



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“Diseño y construcción de un vehículo eléctrico con variador de velocidad mediante un convertidor CD – CD”

Tesis para obtener el título de:

Ingeniero en Electrónica

Presenta:

Gerardo Israel Palafox Alvarado

Director de tesis:

M.C. Jacob J. Vásquez Sanjuán

Huajuapán de León, Oaxaca, diciembre de 2009.

Índice

Índice.....	vii
Índice de figuras y tablas	xi
Resumen	xv
Introducción.....	xvii
Objetivos	xxi
General.....	xxi
Específicos.....	xxi
Contenido de la tesis.....	xxiii
Capítulo 1	1
Marco Teórico	1
1. 1 Estado del arte	1
1. 1. 1 Introducción.....	1
1.1.2 Baterías	2
1.1.3 Propulsión eléctrica	3
1.1.4 Propulsión de los vehículos eléctricos	3
1. 1. 5 Motores.....	4
1. 2 Antecedentes.....	6
1. 2. 1 Historia de la electrónica de potencia.....	6
1. 2. 2 Dispositivos semiconductores de potencia	6
1. 2. 3 Características de control de dispositivos de potencia.....	10
1. 2. 4 Tipos de circuitos electrónicos de potencia.....	10
1. 3 Pulsadores de CD.....	11
1. 3. 1 Clasificación de pulsadores	11
1. 3. 1. 1 Pulsador de clase E.....	12

1. 3. 2 Diseño de un circuito pulsador	13
1. 4 Importancia del uso de motores eléctricos	14
1. 5 Necesidad del aumento de control de potencia	15
1. 6 Importancia del uso de controles de motor.....	15
1. 7 Disponibilidad de nuevas tecnologías.....	17
1. 7. 1 Circuitos integrados para el control de motores.....	18
1. 8 Tracción eléctrica	19
1. 8. 1. 1 Tipos de motores para automóviles eléctricos.....	19
1. 8. 1. 2 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores	20
1.9 Modelado matemático de motores de CD de imán permanente	21
Capitulo 2.....	27
Diseño del Sistema.....	27
2.1 Características específicas	27
2.2 Requerimientos y especificaciones	30
2.2.1 Diseño de la etapa lógica.....	31
2.2.2 Diseño de la etapa de acoplamiento	39
2.2.3 Diseño de la etapa de Potencia.....	43
Capitulo 3.....	45
Implementación del sistema	45
3.1 Implementación del sistema digital	45
3.2 Implementación del sistema de acoplamiento	46
3.3 Implementación del sistema de potencia.....	49
3.4 Elaboración del circuito impreso y el montaje en placa.....	52
3.5 Implementación del sistema móvil de pruebas.....	55
Capitulo 4.....	59
Pruebas y resultados	59

4.1 Sistema digital	59
4.2 Sistema de acoplamiento	61
4.3 Sistema de potencia.....	63
Conclusiones.....	69
Trabajos futuros	71
Referencias bibliográficas.....	73
Páginas web.....	75
Anexo 1.....	77
Anexo 2.....	81

Índice de figuras y tablas

Figura 1.1. Diagrama a bloques funcional del sistema de propulsión de los VE.....	3
Tabla 1.1. Aplicación de motores de VE's	4
Figura 1.2. Clasificación de los motores de VE.....	5
Figura 1.3. Historia de la electrónica de potencia.....	6
Tabla 1.2. Especificaciones de los dispositivos semiconductores de potencia.	7
Figura 1.4. Resistencia de canal para MOSFET.	8
Tabla 1.3. Comparación entre IGBT y MOSFET	9
Figura 1.5. Evolución de los dispositivos de potencia.....	9
Figura 1.6. Clasificación de los pulsadores.	12
Figura 1.7. Circuito pulsador clase E.....	12
Figura 1.8. Polaridades y dispositivos del circuito pulsador clase E.	13
Figura 1.9. Ganancias en USA por la automatización de fábricas con controles de motores.	17
Figura 1.10. Modelado eléctrico de un motor de cd de imán permanente.	21
Figura 1.11. Diagrama de estado de un motor de cd.	23
Figura 1.12. Diagrama a bloques de un sistema de motor de cd.....	24
Figura 2.1. Diagrama a bloques del sistema propulsor.	27
Figura 2.2. Medidor de corriente comercial.....	28
Figura 2.3. SHUNT.....	29
Figura 2.4. Diagrama de conexiones para medir la corriente consumida por el sistema electrónico.	29
Figura 2.5. Diagrama a bloques del sistema de control del sistema propulsor.....	30
Figura 2.6. Señales de PWM con variación de ciclos de trabajo.....	32
Figura 2.7. Señal de PWM generada a partir de amplificadores operacionales.	32

