

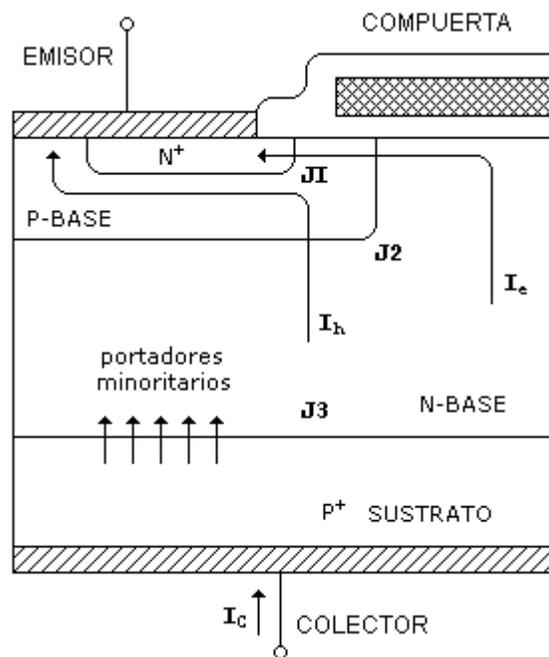


Figura 3.9 Sección transversal de un transistor IGBT.

Una característica importante de un IGBT es su capacidad de apagado de compuerta. Debido al flujo de corriente a través del canal MOS, la corriente de colector puede ser interrumpida por el removido del voltaje en la compuerta. La compuerta debe conectarse a la fuente por un circuito externo que permita descargar la capacitancia de compuerta.

Debido a que la carga almacenada en un IGBT debe ser removida por recombinación, un tiempo de apagado mayor se observa como resultado de la presencia de portadores minoritarios en la región de base (N) durante la conducción del IGBT. Un IGBT presenta relativamente baja velocidad de

conmutación. En la figura 3.10, se muestra un circuito equivalente aproximado de un IGBT, en el cual se observan sus componentes distribuidos que determinan su respuesta dinámica.

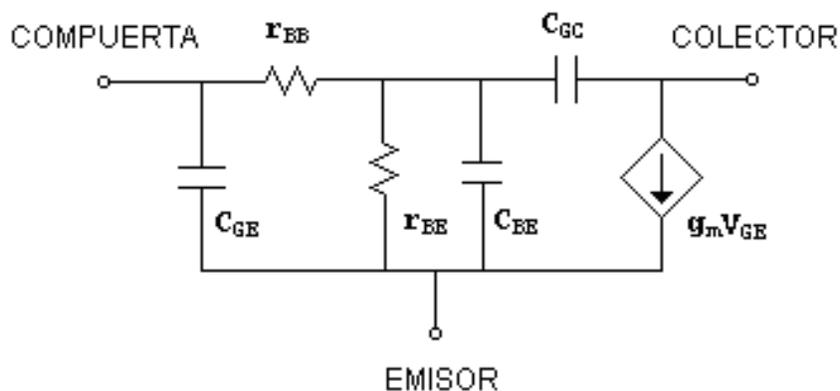


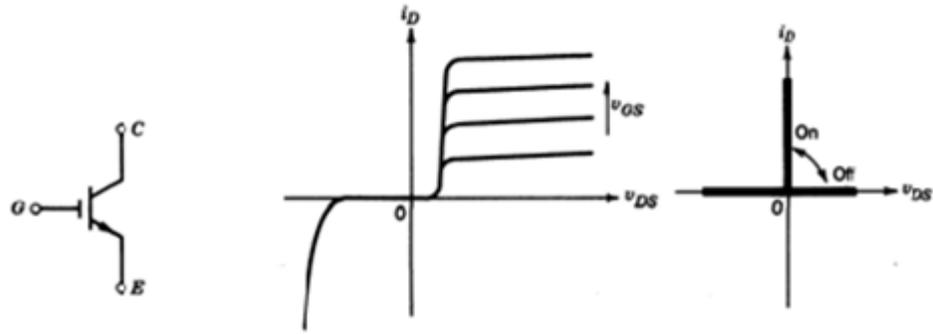
Figura 3.10 Circuito equivalente aproximado de un IGBT.

Los transistores IGBT han permitido desarrollos que no habían sido viables hasta entonces, en particular en los Variadores de frecuencia así como en las aplicaciones en maquinas eléctricas y convertidores de potencia que nos acompañan cada día y por todas partes, sin que seamos particularmente conscientes de eso: automóvil, tren, metro, autobús, avión, barco, ascensor, electrodoméstico, televisión, domótica, Sistemas de Alimentación Ininterrumpida o SAI (en Inglés UPS), etc.

El IGBT es adecuado para velocidades de conmutación de hasta 20 kHz y ha sustituido al BJT en muchas aplicaciones. Es usado en aplicaciones de altas y medianas energía como fuente conmutada, control de la tracción en motores y cocina de inducción. Grandes módulos de IGBT consisten en muchos dispositivos colocados en paralelo que pueden manejar altas corrientes del orden de cientos de amperios con voltajes de bloqueo de 6000 volts.

Se puede concebir el IGBT como un transistor Darlington híbrido. Tiene la capacidad de manejo de corriente de un bipolar pero no requiere de la corriente de base para mantenerse en conducción. Sin embargo las corrientes transitorias de conmutación de la base pueden ser igualmente altas. En aplicaciones de electrónica de potencia es intermedio entre los tiristores y MOSFET. Maneja más potencia que los MOSFET siendo más lento que ellos y lo inverso respecto a los tiristores.

Este es un dispositivo para la conmutación en sistemas de alta tensión. La tensión de control de puerta es de unos 15 V. Esto ofrece la ventaja de controlar sistemas de potencia aplicando una señal eléctrica de entrada muy débil en la puerta.



(a) Símbolo (b) Curvas Características (c) Características ideales

Figura 3.11 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características de un transistor IGBT.

En resumen, los diferentes dispositivos semiconductores empleados para el control de circuitos electrónicos tienen diferentes características de control de frecuencia, potencia y amperaje, lo anterior se resume en la figura 3.12. [12].

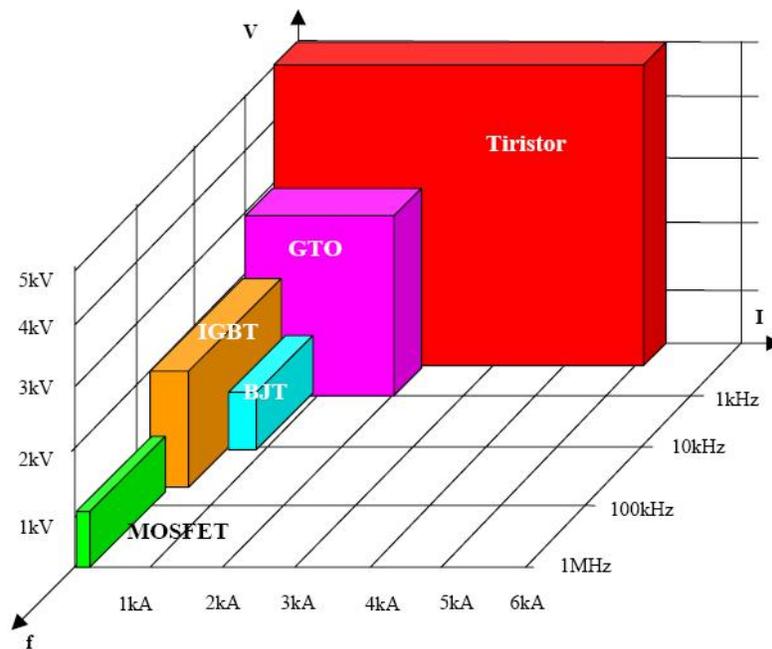


Figura 3.12 Comparación de características entre los dispositivos semiconductores.

3.2 RESPUESTA TRANSITORIA DE UN CIRCUITO RL.

Para comprender el comportamiento transitorio de un circuito RL, se considera el circuito que se ilustra en figura 3.13 (a). Cuando el interruptor (SW) en el circuito está cerrado, la corriente $i(t)$ incrementa, cuyo valor depende inicialmente del inductor L con mínima resistencia interna RL, pero cuando el resistor R toma un valor considerable, la corriente que circula por el interruptor incrementa aún más, como se muestra en la figura 3.13 (b).

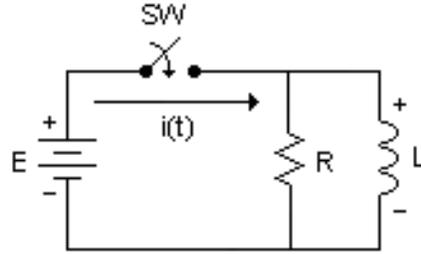


Figura. 3.13 (a). Circuito RL activado con un interruptor SW.

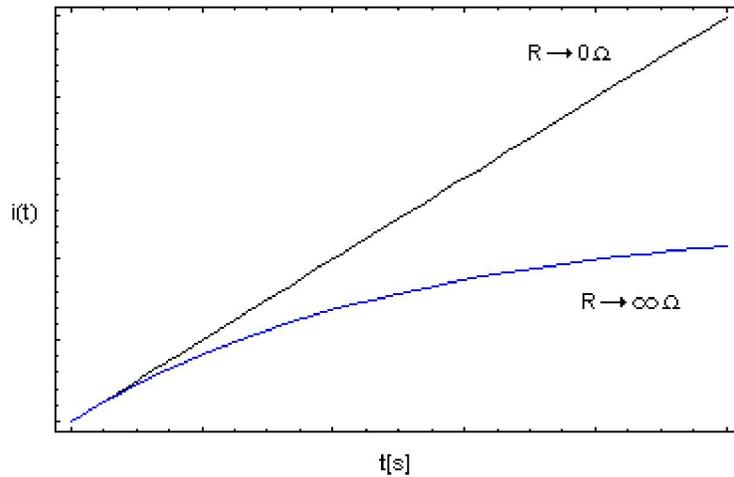


Figura 3.13 (b). Grafico ideal de la corriente $i(t)$ como función del valor de R del circuito de la figura 3.13 (a)

En el instante después de que se cerró el interruptor (SW), el cambio del flujo magnético a través del inductor induce una contra fuerza electromotriz (fem) en el mismo inductor, la cual se opone al incremento de la corriente $i(t)$. El tiempo que toma a la corriente en alcanzar un valor de 0.632 de su valor final, se le llama **constante de tiempo** del circuito RL, con valor $\tau = \frac{L}{R}$.

Cuando el interruptor (SW) en el circuito de la figura 3.13(a) se abre, la corriente $i(t)$ deja de fluir por el circuito RL. Sin embargo, como en el inductor L, se desarrolló un trabajo eléctrico al incrementar la corriente $i(t)$ desde 0 hasta un valor máximo, la energía suministrada al inductor en el proceso, se almacenó en él y puede recuperarse cuando la corriente inductiva $i(t)$ disminuye nuevamente a cero, con un circuito que utiliza un diodo de unión y que se muestra en figura 3.14.

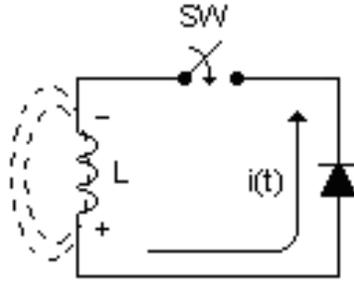


Figura 3.14 Circuito RL para recuperar la energía almacenada en el inductor.

En Fig. 3.14, la energía almacenada en el inductor en forma de corriente, se representa como un campo magnético alrededor del inductor. La potencia que puede desarrollar el inductor con la energía almacenada, es igual a la energía almacenada durante el tiempo t_{sw} en que se encuentra cerrado el interruptor (SW):

$$P_L = \frac{1}{2t_{sw}} L I_p^2 \quad (1)$$

Donde I_p es el valor de la corriente pico que circula por el interruptor (SW), cuando el interruptor es cerrado y es equivalente aproximadamente a $I_p = E / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. [13]

3.3 INTERRUPTOR ELECTRÓNICO CON CARGA INDUCTIVA.

Se analizan las configuraciones de la figura 3.15 con carga inductiva para dos modos de operación: (i) almacenamiento completo de energía, en donde toda la energía almacenada esta en el volumen del inductor y (ii) almacenamiento incompleto de energía, donde no toda la energía almacenada en el inductor se queda en su volumen.

Para el modo de almacenamiento completo de energía, un valor relativamente bajo de inductancia L es necesario, para que una corriente alta del inductor I_L circule por el interruptor de estado sólido, durante el periodo en estado encendido. Sin embargo pérdidas del arrollamiento incrementan y el transistor utilizado como interruptor de estado sólido debe tener la capacidad para permitir que circule a través de él una mayor corriente I_L .

Para el modo de almacenamiento incompleto de energía, un valor relativamente alto del inductor L es necesario, durante el periodo en estado encendido y un mayor flujo de corriente circulará por el transistor, cuando sea activado, debido a la energía residual almacenada en el inductor L , produciendo una mayor disipación de calor en el transistor.

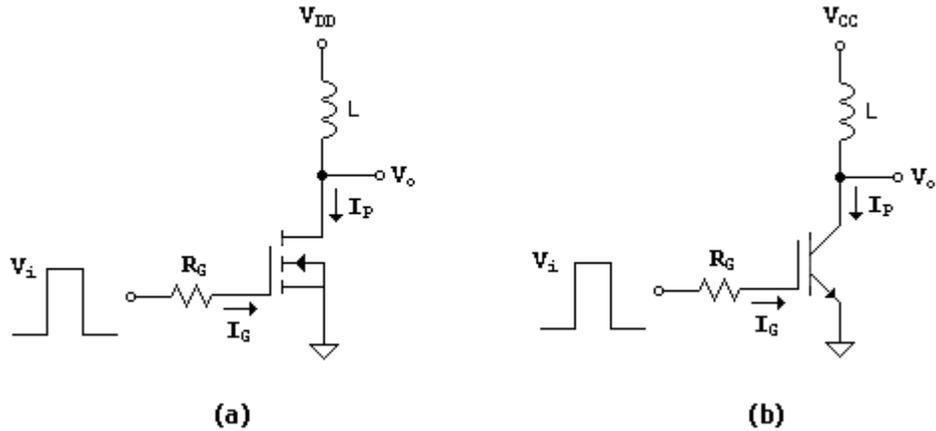


Figura 3.15 Interruptor electrónico con carga inductiva utilizando:
 (a) Transistor MOS y (b) Transistor bipolar de compuerta aislada.

Las siguientes ecuaciones son útiles para conocer el valor de L , que permita operar de manera estable a un interruptor electrónico con carga inductiva.

- (i) Es necesario conocer el valor de corriente pico I_P en el inductor, que es igual a la corriente que fluye por el transistor.
- (ii) Al cerrar el interruptor electrónico, la corriente aumenta desde 0 hasta un valor máximo durante un tiempo t_{SW} , que es el periodo de tiempo que permanece cerrado el transistor con mínima resistencia de encendido R_{ON} , entonces el voltaje reflejado en el inductor L , corresponde al voltaje de entrada $V_{in} = V_{DD}$ (transistor MOS) y/o $V_{in} = V_{CC}$ (transistor bipolar de compuerta aislada), y que se escribe como

$$V_{in} = L \frac{I_P}{t_{SW}} \quad (1)$$

- (iii) Tomando $\frac{1}{t_{SW}} = \frac{f}{\delta}$, la ecuación (1), puede expresarse en términos de la frecuencia de operación f y del ciclo de trabajo δ de la señal PWM inyectada a la compuerta de los transistores. Finalmente, la ecuación (1) se puede expresar en forma experimental, como

$$V_{in} = \frac{L I_P f}{\delta} \quad (2)$$

La ecuación (2), permite estimar el tiempo t_{SW} necesario en el cual se debe tener en estado de encendido al transistor como interruptor electrónico, para evitar fallas de ruptura.

CAPITULO IV

FUNDAMENTOS DE CONTROL BÁSICO

4.1 SISTEMAS DE CONTROL.

El control en la ingeniería se basa en el análisis de sistemas lineales y retroalimentados. Un sistema de control a menudo incluye componentes eléctricas, mecánicas y químicas.

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman la configuración del sistema, el cual proporcionará la respuesta deseada del mismo. La base para el análisis de un sistema es la relación de causa-efecto que existe entre los componentes del sistema. Por lo tanto, un componente o proceso que se controla puede ser representado por un bloque, como se muestra en la figura 4.1. La relación entrada-salida representa la relación causa-efecto del proceso, que a su vez representa un procesamiento de la señal de entrada para proporcionar una variable de señal de salida, a menudo con una amplificación de potencia.



Figura 4.1 Proceso controlado.

Un sistema de control en lazo abierto utiliza un controlador y un actuador para obtener la respuesta deseada, como se muestra en la figura 4.2. Un sistema de lazo abierto es un sistema sin retroalimentación.

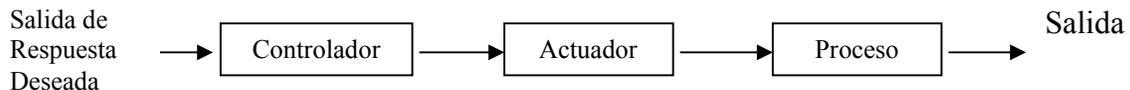


Figura 4.2 Sistema de control en lazo abierto (Sin retroalimentación).

A diferencia de un control de lazo abierto, un sistema de control de lazo cerrado compara la salida real con la respuesta de salida deseada, este resultado de la señal de salida, se denomina señal de retroalimentación.

Un sistema de control de lazo cerrado con retroalimentación se muestra en la figura 4.3.

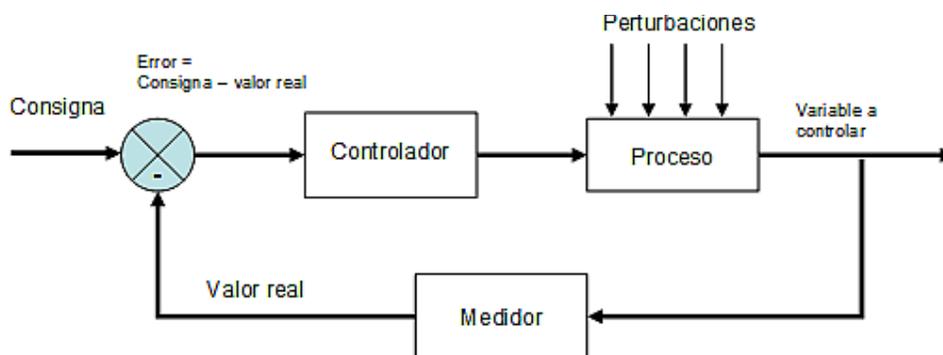


Figura 4.3 Sistema de control de lazo cerrado retroalimentado.

Un sistema de control con retroalimentación a menudo utiliza una función que relaciona la salida y la entrada para controlar el proceso. Mediante un sensor, el valor medido de la señal de salida es muy aproximado al valor real de la salida del sistema.

Un sistema de control retroalimentado a menudo utiliza funciones preestablecidas para relacionar la salida y la entrada de referencia del proceso a controlar. A menudo la diferencia entre la salida del proceso a controlar y la entrada de referencia es amplificada y se utiliza para controlar el proceso de manera que la diferencia se reduce continuamente. Se denomina “error” a la diferencia que existe entre la salida que se desea obtener y la salida real, el cual se ajusta con el controlador.

El sistema mostrado en la figura 4.3 es un sistema de control de retroalimentación negativa, ya que la salida se resta de la entrada y la diferencia se utiliza como la señal de entrada al controlador. El concepto de retroalimentación ha sido la base para el análisis de los sistemas de control y su diseño.

Un sistema de control de lazo cerrado utiliza una medición de la salida y la retroalimentación de esta señal se compara con la salida deseada (referencia o comando).

La importancia de la ingeniería en los sistemas de control ha ido en aumento, debido al creciente interés en lograr un óptimo rendimiento en los sistemas de control; aunado a que los sistemas se vuelven mas complejos, es decir, se deben considerar muchas variables en el esquema de control. En la figura 4.4 se muestra un diagrama a bloques que representa un sistema de control multivariable.

Un ejemplo común de un sistema de control en lazo abierto es un horno de microondas para funcionar durante un tiempo fijo. Un ejemplo de un sistema de control en lazo cerrado es una persona manejando un automóvil, observando los autos que se encuentran en la carretera.

La retroalimentación en un sistema permite controlar una salida deseada y por ende hacerla mas precisa, pero es necesario considerar la estabilidad de la respuesta.

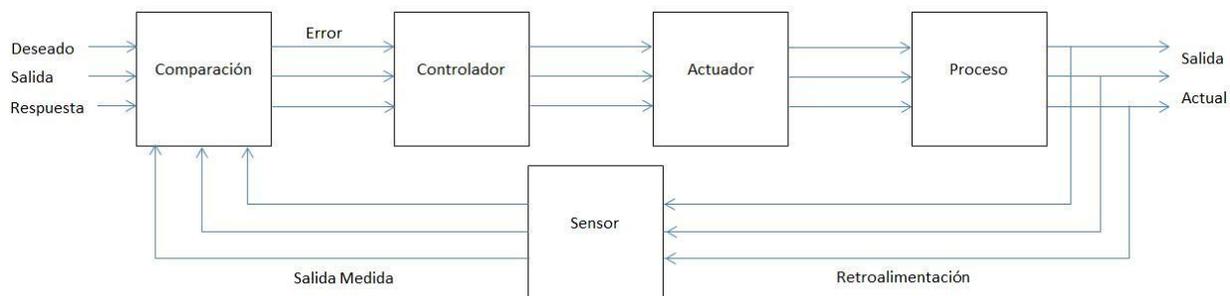
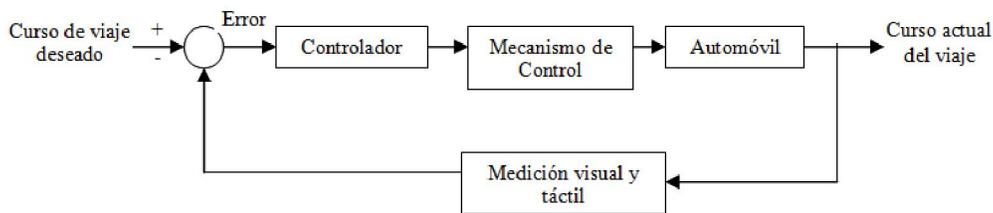


Figura 4.4 Sistema de control multivariable.

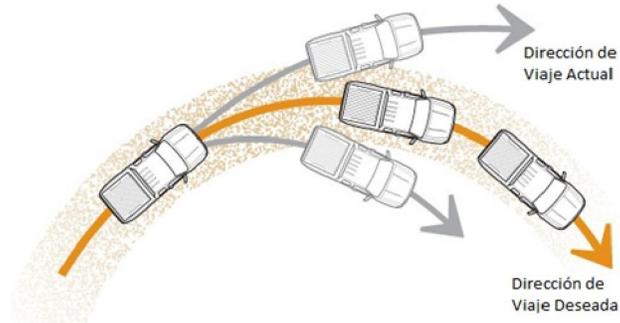
EJEMPLOS DE SISTEMAS DE CONTROL.

El control retroalimentado es un factor fundamental de la industria y la sociedad moderna. Conducir un automóvil es agradable cuando el auto responde de manera rápida a las acciones que realiza el conductor. Muchos autos tienen dirección asistida y frenos, que utilizan amplificadores hidráulicos para aumentar la fuerza en los frenos o en el volante.

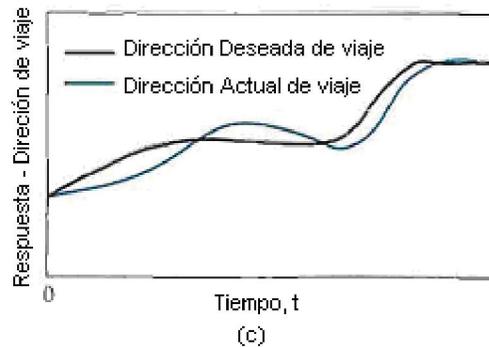
En la figura 4.5 (a) se muestra un diagrama a bloques de un sistema de control de un automóvil. La dirección deseada del vehículo se compara con el curso real del automóvil, con el propósito de generar una medida del error, como se muestra en la figura 4.5 (b). Esta medición se obtiene con la retroalimentación visual y táctil del conductor, proporcionado por el manejo del volante (sensor). Este sistema de retroalimentación es similar al sistema de control de un submarino o los controles de vuelo en un avión. Una respuesta típica del desplazamiento de un vehículo se muestra en la figura 4.5 (c).



(a) Sistema de control automotriz



(b) El control usa la diferencia entre la dirección del viaje actual y la dirección deseada para generar un ajuste en el control de las llantas.



(c) Respuesta típica Dirección - Viaje

Figura 4.5 Ejemplo de sistema de control.

La figura. 4.6 ilustra un robot desarrollado por estudiantes, esta basado en el CompactRIO de National Instruments, Inc., que sirve como el ordenador a bordo. En el diseño móvil, los sensores incluyen un codificador óptico para medir la velocidad del motor, un giroscopio y un acelerómetro para medir giros, y un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para obtener estimaciones de posición y velocidad del vehículo. Los actuadores incluyen dos actuadores lineales para girar las ruedas delanteras, para frenar y acelerar. El dispositivo permite la comunicación móvil para estar en contacto con la estación terrestre.

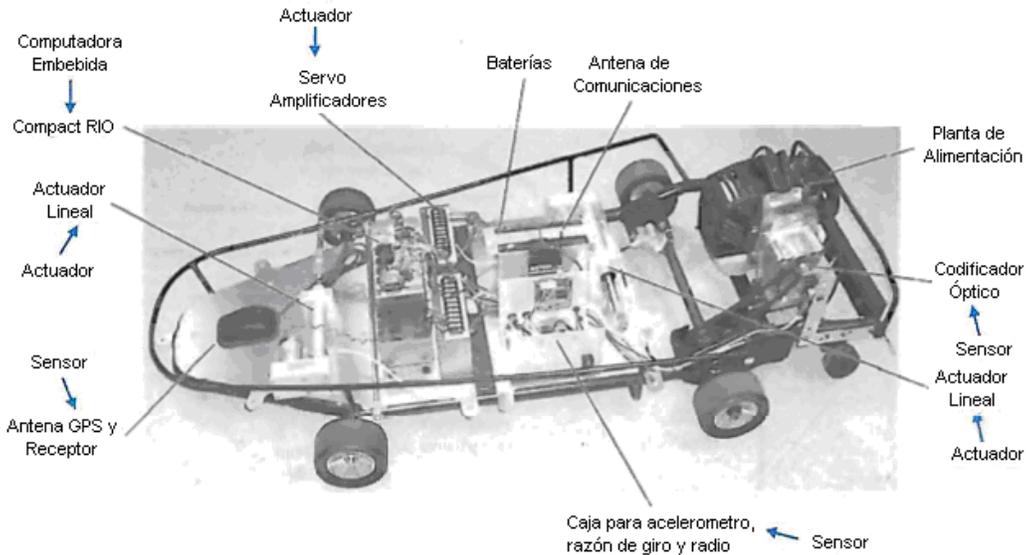


Figura 4.6 Robot basado en el CompactRIO de National Instruments, Inc.

Los avances en sensores, actuadores y dispositivos de comunicación están dando lugar a una nueva clase de sistemas de control integrados que están conectados en red mediante tecnología inalámbrica. La teoría de control sirve como base para el diseño del sistema de control moderno, el proceso de diseño se está expandiendo rápidamente, ya que abarca múltiples áreas de ingeniería. La NASA desarrolló un vehículo compacto diseñado para transmitir datos desde la superficie de un asteroide a la Tierra, como se ilustra en la Figura 4.7 "The rover" usa una cámara para tomar fotografías panorámicas de la superficie del asteroide. El robot puede posicionarse de modo que la cámara puede señalar directamente hacia abajo en la superficie o directamente hacia el cielo. [14]

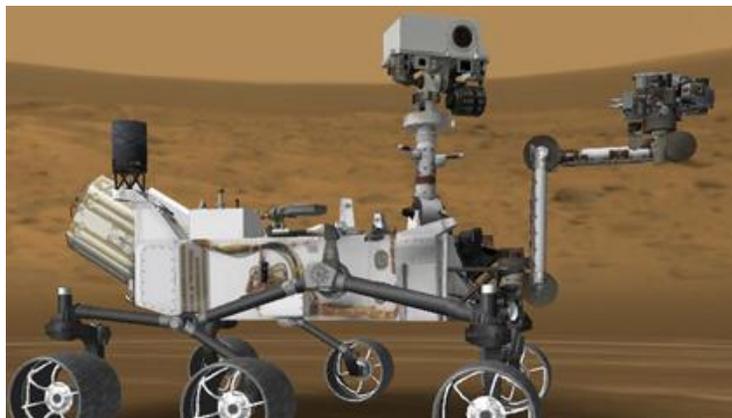


Figura 4.7 "The Rover", vehículo diseñado por la NASA.

4.2 COMPARADOR DE VOLTAJE.

Un comparador de voltaje analiza una señal de voltaje con respecto a un voltaje de referencia. Un dispositivo de este tipo se utiliza para resolver cierto tipo de aplicaciones sin necesidad de conocer mucho acerca de su construcción interna. Por otra parte existen limitaciones al utilizar los comparadores de voltaje, debido a que la presencia de señales no deseadas (denominadas ruido) se suma a señales de información, y causan señales falsas a la salida de un comparador (cambios de estado aleatorios). Este inconveniente se reduce con el uso de realimentación positiva. La realimentación positiva se lleva a cabo tomando una fracción del voltaje de salida V_o en un circuito comparador de voltaje, el cual se inyecta a la entrada no inversora (+), como se observa en los circuitos de Figura. 4.8 y 4.9.

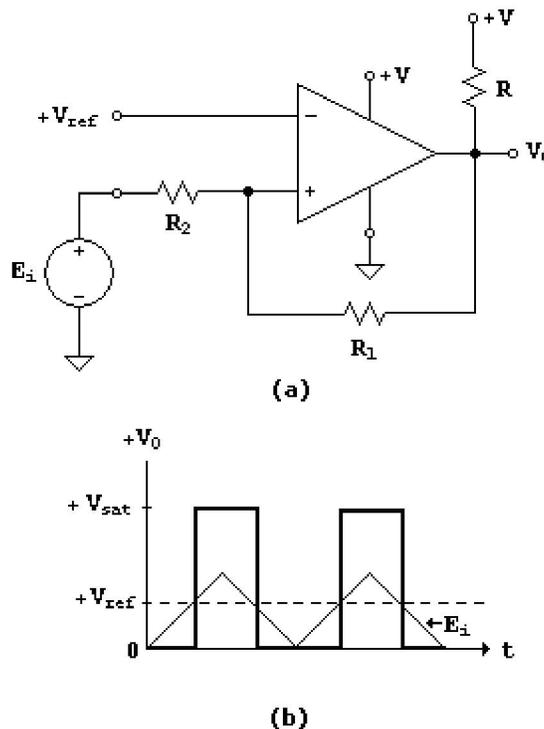


Fig. 4.8 (a) Circuito comparador de voltaje no inversor, y
(b) Curvas de voltaje de salida y entrada, cuando se aplica un voltaje de referencia V_{ref} .

Cuando se trata de construir un comparador de voltaje de bajo costo, y que contenga un número reducido de componente, es deseable satisfacer tres características:

- (1) Una resistencia ajustable para establecer el valor de V_{ref} .
- (2) Usar una sola fuente de voltaje regulado para polarizar al circuito comparador.
- (3) La señal E_i debe ser una señal que provenga de una fuente con baja impedancia.

En el circuito comparador no inversor de la figura 4.9, la resistencia de realimentación positiva que se conecta de la salida a la entrada (+), indica la presencia de histéresis (efecto de memoria entre dos estados) en el circuito. El voltaje de referencia V_{ref} , se aplica a la entrada (-). Mientras que, si se

intercambian la señal E_i a la entrada (-) y el voltaje de referencia V_{ref} se aplica a la entrada (+), se consigue un comparador inversor, cuyo circuito y curvas de operación se observan en la figura 4.9 [15]

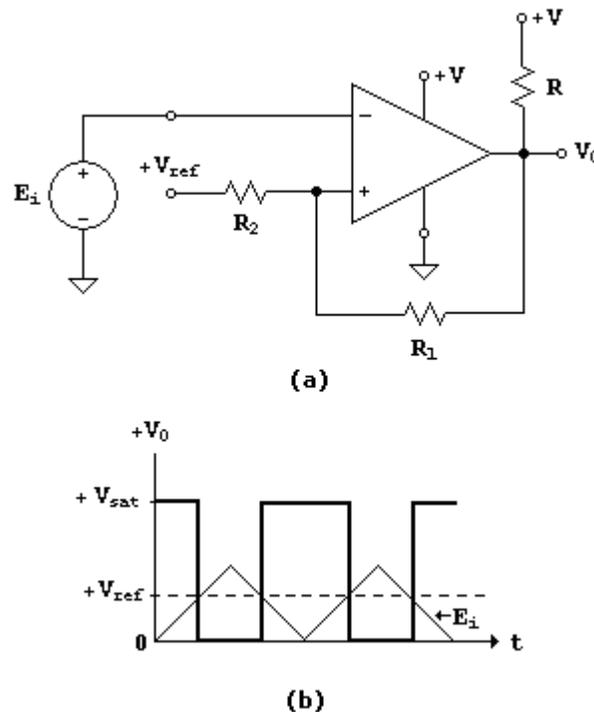


Fig. 4.9 (a) Circuito comparador de voltaje inversor, y

(b) Curvas de voltaje de salida y entrada, cuando se aplica un voltaje de referencia V_{ref} .

4.3 CONFIGURACIÓN INTERNA DEL TEMPORIZADOR LM555.

El LM555 es un dispositivo altamente estable para generación exacta de señales cuadradas y retardos de tiempo. El circuito temporizador LM555 puede proporcionar a la salida como fuente de corriente hasta 200mA y operar circuitos TTL o CMOS como carga. Provee pines adicionales para el disparo (en ingles trigger) o reseteo (en ingles reset), si es deseado para su operación. El temporizador LM555 consiste de dos comparadores de voltaje, un flip-flop RS, un transistor de descarga, y una red divisora de resistores. Para comprender el concepto básico de temporización, se debe examinar al LM555 en forma de bloques de la figura 4.11.

La red divisora de resistores es usada para habilitar los niveles del comparador. Los tres resistores son de igual valor, el comparador de umbral (en ingles Threshold comparador) es referenciado internamente a $\frac{2}{3}$ de la fuente de alimentación, $\frac{2}{3}V_{cc}$ y el comparador de disparo (en ingles Trigger comparador) a $\frac{1}{3}$ de la fuente de alimentación, $\frac{1}{3}V_{cc}$ respectivamente. Las salidas de los comparadores están conectadas al flip-flop RS, como se observa en la figura 4.10. Cuando el voltaje de disparo es desplazado debajo de $\frac{1}{3}V_{cc}$, el estado del comparador cambia y habilita la salida del flip-flop RS a un estado alto.

El pin de umbral normalmente monitorea el voltaje del capacitor de la red de tiempo RC externa. Cuando el voltaje en el capacitor excede $\frac{2}{3}V_{CC}$, el comparador de umbral deshabilita al flip-flop RS, llevando a su salida a un estado bajo. Cuando la salida es un estado bajo, el transistor de descarga es encendido, por consiguiente es descargado el capacitor externo. Una vez que el capacitor es descargado, el temporizador LM555 espera a otro pulso de disparo, y el ciclo de tiempo se completa.