Figura 2.8. Señales de entrada y salida del microcontrolador.....	33
Figura 2.9. Diagrama de flujo.....	36
Figura 2.10. Fuentes de alimentación.....	37
Figura 2.11. Señales de reinicio y pedal de aceleración.....	38
Figura 2.12 Interruptor de principal, señal de dirección y pines de programación.....	38
Figura 2.13 señales de ajuste de corriente y shunt.	39
Figura 2.14. Señales de PMW mejoradas.....	40
Figura 2.15. Diagrama de conexiones de la etapa de acoplamiento.	41
Figura 2.16. Aplicación de los MOSFET S de potencia.	43
Figura 2.17. Diagrama de conexiones de los MOSFETS en paralelo.	44
Figura 3.1. Ventana principal del software ARV Studio 4.	45
Figura 3.2. Diagrama general de conexiones.	47
Figura 3.3. Encapsulado del MOSFET IRFPS3810.	49
Figura 3.4. Encapsulado y diagrama esquemático interno del MOSFET STE250NS10.	50
Figura 3.5. Encapsulado y diagrama esquemático interno del DIODO STPS200170TV1....	50
Figura 3.6. Diagrama de conexiones del circuito electrónico de potencia.	51
Figura 3.7. Cara superior de la placa del circuito impreso.	52
Figura 3.8. Cara inferior de la placa del circuito impreso.....	52
Figura 3.9. Circuito impreso en la placa de cobre.....	53
Figura 3.10. Circuito impreso de dos caras.	54
Figura 3.11. Circuito electrónico de control.	54
Figura 3.12. Chasis del vehículo eléctrico.....	55
Figura 3.13. Motor conectado directamente al eje de tracción.	56
Figura 3.14. Juego de engranes.	56
Figura 3.15. Sistema de frenado del vehículo eléctrico.....	57
Figura 3.16. Adaptación del potenciómetro al pedal de aceleración.	57

Figura 4.1. Señales de activación H1 y L1 generadas por el microcontrolador.	59
Figura 4.2. Señales de activación H2 y L2 generadas por el microcontrolador.	60
Figura 4.3. Señales mejoradas Hout1 y Lout1 obtenidas del IR21110.	61
Figura 4.4. Señales mejoradas Hout2 y Lout2 obtenidas del IR21110.	61
Figura 4.5. Comparación de señales de entrada y salida del IR2110.	62
Figura 4.6. Señal obtenida en las terminales del motor con una punta de osciloscopio normal.	63
Figura 4.7. Variación de velocidad del motor con un ciclo de trabajo del 15%.	63
Figura 4.8. Variación de velocidad del motor con un ciclo de trabajo del 90%.	64
Figura 4.9. Sistema electrónico montado en el vehículo eléctrico.	64
Figura 4.10. Corriente consumida por el sistema.	65
Figura 4.11. Variación del ciclo de trabajo de la señal de PWM.	65
Figura 4.12. Tacómetro.	66
Figura 4.13. Adaptación de tacómetro al eje de tracción del vehículo eléctrico.	67
Figura 4.14. Gráfica de las RPM obtenidas por el tacómetro.	67
Figura 4.15. Gráfica de las RPM obtenidas por el tacómetro en una segunda prueba.	68
Figura 4.16. Voltaje obtenido en el motor.	68

Resumen

En este trabajo de tesis se diseña y se construye un vehículo eléctrico monoplaza accionado por un sistema electrónico de potencia con el cual se regula la velocidad de un motor de corriente directa (CD).

Se construyó el chasis de un vehículo eléctrico para probar el sistema electrónico, sus dimensiones son 90 cm de ancho por 140 cm de largo, y se realizaron pruebas con una carga de más de 200 Kg. de peso.

Se diseñó e implementó un convertidor CD – CD basado en dispositivos semiconductores de potencia, el cual consta principalmente de tres partes: la primera es una etapa lógica formada por un microcontrolador que en función de una comparación entre una señal de entrada de referencia y una señal triangular fija, se generan diferentes señales PWM; la segunda es la de potencia, que recibe las señales de PWM generadas en la etapa lógica y proporciona la energía suficiente para controlar la velocidad del motor de CD; la última es la encargada del acoplamiento entre la etapa lógica y la etapa de potencia. La corriente máxima de pico que se le puede demandar al convertidor es de 220A.

Introducción

A principios del siglo XX, tres tipos de automóviles competían por el mercado: eléctricos, a vapor y gasolina; sin embargo, en poco más de una década los autos a gasolina dominaron los próximos 100 años.

En la actualidad, los medios de transporte son los responsables del 50% de la contaminación total del planeta, esta cifra muestra el gran problema que presenta la contaminación ambiental [URL 7]. Con el uso de medios alternativos de energía para el sistema de transporte se pueden reducir notablemente los índices de contaminación [URL 9].

A principios de 1990 se inició una década de interés de la sociedad por los vehículos eléctricos, debido al incremento de los costos de la gasolina y su dependencia en otras naciones, junto con la reciente atención sobre el daño climático creado por las máquinas de combustión. Los vehículos a gasolina han sido etiquetados como la mayor fuente de emisiones que crean la contaminación del aire, 43 % de gases orgánicos (NMOG), 57% de óxido de nitrógeno (NO_x) y 82% de monóxido de carbono (CO) [7]. Recientes investigaciones, sitúan a México con una contaminación superior a Hong Kong, India, Vietnam e Indonesia [8].