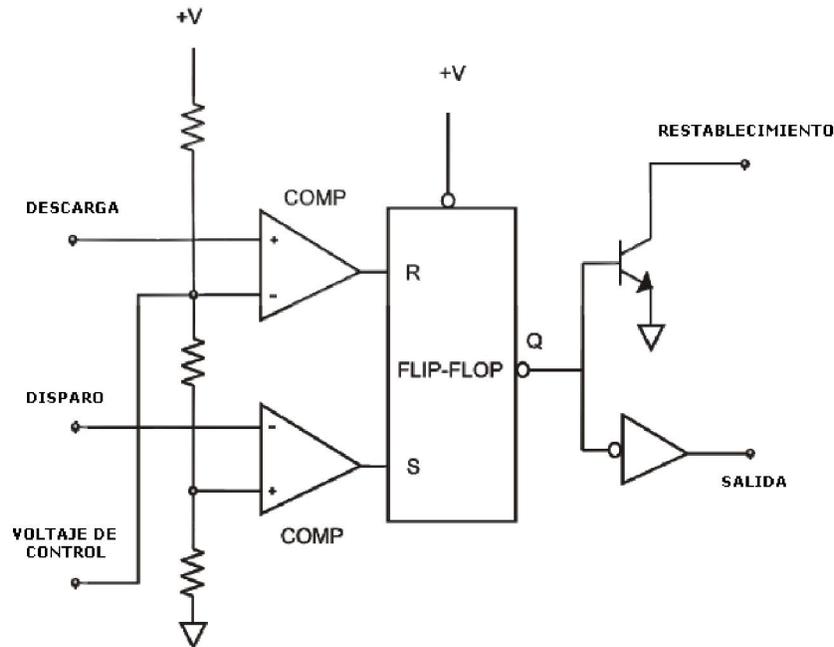


Figura 4.10 Diagrama de bloques internos del temporizador LM555.

El temporizador LM555 tiene dos modos de operación, ya sea en operación astable (conocido como multivibrador de oscilación libre) o en operación monoestable (conocido como multivibrador activado por disparo).

Multivibrador de oscilación libre

Cuando el temporizador opera como multivibrador de oscilación libre, el voltaje de salida cambia de un estado alto a uno bajo y reinicia al ciclo. El tiempo que dura el estado en alto o bajo, lo determina el circuito resistor-capacitor conectado en forma externa al temporizador LM555, como se observa en la figura 4.11(a).

El funcionamiento del multivibrador de oscilación libre de la figura 4.11(a), consiste en cargar al capacitor externo a través del arreglo de resistores $R_1 + R_2$, y descargarlo a través de R_2 . Así el ciclo de trabajo del voltaje de salida, puede ser determinado por la razón de estos dos resistores, a partir de

$$D = \frac{R_2}{R_1 + 2R_2} \quad (1)$$

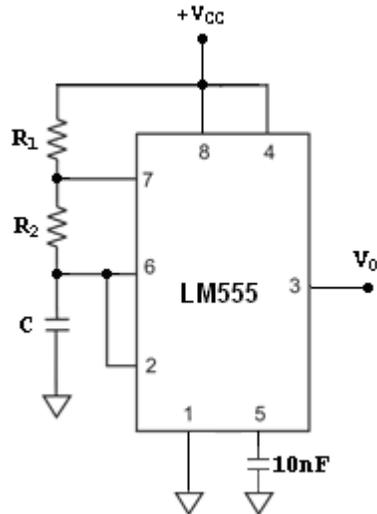


Figura 4.11 (a). Circuito para operación astable.

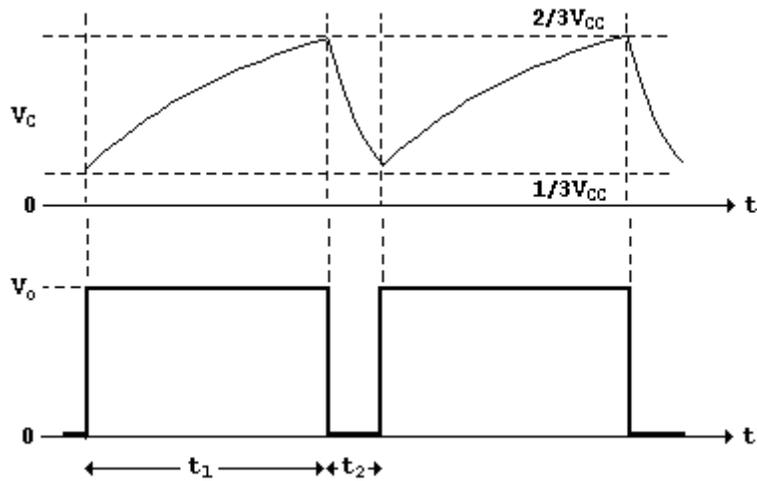


Figura 4.11 (b). Formas de onda para operación astable.

Multivibrador activado por disparo

Cuando el temporizador opera como multivibrador activado por disparo, un nivel bajo de voltaje se exhibe en la salida hasta que se aplica un pulso de disparo al pin de entrada del temporizador; entonces la salida cambia a un nivel alto de voltaje. El tiempo que la salida permanece en alto se determina con un resistor y un capacitor externos y conectados al temporizador como se muestra en la figura 4.12(a).

El tiempo que la salida permanece en alto, se determina con un resistor y un capacitor externos conectados al temporizador como se muestra en la figura 4.12(a). En este modo de operación, el capacitor externo, es inicialmente descargado por un transistor dentro del temporizador LM555.

Sobre la aplicación de un pulso de disparo, como se observa en la figura 4.12(b), inferior que $\frac{1}{3}V_{CC}$ al pin 2, el flip-flop RS es habilitado, que libera el corto circuito a través del capacitor y opera la salida a un estado alto. El voltaje a través de capacitor entonces incrementa exponencialmente por un periodo de tiempo de

$$t = 1.1RC \quad (2)$$

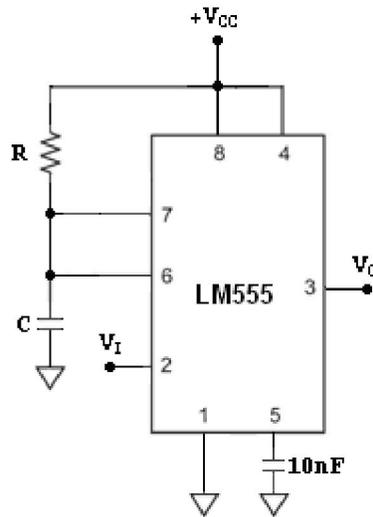


Figura 4.12(a). Circuito para operación monoestable.

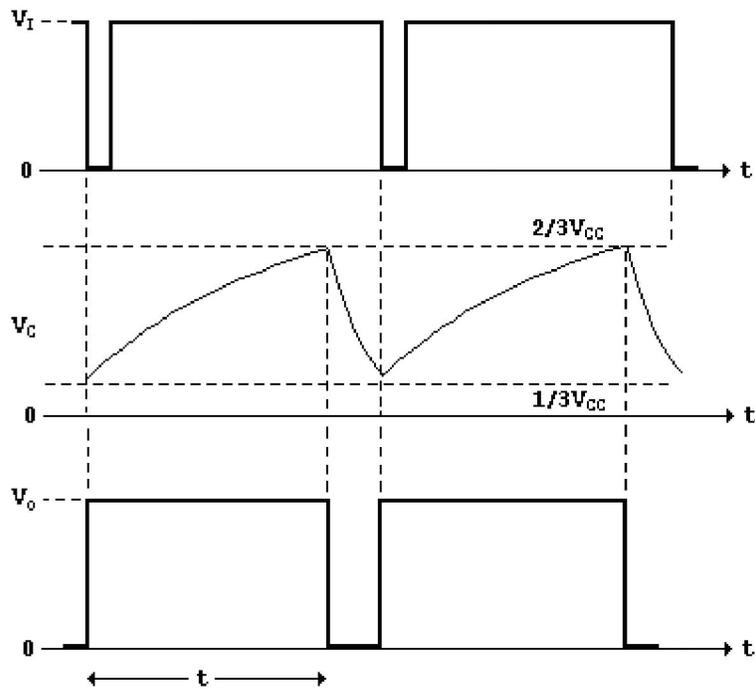


Figura 4.12 (b). Formas de onda para operación monoestable.

Al final del intervalo t , la salida regresa al estado bajo, cuando el voltaje es igual a $\frac{2}{3}V_{CC}$, como se observa en la figura 4.12 (b). El comparador entonces deshabilita al flip-flop RS que descarga al capacitor C y cambia la salida a su estado bajo. En la figura 4.12 (b), se muestran las formas de onda generadas en este modo de operación.

4.4 GENERADOR DE ONDA PWM DE BAJO COSTO.

Para desarrollar el circuito de control que permita la activación de las interfases electrónicas propuestas en este trabajo de tesis, se requiere que se cumpla la secuencia de señales $f_1(t)$ y $f_2(t)$, que se observan en Fig. 4.13, para formar la señal de control PWM.

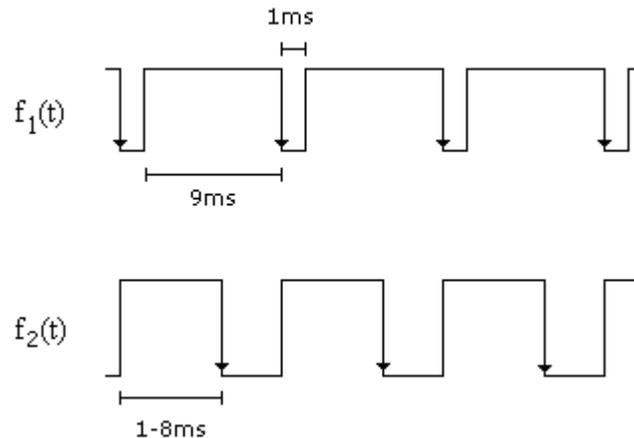


Figura 4.13 Secuencia de señales del circuito de control con temporizadores.

El circuito de figura 4.14, consiste de un primer temporizador, identificado como CI-1, cuyo funcionamiento corresponde a un multivibrador de oscilación libre que proporciona una señal cuadrada fija de 100Hz y corresponde a la función $f_1(t)$, que se observa en la figura 4.13. Los resistores R_1 y R_2 se obtienen de las expresiones que proporciona el fabricante del CI-1, cuya información se localiza en el apéndice B.

Para obtener la señal PWM que corresponde a la función $f_2(t)$, se utiliza un segundo temporizador, identificado como CI-2, cuyo funcionamiento corresponde a un multivibrador activado por disparo con un retardo de tiempo variable de la señal de salida entre 1 y 8 milisegundos aproximadamente, como se observa en la figura 4.14. La señal PWM que se obtiene del CI-2, depende del valor del resistor R . La señal $f_1(t)$ proveniente del CI-1 se inyecta al CI-2 como pulso de disparo. Ambos, resistor R y capacitor C se obtienen de los gráficos que proporciona el fabricante del CI-2, cuya información se localiza en el apéndice B. [16]

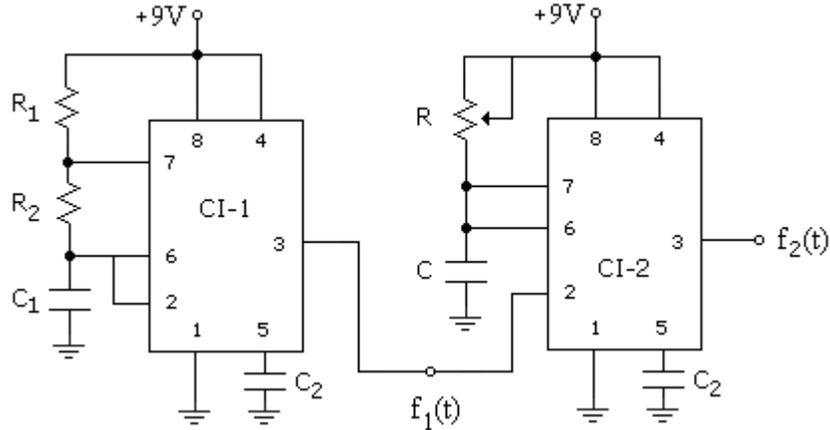


Figura 4.14. Diagrama electrónico del circuito de control con temporizadores.

En base a las pruebas de operación del motor GR-M35SLP (El cual se implementará en un trabajo de investigación posterior ligado al el proyecto de donde se deslinda esta tesis) se tienen que la frecuencia de operación del motor es de 2KHz por lo tanto todos los cálculos siguientes se basan en esa frecuencia.

A continuación se muestran las fórmulas para calcular el valor de los componentes y el ciclo de trabajo de la señal PWM para el circuito LM555 en configuración astable:

- Frecuencia: $f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$;
- Periodo: $T = t_1 + t_2$,

Donde $t_1 = 0.693(R_1 + R_2)(C_1)$

$t_2 = 0.693(R_2)(C_1)$.

Se sugiere un valor de resistencias de valores comerciales de:

$R_1 = 5.6K\Omega$

$R_2 = 680\Omega$

Para encontrar el valor de C_1 se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_1 = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)(f)}$$

$$C_1 = \frac{1.44}{(5600 + 2(680))(2000)}$$

$$C_1 = \frac{1.44}{(5600 + 1360)(2000)} = \frac{1.44}{(6960)(2000)} = \frac{1.44}{13920000} = 103nF$$

Para el tiempo de encendido de la señal utilizamos la siguiente ecuación:

$$t_1 = 0.693(R_1 + R_2)(C_1)$$

$$t_1 = 0.693(5600 + 680)(100 \times 10^{-9})$$

$$t_1 = 435 \mu s$$

Ahora ya tenemos todos los valores de los componentes y la frecuencia de la señal de disparo para el segundo circuito LM555 se procede a encontrar los valores de las resistencias y el capacitor del circuito astable.

La frecuencia de la señal del circuito monoastable esta siempre relacionada a la frecuencia de la señal de disparo del la salida del circuito astable del primer circuito LM555 por lo que la frecuencia de la señal de segundo circuito LM555 es siempre 2KHz.

Ahora bien, si proponemos un ciclo de trabajo de 5% al 95% del periodo de la señal entonces tenemos que encontrar los valores de R y C.

Consideramos un potenciómetro como R ya que necesitamos variar el valor de resistencia y variar a su vez el periodo útil de la señal $f_2(t)$.

Se tiene que para obtener el ciclo útil de la señal $f_1(t)$ empleamos la siguiente ecuación:

$$DC = 1.1RC$$

Se considera lo siguiente:

- $C = 47 \mu F$
- Ciclo útil de 5% como mínimo y 95% como máximo.
- El periodo es el mismo que la señal $f_1(t)$; es decir, $T = 500 \mu s$

Para DC de 5% de $T = 500 \mu s$ se tiene que:

$$DC = 1.1RC$$

$$R_{\min} = \frac{DC}{1.1C}$$

$$R_{\min} = \frac{(0.05)(500 \mu s)}{(1.1)(47 nF)}$$

$$R_{\min} = \frac{25 ns}{51.7 nF} = 0.48 Ohms$$

Para DC de 95% del $T=500\mu s$ se tiene que:

$$DC = 1.1RC$$

$$R_{\max} = \frac{DC}{1.1C}$$

$$R_{\max} = \frac{(0.95)(500\mu s)}{(1.1)(47nF)}$$

$$R_{\min} = \frac{475\mu s}{51.7nF} = 9187.62\Omega$$

$$R_{\max} \cong 10k\Omega$$

En la tabla 4.1, se enlistan los valores de los componentes utilizados para ambos temporizadores CI-1 y CI-2.

Componente	Valor
R_1	$5.6k\Omega$
R_2	$0.68k\Omega$
R	$10k\Omega$
C_1	$100nF$
C_2	$10nF$
C	$47nF$
CI-1	LM555
CI-2	LM555

Tabla 4.1. Valor de los componentes utilizados.

CAPITULO V

MOTORES ELÉCTRICOS

5.1 MOTORES ELÉCTRICOS.

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Debido a sus múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento, el motor eléctrico ha reemplazado en gran parte a otras fuentes de energía, tanto en la industria como en el transporte, las minas, el comercio o el hogar.

Los motores eléctricos satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio, desde arrancar, acelerar, mover, frenar, hasta sostener y detener una carga. Estos motores se fabrican en potencias que varían desde una pequeña fracción de caballo de fuerza (HP) hasta varios miles y con una amplia variedad de velocidades, que pueden ser fijas, ajustables o variables.

Un motor eléctrico contiene un número mucho más pequeño de piezas mecánicas que un motor de combustión interna o uno de una máquina de vapor, por lo que es menos propenso a los fallos. Los motores eléctricos son los más ágiles de todos en lo que respecta a variación de potencia y pueden pasar casi instantáneamente desde la posición de reposo a la de funcionamiento al máximo. Su tamaño es más reducido y pueden desarrollarse sistemas para manejar las ruedas desde un único motor, como en los automóviles.

El inconveniente es que las baterías son los únicos sistemas de almacenamiento de electricidad, y ocupan mucho espacio. Además, cuando se gastan, necesitan varias horas para recargarse antes de poder funcionar otra vez, mientras que en el caso de un motor de combustión interna basta sólo con llenar el depósito de combustible. Este problema se soluciona, en el ferrocarril, tendiendo un cable por encima de la vía, que va conectado a las plantas de generación de energía eléctrica. La locomotora obtiene la corriente del cable por medio de una pieza metálica llamada patín. Así, los sistemas de almacenamiento de electricidad no son necesarios.

El uso de los motores eléctricos se ha generalizado a todos los campos de la actividad humana desde que sustituyeran en la mayoría de sus aplicaciones a las máquinas de vapor. Existen motores eléctricos de las más variadas dimensiones, desde los pequeños motores fraccionarios empleados en pequeños instrumentos hasta potentes sistemas que generan miles de caballos de fuerza, como los de las grandes locomotoras eléctricas. [17]

Otro de los campos en los que los motores ocupan un lugar irremplazable es la robótica. Todos los robots necesitan motores eléctricos para poder moverse. La robótica es una de las áreas para la que se espera un mayor desarrollo en el futuro. Y por este motivo también cabe esperar que los motores eléctricos usados en robótica evolucionen refinando sus prestaciones.

Los motores eléctricos permiten transformar energía eléctrica en mecánica. Este hecho fundamental hace de los motores eléctricos la solución más adecuada en entornos, tanto industriales como domésticos. Al ser la energía eléctrica el tipo de energía inicial, el uso de motores cuenta con todas las ventajas que se derivan de este hecho. En primer lugar la energía eléctrica es barata, limpia y fácilmente transportable. Por otra parte la naturaleza de los motores eléctricos les permite adaptarse a un gran margen de cargas de trabajo. Tanto en la electricidad industrial como en el transporte, **los motores eléctricos han permitido un importante ahorro de energía**, ya que posibilita el almacenamiento de electricidad con mayor facilidad que otros dispositivos en que la energía simplemente se consume.

Por ejemplo los trenes actualmente cuentan con un sistema de frenos dínamo que les permite utilizar la energía de la frenada para ser consumida en el arranque posterior. El principio físico del funcionamiento de este tipo de motores consiste en que **toda corriente que circula por un conductor eléctrico tiende a desplazarse en forma perpendicular a la línea de acción del campo magnético**. Este campo y la corriente eléctrica interactúan determinando cómo se convierte un tipo de energía en otro. En estos casos el conductor funciona como imán eléctrico y se le denomina rotor, en tanto funciona con movimiento giratorio.

5.1.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.

Los motores, generadores y transformadores convierten la energía de una forma en otra al interactuar con el campo magnético.

El funcionamiento de un motor, en general, se basa en las propiedades electromagnéticas de la corriente eléctrica y la posibilidad de crear, a partir de ellas, unas determinadas fuerzas de atracción y repulsión encargadas de actuar sobre un eje y generar un movimiento de rotación.

El principio de funcionamiento del motor se basa en la ley de Faraday que indica que cualquier conductor que se mueve en el dentro del campo magnético de un imán generará una diferencia de potencial (D.D.P) entre sus extremos, proporcional a la velocidad de desplazamiento. Si en lugar de un conductor rectilíneo con terminales en circuito abierto se introduce un anillo conductor con los extremos conectados a una determinada resistencia y se hace girar en el interior del campo, de forma que varíe el flujo magnético abrazado por la misma se detectará la aparición de una corriente eléctrica que circula por la resistencia y que cesará en el momento en que se detenga el movimiento.

Normalmente en un motor se emplea un cierto número de espiras devanadas sobre un núcleo magnético de forma apropiada y también en algunas ocasiones se sustituye el imán permanente creador del campo por un electroimán, el cual produce el mismo efecto cuando se le aplica la corriente excitadora. A este último elemento (Imán o electroimán) se le denomina inductor, el conjunto espiras y núcleos móviles constituyen el inducido.

El sentido de la corriente eléctrica que circula por el inducido está definido mediante la **Ley de Lenz** que indica que toda variación que se produzca en el campo magnético tiende a crear un efecto en sentido opuesto que compense y anule la causa que la produjo. Si esta ley se aplica a nuestro caso nos indicará que la corriente inducida creará un campo magnético para que se oponga al movimiento de la misma lo que obligará a aplicar una determinada energía para mantener el movimiento la cual dependerá lógicamente de la intensidad de la corriente generada y del valor de la resistencia de carga (R_c), pudiendo calcularse como el producto de la energía consumida en la carga por un número que expresará el rendimiento de la conversión.

Ahora bien, todos los fenómenos expresados corresponden al efecto opuesto al de un motor, es decir, que mediante el sistema descrito se genera una corriente eléctrica a partir de un movimiento mecánico, lo que corresponde al principio de funcionamiento de un dinamo, sin embargo, al ser dicho efecto reversible, bastará con invertir los papeles y si en lugar de extraer corriente del inducido se le aplica una determinada tensión exterior, se producirá la circulación de una cierta intensidad de corriente por las espiras y éstas comenzarán a girar, completándose así el motor. Es importante considerar que teniendo en cuenta la ley de Lenz mencionada anteriormente, al girar él se creará en el mismo una

determinada tensión eléctrica, de sentido contrario al exterior que tenderá a oponerse al paso de la corriente para compensar así las variaciones de flujo magnético producidas, denominada fuerza **contraelectromotriz** (FCEM).

Características generales de los motores

- **POTENCIA:** Una característica fundamental es la potencia de salida disponible en el eje del motor. Las potencias de los motores abarcan desde una fracción pequeña hasta varios miles de HP; a los motores de menos de un HP se les denomina motores de potencia fraccionaria y a los restantes como motores de potencia integral.
- **VOLTAJE:** Los voltajes de los motores de corriente directa se extienden de 1.5 a 1500 V. Los voltajes mayores se emplean solamente para motores de usos industriales.
- **La FRECUENCIA:** Es muy importante en motores de corriente alterna. En motores industriales se emplea casi siempre 50-60 ciclos. Para los motores de corriente directa la frecuencia no está precisamente ligada con su funcionamiento, sino con el PWM (modulación por ancho de pulso).
- **VELOCIDAD:** La velocidad de rotación indica el número de vueltas por unidad de tiempo que produce el motor y depende por completo de la forma de construcción del mismo, de la tensión de alimentación, así como de la carga mecánica que se acople a su eje, aunque esto último no es aplicable a un tipo especial de motores denominados síncronos. Las unidades empleadas son las revoluciones por minuto (r.p.m.) y las revoluciones por segundo (r.p.s.).

Las velocidades a plena carga con las cuales se designan los motores de corriente directa se extienden en un amplio margen debido a los efectos de la fuerza centrífuga, los motores de gran tamaño están limitados a velocidades inferiores que los de tamaño pequeño, cuando se necesitan velocidades muy bajas, es más ventajoso emplear un motor de mayor velocidad y dotarle de un sistema de engranaje de reducción.

- **PAR:** Se llama así a la medida del efecto de torsión producido en el eje del motor. El concepto de par motor es importante a la hora de elegir un modelo para una aplicación determinada; se define como la fuerza que es capaz de vencer el motor multiplicada por el radio de giro. Esto significa que no supone lo mismo mover, por ejemplo, una polea que transmita una fuerza de 10kg., con un radio de 5cm. que con otro radio de 10cm., ya que el par motor será en el segundo caso el doble que en el primero. Las unidades de medida suelen ser el Kg. x cm o bien, el g x cm.

El **par motor** expresa la fuerza de actuación de éste y depende de la potencia que sea capaz de desarrollar dicho motor, así como de la velocidad de rotación del mismo.

Existe una relación matemática que liga ambos parámetros, ya que como se ha explicado no son independientes entre sí; dicha relación se expresa por la siguiente fórmula. [18]

$$M = 0.95 * \left(\frac{P}{N} \right)$$

Donde:

M es el par motor expresado en Kg. por cm.,

P es la potencia absorbida en Watts y

N es la velocidad en revoluciones por minuto.

5.2 MOTORES DE CD.

En todos los ámbitos de la vida moderna podemos encontrar hoy en día muchos dispositivos y equipos que emplean motores eléctricos de diversos modelos, tamaños y potencias para realizar un determinado trabajo. Todos ellos, sin excepción, funcionan con corriente alterna (CA.), o de lo contrario con corriente directa (CD.), conocida también como corriente continua (CC.). Sin embargo, la mayoría de los dispositivos y equipos que requieren poca potencia para poner en funcionamiento sus mecanismos emplean solamente motores de corriente directa de pequeño tamaño, que utilizan como fuente suministradora de corriente eléctrica o fuerza electromotriz (FEM.) pilas, baterías, o un convertidor de corriente alterna en directa.



Figura 5.1. Micro motores DC o CC de los usados en robótica.

Los Motores de Corriente Continua (CC o CD) tienen como principales características que permiten regular la velocidad de rotación del eje en todo momento y tener un torque de arranque elevado. Este tipo de motores se utilizan en trenes, automóviles eléctricos y en general, se empleará este tipo de motores en todos aquellos casos en los que la fuente de alimentación sea de tipo continua, por ejemplo pilas, baterías, etc.

Muchos coches y otros vehículos de transporte utilizan también motores de corriente directa para accionar los limpiaparabrisas, elevadores eléctricos, así como el ventilador de enfriamiento del motor de combustión interna de gasolina o de petróleo.

Este tipo de motores necesitan para funcionar un circuito eléctrico y un campo magnético que se obtienen con un imán o con un electroimán. El campo magnético generado permite la transformación de la energía eléctrica recibida por la armadura en energía mecánica entregada a través del eje.

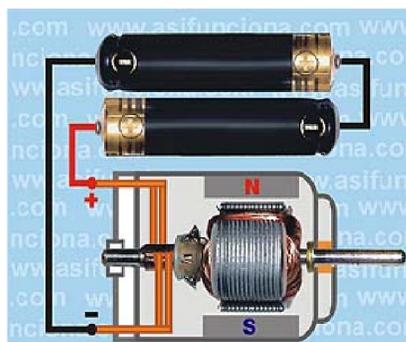


Figura 5.2. Vista interna de un pequeño motor de corriente directa (CD) de 3 Volts, alimentado por dos pilas tipo AA de 1.5 V cada una, conectadas en serie.



Figura 5.3. Dimensiones de un pequeño motor comparado con los dedos de una mano.

Para accionar un motor de CD solo es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para invertir el sentido de giro basta con invertir la alimentación y el motor comenzará a girar en sentido opuesto. Este tipo de motores gira a la máxima velocidad y en el sentido que la alimentación se los permite.

Los motores de corriente continua se dividen en:

- a) Motores de CD de excitación independiente que a su vez se divide en: motores de imán permanente y motores electromagnéticos (excitación independiente)
- b) Motores de CD auto-exitados, que se dividen en: conexión serie, conexión paralelo y conexión compuesta.

5.2.1 PARTES QUE INTEGRAN UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

El motor de corriente continua está formado de dos piezas fundamentales: **Rotor** y **Estator**.

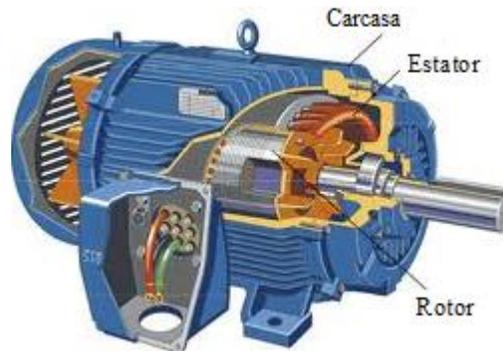


Figura 5.4 Partes de un motor de corriente directa.

Dentro de éstas se ubican los demás componentes como:

- 1. Escobillas y portaescobillas
- 2. Colector
- 3. Eje
- 4. Núcleo y devanado del rotor
- 5. Imán Permanente
- 6. Armazón
- 7. Tapas o campanas

La siguiente tabla muestra la distribución de las piezas del motor

ROTOR	ESTATOR
Eje	Armazón
Núcleo y Devanado	Imán Permanente
Colector	Escobillas y portaescobillas
	Tapas

Tabla 5.1. Piezas de un motor de CD.

El **Rotor** constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga. Esta formado por:

- Eje:** Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.
- Núcleo:** Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.

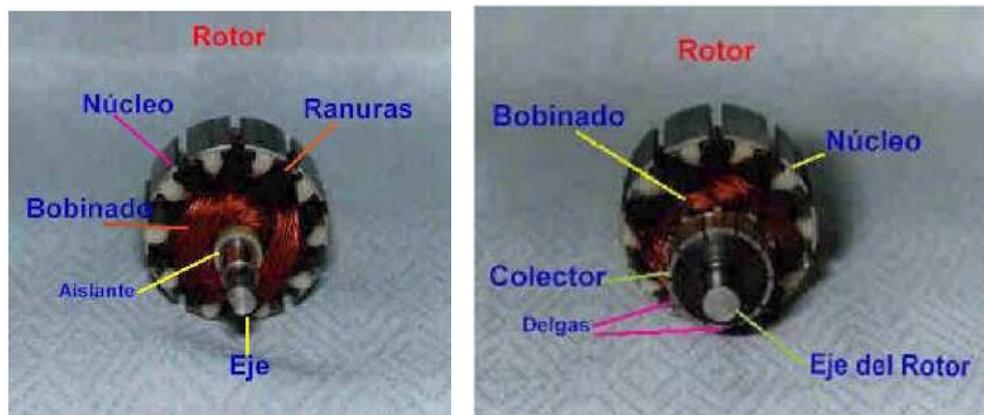


Figura 5.5 Estructura del rotor de un motor de Corriente Directa.

Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo. El acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis. Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

- Devanado:** Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura.

Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.

- Colector:** Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas. La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos).

El **Estator** constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio. Está formado por:

- a. **Armazón:** Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales: servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético.
- b. **Imán permanente:** Compuesto de material ferromagnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.
- c. **Escobillas:** Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por los porta escobillas. Ambos, escobillas y porta escobillas, se encuentran en una de las tapas del estator.



Figura 5.6 Estructura del Estator de un motor de CD.

La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor.

El porta escobillas mantiene a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto. [19]

5.2.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

Un motor de corriente continua se compone de un imán fijo o electroimán que constituye el inductor o estator y un bobinado llamado inducido o rotor que es capaz de girar en el interior del primero, cuando recibe una corriente continua de excitación.

Si sobre la bobina se hace pasar una corriente se creará en la misma un campo magnético que la hará girar al crearse unas fuerzas de atracción y repulsión con respecto al imán del estator. Durante este giro se producen una serie de efectos que condicionan la construcción del motor, el primero de ellos se produce cuando se enfrentan dos polos de distinto signo, momento en que la atracción será máxima y la bobina tiende a detenerse, sin embargo, por inercia pasará de largo pero el sentido de giro se invertirá

y volverá hacia atrás deteniéndose al cabo de unas cuantas oscilaciones. Ahora bien si en el momento en que los polos opuestos se enfrentan, se invierte el sentido de circulación de la corriente en la bobina, automáticamente se producirá un cambio de signo en los polos magnéticos creados por la misma, dando origen a que aparezcan unas fuerzas de repulsión entre ellos que obligarán a aquella a seguir girando otra media vuelta, debiéndose invertir la corriente nuevamente y así sucesivamente.

El método empleado para producir estos cambios es el de dividir el anillo colector, por el que recibe la bobina la corriente de alimentación, en dos mitades iguales separadas por un material aislante, que giran deslizándose sobre dos contactos eléctricos fijos o escobillas, uno conectado al polo positivo y el otro al negativo. De esta forma, dichos contactos cruzarán dos veces por cada rotación la división entre los semianillos, invirtiéndose así el sentido de circulación de la corriente de la bobina.

El principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente directa o continua se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje. Este electroimán se denomina “rotor” y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor.

Cuando la corriente eléctrica circula por la bobina de este electroimán giratorio, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético del imán permanente. Si los polos del imán permanente y del electroimán giratorio coinciden, se produce un rechazo y un torque magnético o par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj en unos casos, o en sentido contrario, de acuerdo con la forma que se encuentre conectada al circuito la pila o la batería.

Función del colector o conmutador en el motor de CD.

En la figura 5.8 se representa, de forma esquemática y simplificada, la vista frontal de un colector seccionado en dos partes, perteneciente a un motor de corriente directa (CD.) muy simple. También se muestra el enrollado de la bobina del electroimán que gira a modo de rotor, mostrada con un color diferente en cada una de sus mitades. Una de las mitades se representa por un círculo rojo y la otra por un círculo azul, identificados como “1” y “2”. Como se puede ver, una de los terminales de dicha bobina se encuentra conectada a la sección “a” del colector y la otra terminal a la sección “b”.

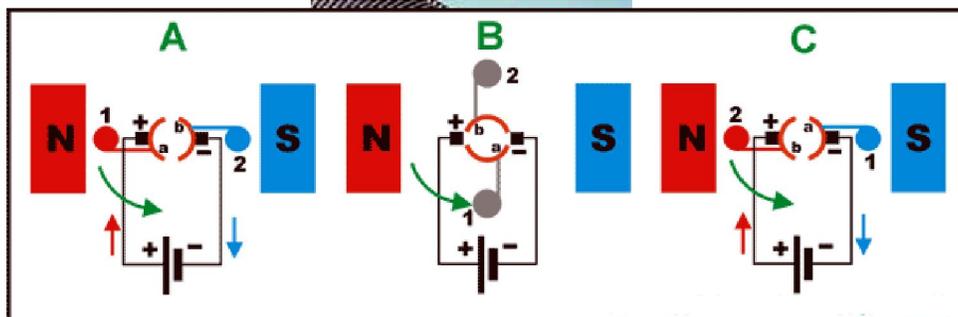


Figura 5.7 Vista frontal de un colector seccionado en dos partes, perteneciente a un motor de corriente directa (CD) simple.

En el motor de corriente directa el colector o conmutador sirve para conmutar o cambiar constantemente sentido de circulación de la corriente eléctrica a través del enrollado de la bobina del

rotor cada vez que completa media vuelta. De esa forma el polo norte del electroimán coincidirá siempre con el también polo norte del imán permanente y el polo sur con el polo sur del propio imán. Al coincidir siempre dos polos magnéticos, que en todo momento van a ser iguales, se produce un rechazo constante entre ambos, lo que permite al rotor mantenerse girando ininterrumpidamente sobre su eje durante todo el tiempo que se encuentre conectado a la corriente eléctrica.

Tal como se observa en la figura 5.8, en el punto “A”, la bobina del electroimán se encuentra colocada entre los polos norte “N” y sur “S” del campo magnético del imán permanente. A su vez, el polo positivo (+) de la batería se encuentra conectado siguiendo el sentido convencional de la corriente (del signo positivo al negativo) en la mitad “a” del colector a través de la escobilla identificada también con el signo (+). De esa forma la mitad de la bobina de color rojo (1) se energiza positivamente para formar el polo norte “N”, mientras que la otra mitad, la de color azul (2) se energiza negativamente para formar el polo sur “S”.

Como resultado, cuando en el electroimán se forma el polo norte, de inmediato el también polo norte del imán permanente lo rechaza. Al mismo tiempo el polo sur que se forma en el extremo opuesto, es rechazado igualmente por el polo sur del propio imán; por tanto se produce una fuerza de repulsión en ambos extremos del rotor al enfrentarse y coincidir con dos polos iguales en el imán permanente. Si bajo esas condiciones aplicamos la “Regla de la mano izquierda” y tomamos como referencia, por ejemplo, la parte de la bobina donde se ha formado el polo norte en el electroimán, comprobaremos que al romper la inercia inicial, comenzará a girar en dirección contraria a las manecillas del reloj, como indica la flecha de color verde.

Una vez que la bobina del electroimán gira y asume una posición vertical (como se muestra en la parte “B” de la figura 5.8), las escobillas dejan de hacer contacto con ambos segmentos del colector. En esa posición neutra la corriente que suministra la batería deja de circular y la bobina se des-energiza, por lo que ambos extremos del electroimán pierden momentáneamente sus polos magnéticos. No obstante, debido a la fuerza de inercia o impulso de giro que mantiene el electroimán, esa posición la rebasa de inmediato y sus extremos pasan a ocupar la posición opuesta a la que tenían, tal como se muestra en la parte “C” de la figura citada.

Ahora en “C” se puede ver que la mitad de la bobina que anteriormente tenía color azul (2) con polaridad sur cuando se encontraba situada a la derecha del eje del rotor pasa a ocupar la parte izquierda junto con la mitad (b) del colector al que se encuentra conectado. Esa parte de la bobina que ha girado, al ocupar ahora la posición opuesta, se convierte en el polo norte (2) del electroimán por lo que es rechazado de nuevo por el polo norte del imán permanente, que como ya se explicó se encuentra fijo al cuerpo del motor. De manera inmediata el electroimán, al continuar girando y dar otra media vuelta, pasa de nuevo por la zona neutra (como en “B”) repitiéndose de nuevo el mismo ciclo. Esos cambios continuos en los polos del electroimán del rotor que proporciona el colector, son los que permiten que se mantenga girando de forma ininterrumpida mientras se mantenga energizado.

En resumen, la función del colector es permitir el cambio constante de polaridad de la corriente en la bobina del electroimán del rotor para que sus polos cambien constantemente. Este cambio ocurre cada vez que el electroimán gira media vuelta y pasa por la zona neutra, momento en que sus polos cambian para que se pueda mantener el rechazo que proporciona el imán permanente. Esto permitirá que el electroimán del rotor se mantenga girando constantemente durante todo el tiempo que la batería o

fuerza de fuerza electromotriz (FEM.) se mantenga conectada al circuito del motor, suministrándole corriente eléctrica.

En la figura 5.9 se muestra, de forma esquemática y simplificada, un motor común de corriente directa (CD.) con un rotor formado por una simple bobina de una sola espira de color rojo y azul, para diferenciar cada mitad. Si seguimos el recorrido de la corriente eléctrica (I) asumiendo que fluye en el sentido convencional (del polo positivo "+" al polo negativo "-" de la batería, según indican las flechas negras), cuando en la mitad izquierda de la espira de color rojo se forma el polo norte "N" coincidiendo con la misma polaridad del campo magnético del imán permanente fijo al cuerpo del motor, se produce una fuerza de rechazo entre ambos polos iguales. Si aplicamos la "Regla de la mano izquierda" se puede determinar que esa mitad de la espira se moverá hacia abajo (flecha verde izquierda). Por otra parte, en la mitad derecha (de color azul) ocurrirá lo mismo, pero a la inversa, por lo que aplicando la propia regla comprobaremos que se moverá hacia arriba (flecha verde derecha).

La combinación de esas dos fuerzas o vectores actuando de forma opuesta y al unísono (de acuerdo con la Fuerza de Lorentz), provocará que el electroimán del rotor, formado aquí por esa simple espira, comience a girar en torno a su eje imaginario (representado por una línea de puntos en la figura 5.9) en dirección contraria a las manecillas de reloj en este ejemplo. Ese movimiento de rotación se encuentra señalado por la flecha negra en forma de semicírculo, que se encuentra dibujada al fondo de la espira.

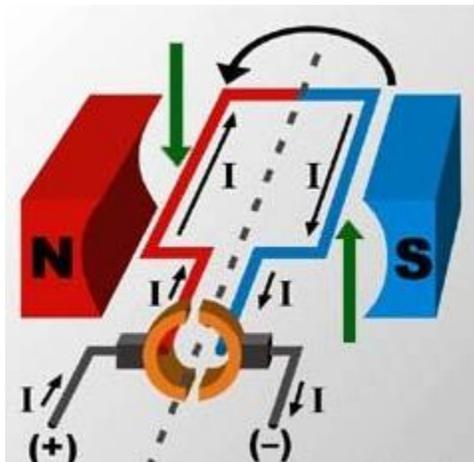


Figura 5.8 Forma esquemática y simplificada de un motor de CD.

5.3 PROTECCIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

Las anomalías más frecuentes en las instalaciones de motores eléctricos suelen ser las sobrecargas. Por ello, habrá que prestar especial atención a las protecciones de estas.

La protección de los motores es una función esencial para asegurar la continuidad del funcionamiento de las máquinas. La elección de los dispositivos de protección debe hacerse con sumo cuidado.

CONDICIONES ADVERSAS QUE PUEDEN AFECTAR A LOS MOTORES

El suministro de la electricidad no es infalible, como todo sistema está sujeto a fluctuaciones o condiciones anormales que podrían afectar los motores eléctricos. Por tal razón, es recomendable

asesorarse con un profesional, en la selección de la protección más adecuada y económica para los motores. Hay dispositivos que permiten que los motores se desconecten automáticamente del sistema, en el momento que presenten condiciones anormales en el suministro de energía eléctrica, que puedan dañar sus motores. El costo de estos dispositivos debe considerarse como un seguro, que evita tener que realizar erogaciones costosas en reparación, rebobinado o reemplazo del motor.

Las condiciones que se enumeran a continuación, son factores que pueden afectar adversamente los motores eléctricos:

- Bajo voltaje
- Recierre automático de los circuitos de distribución, el cual es una maniobra normal que realiza la empresa de distribución para restaurar el suministro de electricidad rápidamente
- Desbalances en el nivel de tensión
- Pérdida de una fase del sistema
- Inversión de la fase
- Sobre corrientes
- Sobrecarga (Stalling)

Es posible que no sea necesario proteger los motores contra todas las condiciones mencionadas anteriormente, pero es recomendable buscar consejo profesional para proteger los motores de una manera óptima y económica.

Cada dispositivo de protección esta diseñado para servir a un propósito específico o satisfacer una necesidad especial. No hay ningún dispositivo de protección único, que por sí solo sea el remedio o la solución para todos los problemas.

Por lo tanto, es esencial realizar un análisis de cada uno de los problemas de protección y que éstos sean entendidos completamente, para que los dispositivos de protección puedan ser utilizados sabia y juiciosamente.

Se puede lograr un balance económico en la selección de una protección adecuada para los motores, a continuación se presenta un cuadro resumen con las condiciones adversas más frecuentes que podrían afectar la operación de un motor eléctrico y una guía de los dispositivos de protección diseñados para salvaguardar el motor y su maquinaria asociada. En cada caso el dispositivo se inserta en la línea o circuito del motor a ser protegido. [20]

Condiciones Adversas	Efectos	Protección
Bajo Voltaje	Esta condición puede causar que el motor trabaje forzado o se detenga y cause sobrecalentamiento. Esto induce que el motor se deteriore o se queme.	El relé de bajo voltaje desconecta el motor de la fuente de energía, con la capacidad de restablecer el suministro cuando el voltaje vuelva a su condición normal.
Recierre automático del sistema de distribución, después de la pérdida inicial.	Esta condición es especialmente peligrosa para los motores que operan cargas de compresores. Porque la re-energización de los motores con cargas pesadas puede ocasionar sobrecalentamiento, lo cual induce una disminución en la vida útil del motor o provoca que se queme.	Un relé temporizado podría prevenir la re-energización del motor, cuando se restablece el suministro de energía eléctrica. Este relé debe ser ajustado en el tiempo de tal manera que el compresor regrese a su condición de operación adecuada, antes de que reinicie su operación.
Desbalance en el nivel de tensión	Esta condición ocasiona que la temperatura se incremente en el embobinado del motor, lo que causa una disminución en la vida útil y desperdicio de energía.	Un relé de desbalance trifásico (relé de secuencia negativa) para desconectar la fuente. El ajuste y calibración de este relé requiere de ayuda profesional.
Pérdida de una fase del sistema	Esta es la peor condición de un desbalance de fase. Puede ocurrir cuando un fusible se quema. Esta condición puede causar sobrecalentamiento, lo que induce un deterioro en la vida útil del motor. Si esta condición permanece un periodo de tiempo largo, causará que el motor se queme.	Relé de pérdida de fase para desconectar la fuente, hasta que las condiciones vuelvan a la normalidad.
Inversión de la fase	Esta condición ocasiona que los motores roten en dirección opuesta, lo cual puede causar lesiones al personal de operación y desperfectos al equipo.	Relé de protección de inversión de fase para desconectar la fuente.
Sobrecorriente	Corrientes excesiva en el circuito provocan sobrecalentamiento y deterioro en la vida útil del motor.	Relé de sobre corriente para dar una alarma o desconectar el motor de la fuente, hasta que las condiciones vuelvan a la normalidad.
Sobrecarga (Stalling)	Esta condición ocurre cuando el motor no tiene la capacidad para mover la carga conectada. Esto causa un calor excesivo en el motor, lo cual induce un deterioro en la vida útil del motor y/o que el motor se queme.	Relé sobrecarga (stalling) para desconectar el motor de la fuente.

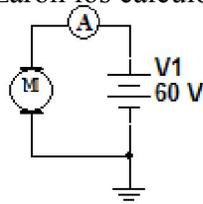
Tabla 5.2. Condiciones adversas más frecuentes que podrían afectar la operación de un motor eléctrico.

CAPITULO VI

DISEÑO Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL

6.1 MEDICIONES PRÁCTICAS.

Para conocer la corriente que circula por el motor de CD de 1 HP, se llevaron a cabo las siguientes mediciones y se realizaron los cálculos que se presentan a continuación:

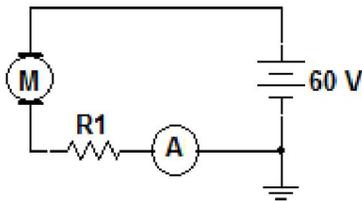


$$V = V_M$$

$$60 \text{ V} = (R_M) (I)$$

$$R_M = \frac{60}{I} = \frac{60}{6.25} = 9.6 \ \Omega$$

Nota: El valor de la corriente se tomó de los datos que trae el motor en la carcasa.



$$V = V_M + V_R$$

$$60 \text{ V} = (R_M) (I) + (R) (I)$$

$$60 = I (R_M + R)$$

$$I = \frac{60}{R_M + R} = \frac{60}{9.6 + 1} \frac{V}{\Omega}$$

$$I = 5.66 \text{ A}$$

En la tabla 6.1 se observa el motor de CD con el que se llevaron a cabo las pruebas, se observa la potencia, el voltaje requerido para su alimentación, y el valor de la corriente se calculó con los datos de los valores conocidos de potencia y voltaje de alimentación.

Motor GR-M35SLP	Potencia (HP)	Voltaje de alimentación (V)	Corriente (A)
	1	120	6.21
	0.5	60	6.21

Tabla 6.1 Motor eléctrico utilizado en el laboratorio de Eléctrica-Electrónica

Para conocer la corriente que consume el motor, se realizan los siguientes cálculos:

De la fórmula para calcular la potencia, es posible obtener la corriente $I = \frac{P}{V}$.

Recordemos que la potencia está dada en watts; por lo que es necesario convertir los HP del motor de CD a watts (1Hp = 746 W).

$$I = \frac{(1 \text{ Hp})(746 \text{ Watts})}{120 \text{ V}} = \frac{746}{120} = 6.21 \text{ A}$$

$$I = \frac{(0.5 \text{ Hp})(746 \text{ Watts})}{60 \text{ V}} = \frac{373}{60} = 6.21 \text{ A}$$

6.2 CONTROLADOR PARA MOSFET/IGBT CON LA TÉCNICA DE EMPUJE DE CORRIENTE.

Cuando una tecnología se vuelve digital, cambia todo. El control digital de energía, en forma de electricidad, requiere de sensores inteligentes que adquieren voltaje y corriente, procesamiento digital de señal rápido para cambiar mediciones en bruto a información significativa, y circuitos especiales de fuente de poder en modo conmutado (SMPS) para dividir la potencia en pulsos que el sistema puede manipular.

La revolución digital de la energía es posible gracias a herramientas de software innovadoras, amplia potencia de cómputo, conexiones de Internet, sistemas especializados de hardware embebido, y ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

El facilitador tecnológico para la transferencia de energía eléctrica, mejor conocido como electrónica de potencia, son los transistores de potencia que convierten, controlan, manipulan y transfieren grandes cantidades de energía eléctrica. Estos dispositivos, básicamente son los IGBTs y MOSFETs.

Al mismo tiempo, el rendimiento de los procesadores embebidos y los arreglos de compuertas programables se está incrementando a tasas asombrosas.

Los procesadores modernos proporcionan una arquitectura ideal para sistemas de control de electrónica de potencia porque le permiten colocar moduladores de ancho de pulso digitales (DPWMs) de alta frecuencia y circuitería digital de control en hardware dedicado. [21]

Para eliminar inductancias parásitas que podrían causar la destrucción del transistor IGBT por los picos de voltaje, es recomendable utilizar “Capacitores Snubber”.

La forma básica para controlar la conmutación de un motor de CD es la técnica del PWM (modulación por ancho de pulso). Consta de un interruptor de silicio, un diodo de rueda libre, algunos capacitores para filtrar los picos de corriente y la electrónica para controlar la conmutación.

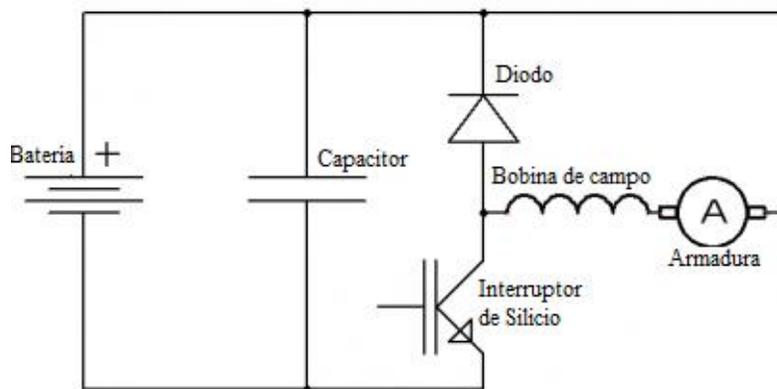


Figura 6.1 Diagrama del controlador de un motor de CD.

Para controlar un motor de CD con transistores IGBT se recomienda utilizar “Módulos”, ya que contienen un medio puente con diodos de rueda libre (del inglés fly wheel diode).

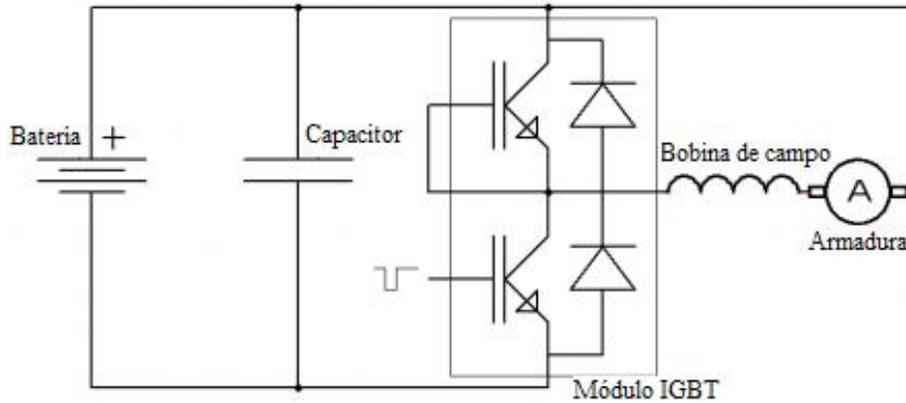


Figura 6.2 Control de un motor de CD con transistores IGBT (Módulo)

Existen dentro del desarrollo del proyecto dos opciones:

La primera es desarrollar, analizar y validar una interfase a nivel de protoboard con transistores Mosfet. La segunda es desarrollar, analizar y validar una interfase a nivel de protoboard con transistores IGBT. Una vez validadas las interfases a nivel protoboard, realizar el circuito impreso y conectar el motor.

Ambos presentan ventajas y desventajas:

- a) Costos
- b) Desarrollo / tiempo de aplicación
- c) Facilidad de reparación, sustitución de componentes en caso de fallas.
- d) Los módulos presentan un costo elevado, además de que es inevitable adquirir uno nuevo si el actual presenta fallas.

Existe suficiente literatura disponible sobre las características de los dispositivos de potencia tales como el MOSFET e IGBT. Sin embargo, aspectos prácticos de su control requiere que estudiantes, académicos e ingenieros de diseño pongan atención a los aspectos físicos de su funcionamiento.

Se sabe, que debido a la ausencia del transporte de portadores minoritarios, los MOSFET e IGBT pueden ser operados en forma conmutada, pero deben considerarse los siguientes factores para su correcta operación [22]:

- (a) tiempo de tránsito de los electrones a través del dispositivo.
- (b) tiempo requerido de carga y descarga del capacitor interno de entrada C_{GS} .
- (c) el capacitor C_{GS} necesita ser primero cargado a un nivel de voltaje umbral crítico $V_{GS(th)}$, antes de que el flujo de corriente en un MOSFET y/o IGBT pueda iniciar su recorrido.

En la figura 6.3, se muestra una configuración que funciona como controlador para dispositivos MOSFET/IGBT con la técnica de empuje de corriente.

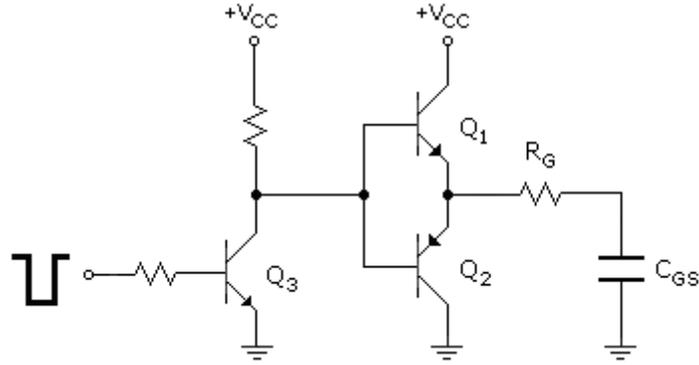


Figura 6.3 Controlador basado en la técnica de empuje de corriente.

Enseguida se explica cómo funciona el circuito de la figura 6.3, cuando se aplica un pulso cuadrado, durante el encendido y apagado del dispositivo.

Para comprender el proceso de encendido de un dispositivo de potencia, sea MOSFET y/o IGBT, se hace referencia al circuito de la figura 6.4(a). En la figura, se observa que cuando se aplica un pulso cuadrado en estado apagado, el transistor Q₃ deja de conducir, logrando que el transistor Q₁ se encienda, ya que circula una corriente de polarización por su unión base-emisor, permitiendo que el transistor Q₁ cargue al capacitor C_{GS} vía el resistor R_{GS}, como se observa con las trayectorias de corriente en la figura 6.10 (a). Durante este proceso el transistor Q₂ se encuentra en estado apagado.

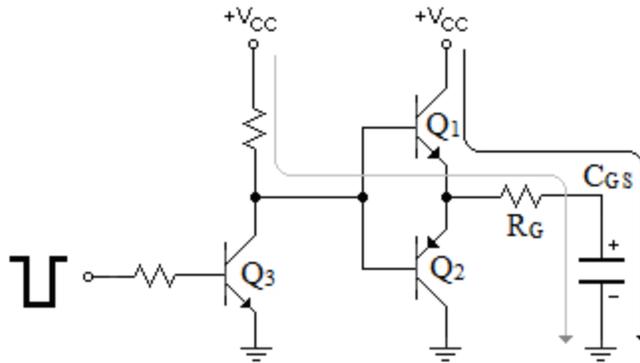


Figura 6.4 (a) Proceso de carga del capacitor C_{GS}

Mientras que para el proceso de apagado, como se observa en la figura 6.4 (b), puede ser explicado, cuando se aplica un pulso cuadrado en estado encendido, el transistor Q₃ conduce, logrando que el transistor Q₁ se apague. Debido a que ahora el transistor Q₂ se cierra, ya que circula una corriente de polarización por su unión base-emisor, esto permite que el capacitor C_{GS} pueda ser descargado vía el resistor R_{GS} y el transistor Q₂ con una constante de tiempo $\tau = R_{GS} C_{GS}$. Este proceso se ilustra con las trayectorias de corriente en la figura 6.4 (b).

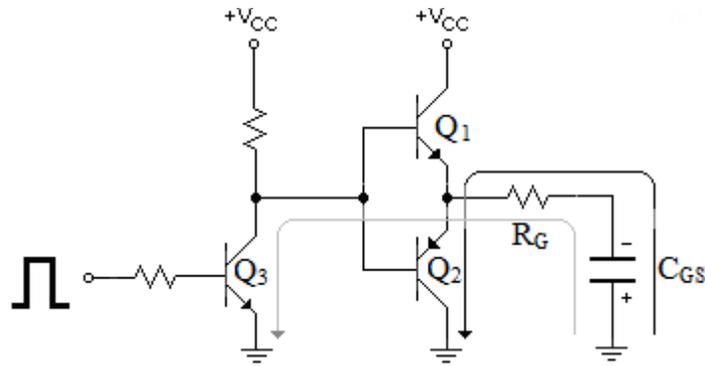


Figura 6.4 (b) Proceso de descarga del capacitor C_{GS}

6.3 INTERFASES ELECTRÓNICAS.

Tomando en consideración los antecedentes del capítulo 3, se propone un circuito simplificado que incorpora transistores MOSFET y otro circuito con IGBT. En la figura 6.5, se ilustra la configuración propuesta que puede satisfacer los requerimientos para el funcionamiento de la interfase electrónica a base de transistores MOSFET y en la figura 6.6, se muestra la interfase electrónica a base de un transistor IGBT.

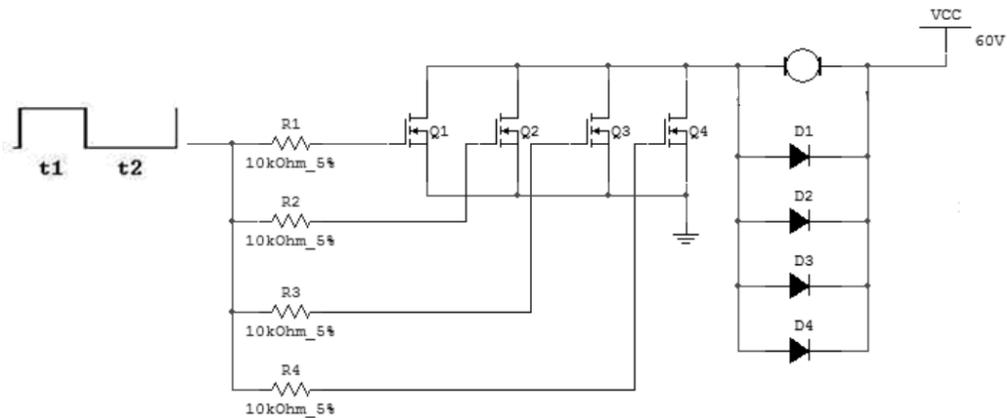


Figura 6.5 Diagrama eléctrico para variar la de velocidad de un motor de DC, 60 V @ 6.5 A, basado en transistores MOSFET.



Figura 6.6 Prototipo de Interfase a nivel de protoboard para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, basado en transistores MOSFET.

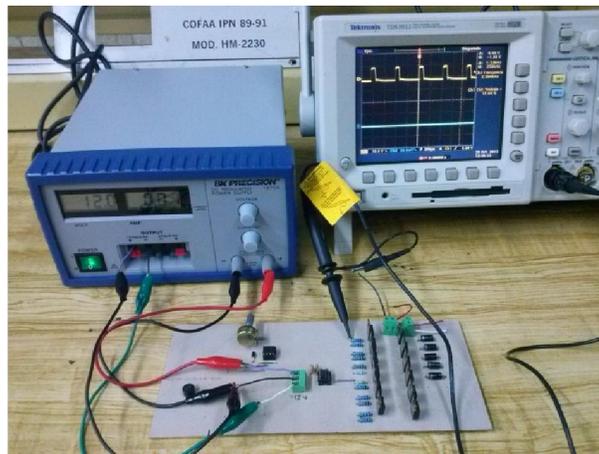


Figura 6.7 Prototipo en circuito impreso para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, basado en transistores MOSFET.



Figura 6.8 Prototipo en circuito impreso conectado al motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper.

A continuación se presenta el diagrama eléctrico de la interfase electrónica para controlar el motor de CD con un transistor IGBT.

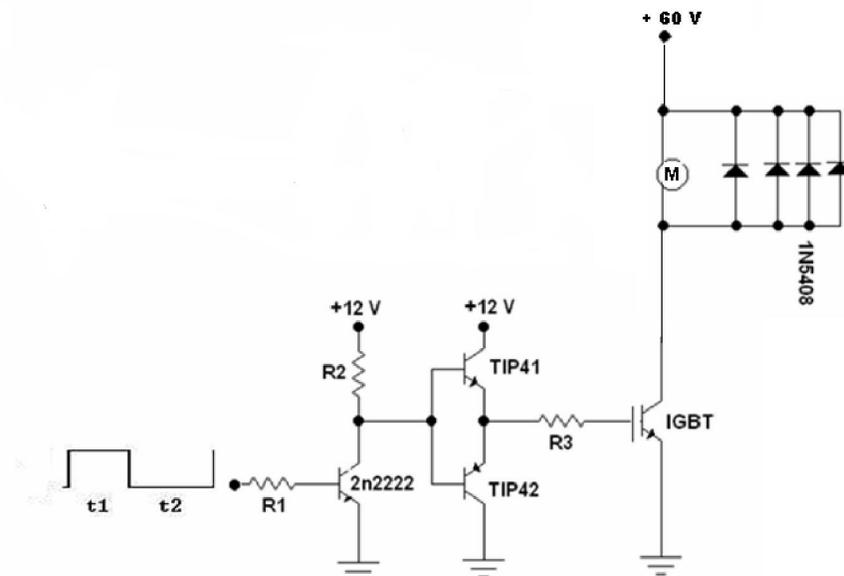


Figura 6.9 Diagrama eléctrico para variar la velocidad de un motor de CD, 60 V @ 6.5 A, basado en un IGBT.

Como interruptor electrónico en la interfase de la figura 6.5, se utiliza un transistor MOSFET con matrícula IRF640, y para la interfase de la figura 6.9, se utiliza un transistor IGBT con matrícula STGW30NC60WD, que por su alto voltaje de ruptura, capacidad de corriente y disipación de potencia, de acuerdo con la información del fabricante, cumple con los requisitos técnicos (voltaje máximo de operación, corriente de consumo y respuesta en frecuencia) para ser utilizado en las interfases electrónicas propuestas.

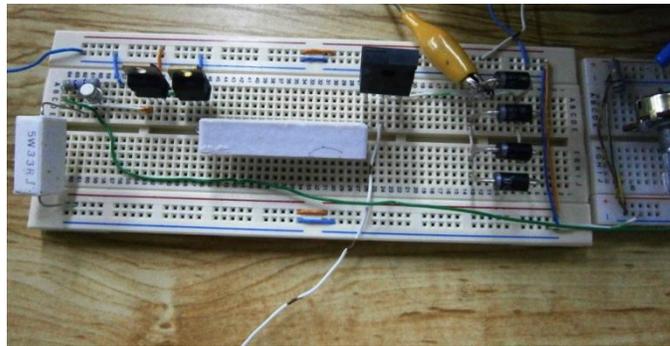


Figura 6.10 Prototipo de Interfase a nivel de protoboard para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, con transistor IGBT.

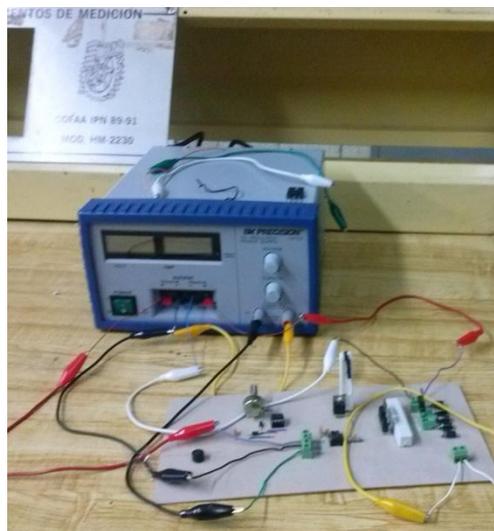


Figura 6.11 Prototipo en circuito impreso para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, con transistor IGBT.

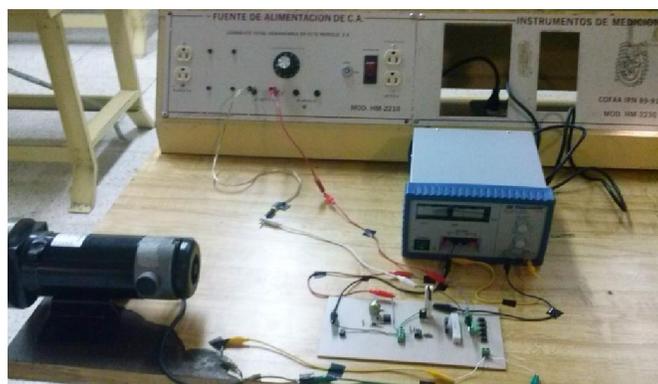


Figura 6.12 Prototipo con transistor IGBT en circuito impreso conectado al motor de CD.

6.4 MEDICIONES DE LABORATORIO.

Para realizar las pruebas experimentales es importante seguir las recomendaciones que se mencionan a continuación:

1. Encender en primera instancia la fuente que energiza el circuito de control (circuito generador de PWM). El diagrama electrónico del generador de onda PWM de bajo costo, se muestra en la figura 6.13. La conexión y comprobación de funcionamiento del circuito de la figura 6.13, se observan en la figura 6.14.
2. Posteriormente encender la fuente de alimentación del motor (60 V).

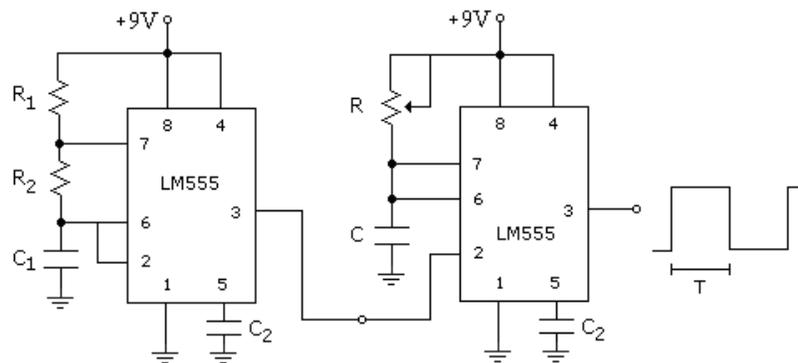
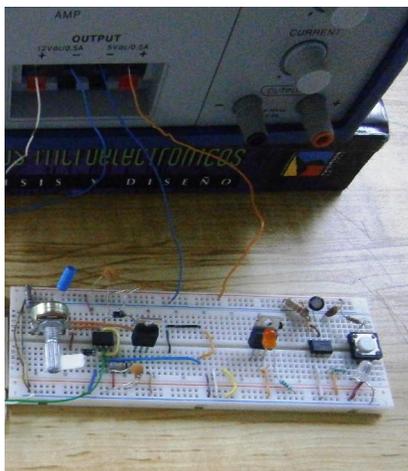
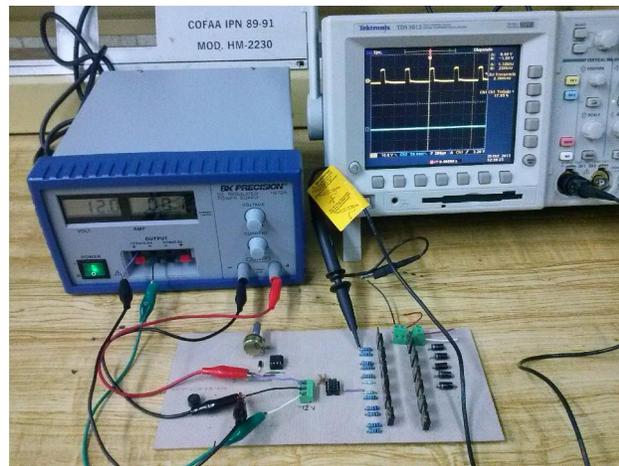


Figura 6.13 Diagrama electrónico del circuito generador de PWM de 2kHz.



(a)



(b)

Figura 6.14 (a) Conexión en protoboard para pruebas experimentales del circuito generador de PWM de 2kHz. (b) Circuito impreso PWM.



(a) Ancho de pulso mínimo



(b) Ancho de pulso Máximo

Figura 6.15 (a) Circuito generador de PWM cuando trabaja bajo condiciones de ancho de pulso mínimo y (b) Circuito generador de PWM con condiciones de ancho de pulso máximo.

Al concluir las pruebas del sistema, se requiere:

1. Apagar la fuente que alimenta el motor (60 V).
2. Enseguida apagar la fuente de alimentación del circuito de control.

Para comprobar el funcionamiento de un transistor como interruptor (observar figura 6.15), se realiza la siguiente prueba:

Se mide la resistencia que existe entre Drenador-Fuente (MOSFET) y/o Colector-Emisor (IGBT), si el valor de la resistencia es del orden de los mega ohms y/o kilo ohms, el transistor puede operar como interruptor, ya que debe comportarse como un circuito abierto, donde la $R \rightarrow \infty$, de lo contrario un MOSFET y/o IGBT está en corto y por ende ya no funciona.

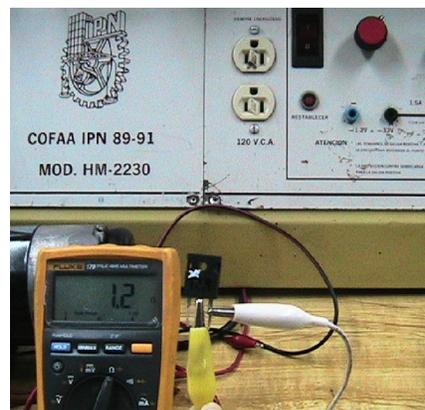
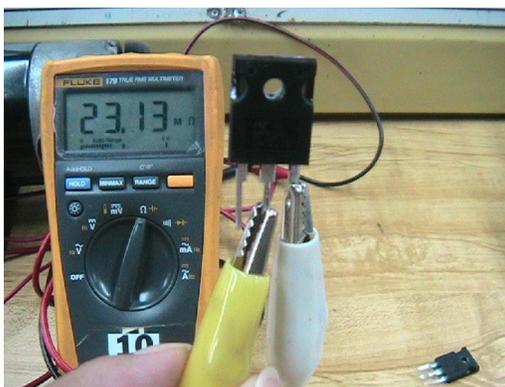


Figura 6.16 Comprobación del funcionamiento de un transistor como interruptor. (a) Transistor funcionando de manera correcta (La resistencia es en el orden de $M\Omega$), (b) Transistor en corto circuito (La resistencia es muy pequeña, en el orden de Ω).

Enseguida se muestran los resultados experimentales obtenidos de los prototipos construidos en el laboratorio y que permiten evaluar su operabilidad en el futuro, como **interfases electrónicas** para la variación de velocidad del motor eléctrico que se utilizará en el Go-Kart y en el vehículo SAE de la ESIME TICOMÁN. En la figura 6.17 se da a conocer el circuito completo del prototipo que fue estudiado en el laboratorio y sobre el cuál se realizaron las mediciones, sometiendo al circuito a diversas **condiciones de operación** para evaluar la disipación de calor de los MOSFETs e IGBTs, y conocer acerca de su estabilidad en operación.

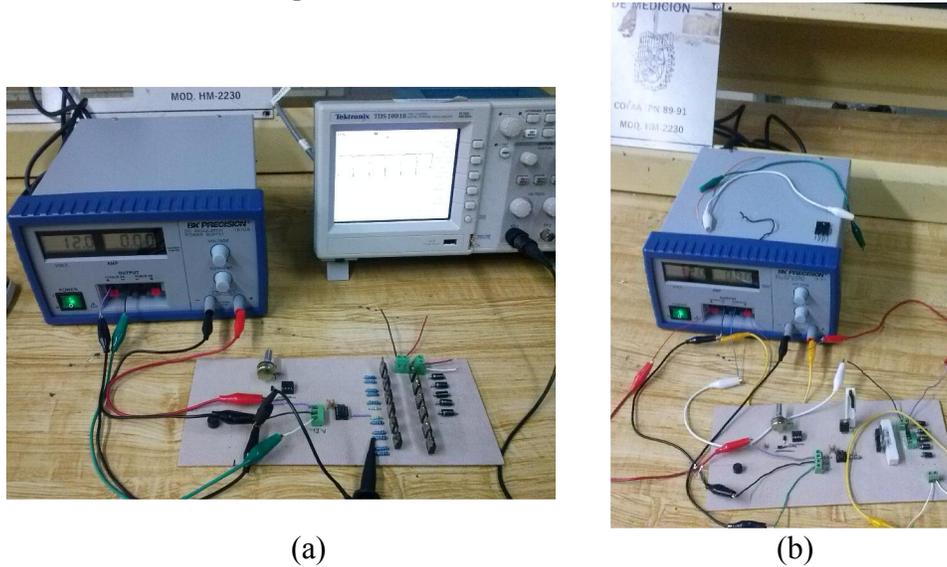


Figura 6.17. Circuito impreso para variar la velocidad de un motor de CD, 60 V @ 6.5 Amperes, con transistores Mosfet (a) e IGBT (b).

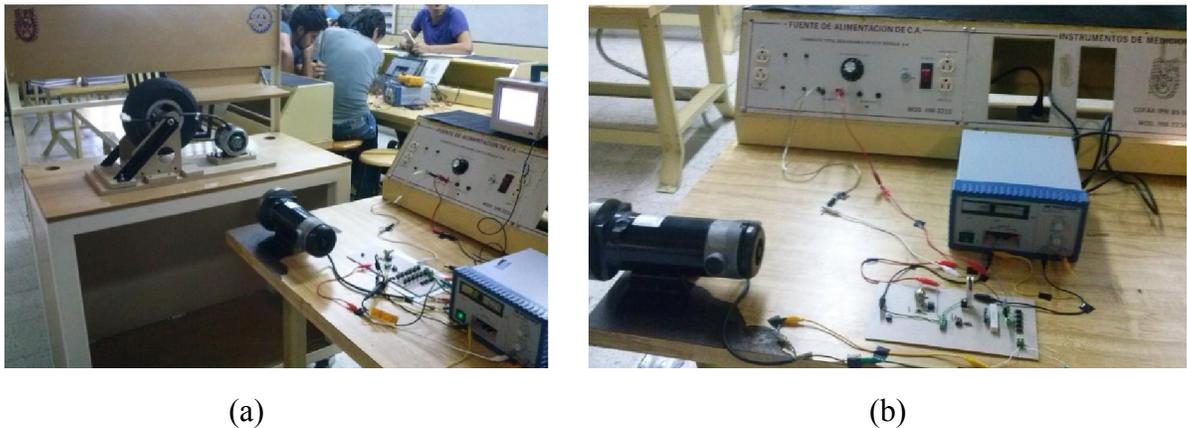
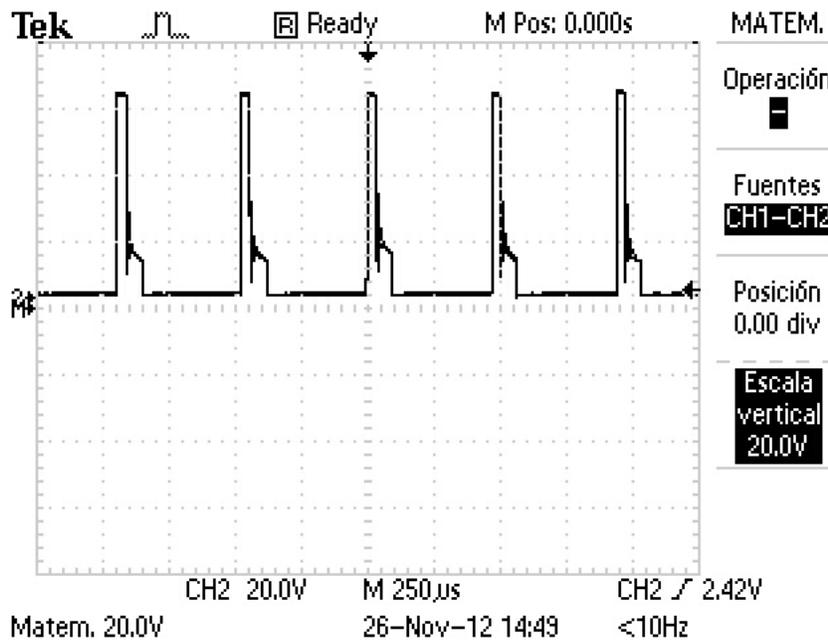
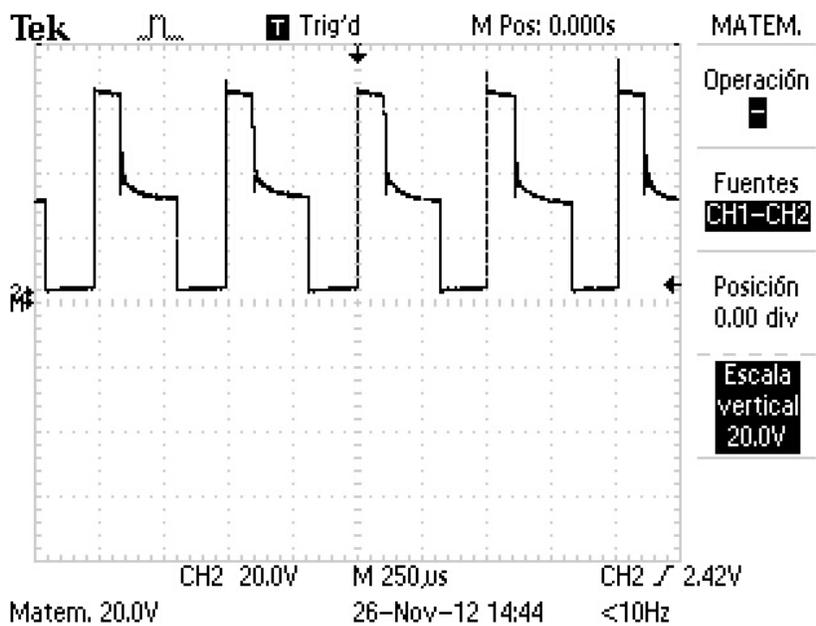


Figura 6.18. Pruebas experimentales con motor 60 V @ 6.5 A de 1 HP (a) Circuito con transistores Mosfet. (b) Circuito con transistor IGBT. . [Fuente de alimentación de las mesas de trabajo del laboratorio de la ESIME TICOMÁN].

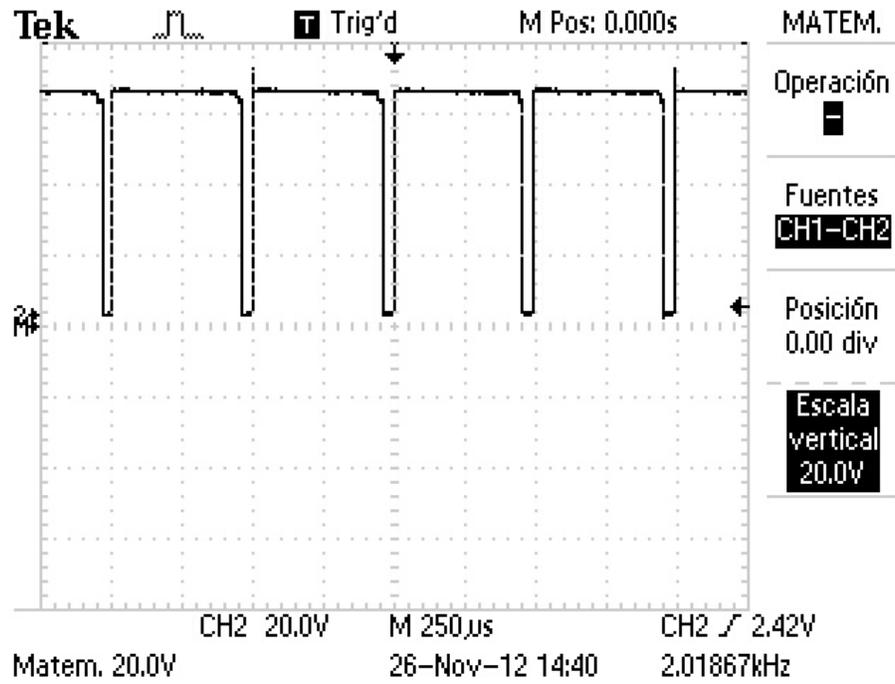
En la figura 6.19, se observan los oscilogramas de la señal de voltaje en el motor eléctrico, cuando éste fue sometido a tres velocidades de trabajo. En los oscilogramas se observa que la señal de voltaje que recibe el motor eléctrico es estable, ya que no existen perturbaciones o distorsiones severas en la forma de onda de la señal de voltaje. Bajo estas condiciones de operación los transistores MOSFET e IGBT trabajan con una baja disipación de calor, lo que asegura su correcta operación, cuando el motor eléctrico tenga como carga la estructura del go-kart (chasis).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.19. Oscilogramas de la señal de voltaje del motor eléctrico de 1HP para: (a) Baja velocidad, (b) media velocidad aproximadamente, y (c) máxima velocidad.

6.5 TRABAJO FUTURO.

Con los resultados alcanzados con este trabajo de tesis ya se tienen las bases para poder accionar a un vehículo Go-Kart en su primer etapa de desarrollo. Sin embargo, un vehículo eléctrico debe de poder emular en funcionalidad a un vehículo de combustión, por lo que es necesario como una etapa posterior a este trabajo de tesis, continuar con el desarrollo del diseño de un circuito de control avanzado para el cambio de sentido de giro del motor eléctrico, utilizando componentes electrónicos de bajo costo, bajo peso y de fácil adquisición en el mercado. En las figuras 6.20 y 6.21, se muestran los diagramas electrónicos de un circuito de control e **interfase avanzada** (driver) para el accionamiento de un motor eléctrico.

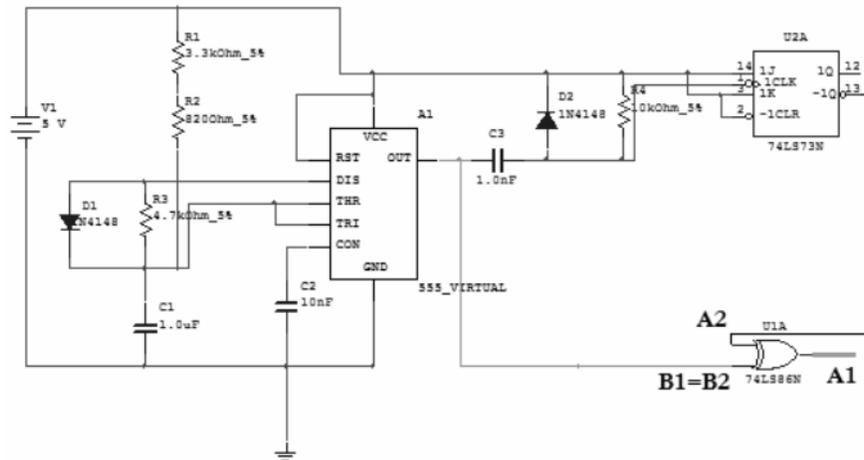


Figura 6.20 Diagrama electrónico para generar señales cuadradas a frecuencia fija.

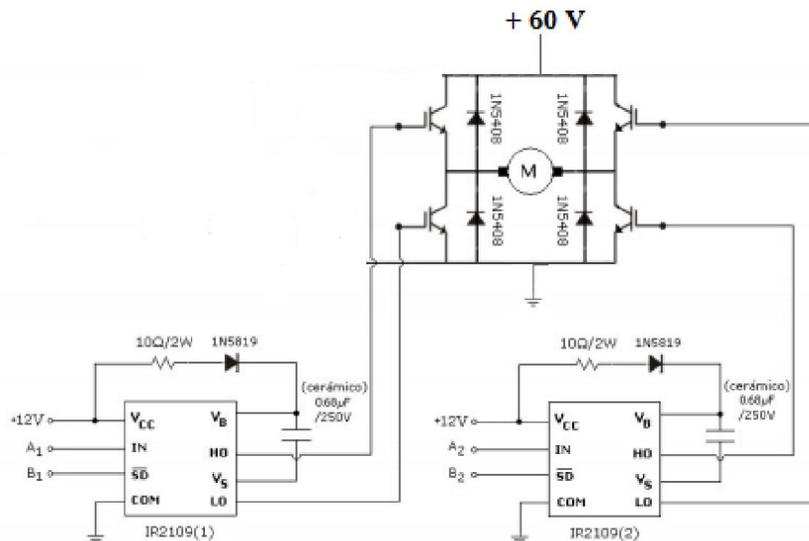


Figura 6.21 Diagrama electrónico de interfaces avanzadas (drivers) para IGBT's o MOSFET's, utilizando las señales generadas en el diagrama de la figura 6.20

CONCLUSIONES.

El proyecto que realizamos ha contribuido de manera muy importante para identificar y resaltar los puntos que hay que cubrir y considerar para llevar a cabo una implementación exitosa de un sistema de control electrónico para un motor de corriente directa de 1 HP de potencia. Nos deja muchas cosas importantes que reflexionar y muchas otras las ha reforzado como puntos angulares para llevar a cabo una buena implementación del sistema electrónico.

Dentro de los puntos que consideramos tienen más importancia dentro de este proyecto es el acondicionamiento de la señal y la etapa de potencia.

El diseño de la interfase es mejor que los módulos, desde el punto de vista económico ya que es más barato y si la interfase presenta fallas, es posible sustituir el elemento dañado; así como para investigar principios de funcionamiento para analizar el comportamiento de los elementos y verificar los conceptos teóricos.

Es el primer proyecto en el cual se trabaja con IGBT's en ESIME TICOMÁN, considerando que estos transistores son tecnología relativamente nueva.

A pesar de que los niveles de voltaje y corriente a los que está diseñado el transistor IGBT STGW30NC60WD que se utilizó en el proyecto (600 V @ 30 A), se dañaron 3 transistores, ya que en pruebas que se realizaron, no se conectaron los diodos de protección, faltó conectar el Cátodo del diodo a la terminal positiva de la fuente de voltaje de 60 V; la fuente utilizada es parte de las mesas de trabajo del Laboratorio de Eléctrica-Electrónica de la ESIME TICOMÁN, se utilizó esta fuente y no baterías debido a la falta de las mismas. Los diodos reducen el pico inverso que se forma en el motor (carga inductiva), y sin esa protección el IGBT o MOSFET pueden ser afectados prematuramente.

Se cumplió el objetivo del trabajo de tesis puesto que se validó la tarjeta de interfaz electrónica, ya que se desarrolló el hardware y se implementó la primera etapa de potencia.

Se presentaron funcionando las tarjetas a nivel de circuito impreso con los transistores MOSFET e IGBT respectivamente, controlando el motor ante los miembros de la Academia de Eléctrica-Electrónica de la ESIME TIC., a finales del mes de octubre del 2013, siendo éstas aprobadas para fines didácticos y de investigación.

APÉNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Nombre de la figura	Página
Figura 1.1 Torque que presenta el motor para cada uno de los controles mencionados (Control por corriente de campo o control por voltaje de armadura).	6
Figura 1.2 En la parte A de la figura se observa la velocidad máxima que se controla con PWM aproximadamente el 90% del tiempo encendido, en la parte B el 50% y en la parte C la velocidad mínima o el 10% del tiempo encendido.	7
Figura 1.3 Regulación del ancho de pulso para control de velocidad en motores de CD.	8
Figura 1.4 a) Circuito con carga inductiva, b) Característica de transferencia para el transistor en conmutación con carga inductiva.	10
Figura 2.1 Vehículo eléctrico (a) Prototipo Vehículo MiniE de la marca BMW que se utilizó en las instalaciones de ESIME TICOMÁN, (b) y (c) Conexión del vehículo a la red eléctrica, (d) Controlador del vehículo.	14
Figura 2.2 Estructura de una batería de Ácido-Plomo.	16
Figura 2.3 Mecanismo de descarga de una batería Li-Ion.	17
Figura 2.4 Batería VRLA.	19
Figura 3.1 Curva característica del diodo.	22
Figura 3.2 Representación de un transistor NPN y su diagrama de bandas de energía.	23
Figura 3.3 Circuito equivalente π -híbrido de un BJT.	24
Figura 3.4 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características del Transistor BJT.	24
Figura 3.5 Sección transversal de un transistor MOS.	25
Figura 3.6 Circuito equivalente de un transistor MOS.	25
Figura 3.7 Curva característica del transistor JFET.	26
Figura 3.8 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características del Transistor MOSFET.	27
Figura 3.9 Sección transversal de un transistor IGBT.	28
Figura 3.10 Circuito equivalente aproximado de un IGBT.	29

Figura 3.11 (a) Símbolo y (b, c) Curvas características de un transistor IGBT.	30
Figura 3.12 Comparación de características entre los dispositivos semiconductores.	30
Figura. 3.13 (a). Circuito RL activado con un interruptor SW.	31
Figura 3.14 Circuito RL para recuperar la energía almacenada en el inductor.	32
Figura 3.15 Interruptor electrónico con carga inductiva utilizando: (a) Transistor MOS y (b) Transistor bipolar de compuerta aislada.	33
Figura 4.1 Proceso controlado.	35
Figura 4.2 Sistema de control en lazo abierto (Sin retroalimentación).	35
Figura 4.3 Sistema de control de lazo cerrado retroalimentado.	35
Figura 4.4 Sistema de control multivariable.	36
Figura 4.5 Ejemplo de sistema de control.	37
Figura 4.6 Robot basado en el CompactRIO de National Instruments, Inc.	38
Figura 4.7 “The Rover”, vehículo diseñado por la NASA.	38
Fig. 4.8 (a) Circuito comparador de voltaje no inversor, y (b) Curvas de voltaje de salida y entrada, cuando se aplica un voltaje de referencia V_{ref} .	39
Fig. 4.9 (a) Circuito comparador de voltaje inversor, y (b) Curvas de voltaje de salida y entrada, cuando se aplica un voltaje de referencia V_{ref} .	40
Figura 4.10 Diagrama de bloques internos del temporizador LM555.	41
Figura 4.11 (a). Circuito para operación astable.	42
Figura 4.12(a). Circuito para operación monoestable.	43
Figura 4.13 Secuencia de señales del circuito de control con temporizadores.	44
Figura 4.14. Diagrama electrónico del circuito de control con temporizadores.	45
Figura 5.1. Micro motores DC o CC de los usados en robótica.	52

Figura 5.2. Vista interna de un pequeño motor de corriente directa (CD) de 3 Volts, alimentado por dos pilas tipo AA de 1.5 V cada una, conectadas en serie.	52
Figura 5.3. Dimensiones de un pequeño motor comparado con los dedos de una mano.	53
Figura 5.4 Partes de un motor de corriente directa.	53
Figura 5.5 Estructura del rotor de un motor de Corriente Directa.	54
Figura 5.6 Estructura del Estator de un motor de CD.	55
Figura 5.7 Vista frontal de un colector seccionado en dos partes, perteneciente a un motor de corriente directa (CD) simple.	56
Figura 5.8 Forma esquemática y simplificada de un motor de CD	58
Figura 6.1 Diagrama del controlador de un motor de CD.	63
Figura 6.2 Control de un motor de CD con transistores IGBT (Módulo)	64
Figura 6.3 Controlador basado en la técnica de empuje de corriente.	65
Figura 6.4 (a) Proceso de carga del capacitor C_{gs} .	65
Figura 6.5 Diagrama eléctrico para variar la de velocidad de un motor de DC, 60 V @ 6.5 A, basado en transistores MOSFET.	66
Figura 6.6 Prototipo de Interfase a nivel de protoboard para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, basado en transistores MOSFET.	67
Figura 6.7 Prototipo en circuito impreso para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, basado en transistores MOSFET.	67
Figura 6.8 Prototipo en circuito impreso conectado al motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper.	68
Figura 6.9 Diagrama eléctrico para variar la velocidad de un motor de CD, 60 V @ 6.5 A, basado en un IGBT.	68
Figura 6.10 Prototipo de Interfase a nivel de protoboard para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, con transistor IGBT.	69
Figura 6.11 Prototipo en circuito impreso para control de motor de CD 60 Volts @ 6.5 Amper, con transistor IGBT.	69

Figura 6.12 Prototipo con transistor IGBT en circuito impreso conectado al motor de CD.	69
Figura 6.13 Diagrama electrónico del circuito generador de PWM de 2kHz.	70
Figura 6.14 (a) Conexión en protoboard para pruebas experimentales del circuito generador de PWM de 2kHz . (b) Circuito impreso PWM.	70
Figura 6.15 (a) Circuito generador de PWM cuando trabaja bajo condiciones de ancho de pulso mínimo y (b) Circuito generador de PWM con condiciones de ancho de pulso máximo.	71
Figura 6.16 Comprobación del funcionamiento de un transistor como interruptor. (a) Transistor funcionando de manera correcta (La resistencia es en el orden de $M\Omega$), (b) Transistor en corto circuito (La resistencia es muy pequeña, en el orden de Ω).	72
Figura 6.17. Circuito impreso para variar la velocidad de un motor de CD, 60 V @ 6.5 Amperes, con transistores Mosfet (a) e IGBT (b).	72
Figura 6.18. Pruebas experimentales con motor 60 V @ 6.5 A de 1 HP (a) Circuito con transistores Mosfet. (b) Circuito con transistor IGBT. . [Fuente de alimentación de las mesas de trabajo del laboratorio de la ESIME TICOMÁN].	72
Figura 6.19. Oscilogramas de la señal de voltaje del motor eléctrico de 1HP para: (a) Baja velocidad, (b) media velocidad aproximadamente, y (c) máxima velocidad.	74
Figura 6.20 Diagrama electrónico para generar señales cuadradas a frecuencia fija.	75
Figura 6.21 Diagrama electrónico de interfaces avanzadas (drivers) para IGBT's o MOSFET's, utilizando las señales generadas en el diagrama de la figura 6.20	75
Tabla 2.1 Comparativo entre los diferentes tipos de baterías.	20
Tabla 4.1. Valor de los componentes utilizados.	47
Tabla 5.1. Piezas de un motor de CD	54
Tabla 5.2. Condiciones adversas más frecuentes que podrían afectar la operación de un motor eléctrico.	60
Tabla 6.1 Motor eléctrico utilizado en el laboratorio de Eléctrica-Electrónica	62

ESTRUCTURA MECÁNICA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Antes de desarrollar el circuito de control para el vehículo go-kart se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- Capacidad del motor eléctrico (HP's),
- Diseño y Peso de la estructura del go-kart (chasis)

Con respecto a la estructura del vehículo, se consideró en primera instancia un vehículo diseñado y elaborado por alumnos de la Esime Ticomán para participar en la competencia Electratón (figura A).

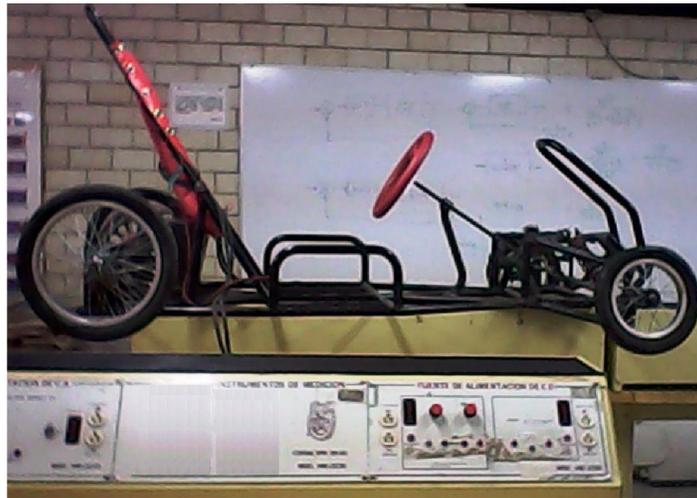


Figura A. Estructura del Go-Kart diseñado para el Electratón

Sin embargo, al realizar el análisis del diseño de la estructura se encontraron los siguientes inconvenientes mecánicos:

- a) La relación de los sprockets era muy pequeña, casi 1:1 como se observa en la figura B. Si se modificaba el tamaño de los sprockets era necesario modificar el eje de la parte posterior de la estructura, lo que no resultó viable para el desarrollo del proyecto.
- b) El chasis no tiene una estructura sólida, se comporta como una hoja de papel; falta soldar varillas para tener una estructura de cubo.

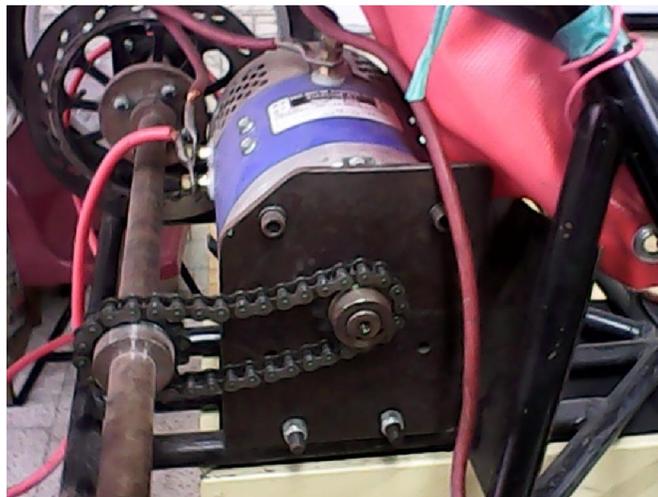


Figura B. Relación 1 a 1.5 de los sprockets del chasis en el Go-Kart.

Derivado de los inconvenientes encontrados con la estructura del vehículo Go-Kart diseñado para el Electrón, se optó por utilizar el vehículo de fórmula SAE (figura C), diseñado por estudiantes de la Esime-Ticomán; los alumnos realizaron la re-ingeniería del vehículo, desmontando el motor de combustión interna para adaptar el motor eléctrico, como se muestra en la figura D.

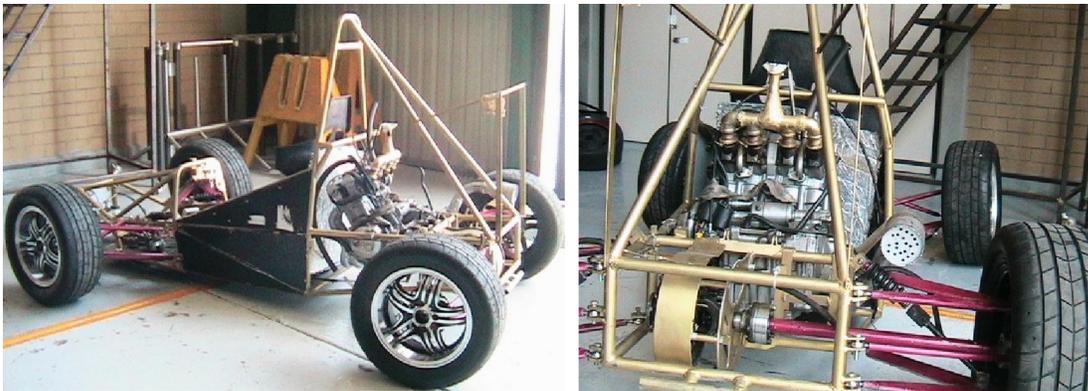
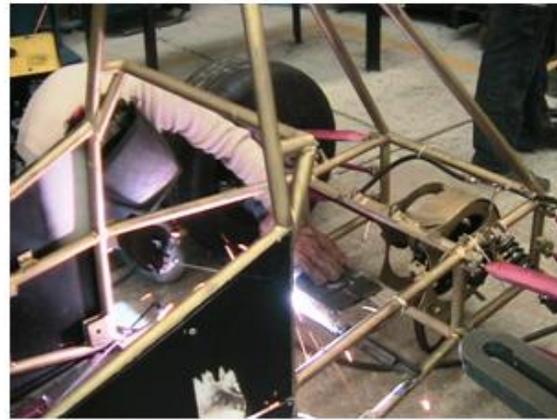


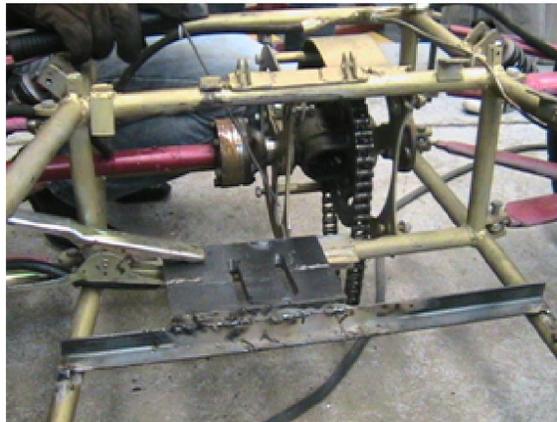
Figura C. Vehículo fórmula SAE, con motor de combustión interna.



(a)



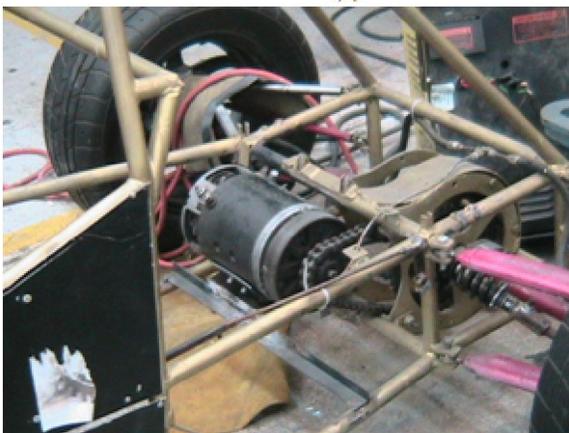
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura D. Re-ingeniería del Vehículo fórmula SAE

(d) El motor eléctrico de CD de 2.5 HP ya montado en el chasis. (e) La flecha del motor y el eje tienen una relación de catarinas (Sprockets) de 3.5 a 1.

Una vez solucionada la estructura del vehículo a utilizar en el desarrollo del proyecto de investigación, se llevaron a cabo diversas mediciones para validar la relación peso-potencia de diversos vehículos eléctricos (juguetes, go-kart eléctrico, mini E) y un vehículo de combustión interna comercial (Mazda), los resultados que se obtuvieron se muestran en la siguiente tabla.

	Peso (gr)	Potencia	Peso/Potencia Kg/HP
Araña Toy Electrical Vehicle 	21.2	150 m W	52
Hummer Toy Electrical Vehicle 	1500	28 W	40.5
GO Kart IPN Prototype Electrical Vehicle 	100000	2.5 HP	40
Mazda Internal Combustion Engine 	1 155 000	105 HP	11
Mini E Prototype BMW Electrical Vehicle 	1700000	204 HP	8.3

Tabla. Comparativo de relación Peso-Potencia de 4 vehículos eléctricos de diferentes aplicaciones y un vehículo de combustión interna (Mazda); utilizados en el análisis y diseño del desarrollo del proyecto IPN SIP 20121476.

De la tabla anterior, es claro que entre menor es el peso de los vehículos mayor es la potencia, esto se debe a que los vehículos de juguete y prototipos tienen menos o nulos sistemas de seguridad y confort.

Existen diversos prototipos de Go-Kart Eléctricos en todo el mundo, las siguientes imágenes se obtuvieron de un video que se encontró en la Web y el cual llamó la atención por el comparativo que hace entre los motores de un vehículo de combustión interna y el prototipo de un vehículo eléctrico*, desde el punto de vista de la EFICIENCIA.



Figura E. Potencia del motor que utiliza cada vehículo



Figura F. Peso por Hp que soporta el motor

*<http://www.youtube.com/watch?v=vRVNVMKCyP4>

BIBLIOGRAFÍA

- [3] El Transistor en Circuitos de Potencia. Autor: Ing. Alberto C. Galiano
- [4] Circuitos de Potencia de Estado Sólido. Manual para proyectistas / SP-52 / RCA. Editorial Arbo.
- [10] B. Jayant Baliga, Modern Power Devices, (John Wiley & Sons, 1992).
- [11] George Chryssis, High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design, McGraw-Hill, USA, 1989.
- [13] Paulino Sánchez Barrios, Maria de los Ángeles Cavia Soto, Alfred Ortiz Fernández, Mario Mañana Canteli, Luis Ignacio Eguíluz Morán, José Carlos Lavandero González, Teoría de Circuitos, Problemas y pruebas objetivas orientadas al aprendizaje, primera edición. (PEARSON, Prentice Hall, Educación, España, 2007) pp.139 - 185.
- [14] Modern Control System; Richard C. Dorf, Pearson, Prentice Hall, Eleventh Edition, pp. [2, 3, 4, 11, 12, 20, 21, 24, 25, 36]
- [15] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, Segunda edición. (Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1993) pp. 80 - 112.
- [16] National Semiconductor, “LM555 Timer,” Semiconductor Components Industries, July 2006, Publication Order Number: LM555.
- [21] Newsletter Instrumentation, La publicación Mundial Sobre Medición y Automatización, tercer trimestre 2012, Nacional Instruments, pp. 3,4.
- [22] George Chryssis, High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design, McGraw-Hill, USA, 1989.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [1] <http://www.wellnessproposals.com/safety/handouts/spstpelsafe.pdf>
- [2] http://expoelectronica.upbbga.edu.co/pdf_2003/0801.pdf
- [5] http://vehiculoselectricos.uvigo.es/archivos/breve_historia.html
- [6] <http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch05.pdf.pdf>
- [7] <http://energicentro.blogspot.mx/2007/11/batera-valvo-regulada-batera-vrla.html>
- [8] <http://www.amperonline.com/biblioteca/aspectos-baterias.pdf>
- [9] <http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch05.pdf.pdf>
- [12] <http://tec.upc.es/el/TEMA-2%20EP%20%28v1%29.pdf>
- [17] http://www.portalplanetasedna.com.ar/motor_electrico.html
- [18] http://www.uma.es/investigadores/grupos/electronica_potencia/documents/documentos/tema8_motores%20electricos.pdf
- [19] https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/motores_electricos.pdf
- [20] http://www.asep.gob.pa/electric/info_clientes/Motores.pdf