La gran mayoría de los vehículos en uso actualmente están diseñados para ser alimentados por un determinado combustible, con el inconveniente que esta limitación implica que cuando ese combustible escasee o se agote, el vehículo no se podrá usar más; sin embargo existen posibles sustitutos para el petróleo, pero por ahora son relativamente caros.

Los vehículos que se desarrollen de ahora en adelante deberán ser propulsados por una forma de energía de fácil distribución y que pueda provenir de distintas fuentes. La única forma de energía que reúne todas estas condiciones es la *electricidad*. En efecto, cualquiera dispone de energía eléctrica en su propio domicilio, especialmente en áreas urbanas y suburbanas.

En la actualidad la mayor parte de la electricidad proviene del empleo de combustibles no renovables, que se obtienen de diversas fuentes (hidroeléctrica, termoeléctrica, nuclear, etc.). De esta manera se podría reservar al gas y al petróleo para usos en los que su sustitución aún es compleja (fundamentalmente la *petro-química*).

Utilizar medios de transporte con motores eléctricos es una opción para ayudar a combatir el problema de la contaminación; su funcionamiento es conveniente porque son silenciosos y no utilizan gasolina y aceite [URL 8].

El uso masivo de los vehículos eléctricos (VE) en principio no obligaría a incrementar rápidamente la capacidad de generación eléctrica, ya que sus baterías se podrían cargar de noche, cuando la demanda de energía eléctrica disminuye considerablemente. Para inducir al usuario a esta costumbre, en algunos países ya existe la legislación que establece tarifas de electricidad más económicas para los horarios nocturnos [24].

Durante el día las baterías se pueden cargar usando energía solar, es decir, mediante celdas solares que conviertan la energía solar en energía eléctrica, las cuales pueden estar acopladas al VE o bien, si el vehículo permanece estacionado durante el día, podrían ubicarse en el techo del estacionamiento y así tener una mayor superficie de captación de energía solar.

Actualmente en los países de Suiza, Alemania, Austria, Francia e Italia existe una red de energía solar llamada “Park & Charge®” que utiliza el concepto de estaciones públicas para cargar los vehículos eléctricos. [23]

En 1899 el francés Jénatzy con su vehículo eléctrico “Jamais Contenté” superó por primera vez la barrera de los cien kilómetros por hora. Los transportes de carácter colectivo como trenes, tranvías, trolebuses y subterráneos, fueron los primeros en hacer la transformación de motor de combustión a eléctrico de forma masiva.

Como se mencionó anteriormente, el vehículo eléctrico presenta un número significativo de ventajas con respecto al de combustión interna. Entre las principales se pueden mencionar:

- Contaminación nula de gases de escape,
- Sustantiva simplificación mecánica,
- Par-motor constante (incluso en el arranque),
- Alta eficiencia,
- Bajo ruido,
- Bajo costo de operación y mantenimiento.
- Además presenta una amplia variedad de fuentes de energía.

Como se puede apreciar, los vehículos eléctricos son hoy una realidad en marcha. Por lo tanto, constituyen un desafío para:

- Las instituciones públicas, que deben comprender la importancia estratégica del tema y producir las condiciones propicias que conduzcan al fortalecimiento de su desarrollo tecnológico.
- Los técnicos, que deben capacitarse en especialidades como mecánica estructural y de tracción (fabricación de chasis, carrocerías, ejes, etc.), la electrónica de potencia, la microelectrónica, la electricidad industrial, etc.
- El planificador ambiental, que atento a la actual degradación del medio ambiente, especialmente en sectores de alta densidad de población, encuentra en el vehículo eléctrico un medio altamente efectivo para contrarrestar la peligrosa contaminación causada por los motores de combustión interna.
- Y en general, para todo hombre preocupado por el medioambiente.

A continuación se plantean los principales objetivos, en los cuales se basó el desarrollo de este trabajo.

Objetivos

A continuación se plantea el objetivo general del trabajo, y posteriormente de forma detallada los objetivos específicos.

General

Diseñar e implementar un sistema de variación de velocidad de un motor de CD empleando un convertidor de CD – CD puente completo tipo reductor y aplicarlo en la construcción de un vehículo eléctrico.

Específicos

- Diseñar una etapa lógica con un microcontrolador para que en función de una señal de entrada de referencia, genere diferentes señales PWM, las cuales controlan los dispositivos semiconductores de potencia.
- Diseñar una etapa de potencia formada por circuitos semiconductores que reciban las señales PWM generadas en la etapa lógica, logrando un control tanto de velocidad como de sentido del giro del motor.
- Implementar una etapa de acoplamiento entre las etapas lógica y de potencia.
- Elaborar una estructura metal-mecánica para probar el sistema accionador en un vehículo monoplace de tamaño 90 x 140 cm (ancho y largo).

Contenido de la tesis

Este documento se divide en cinco capítulos. A continuación se hace una breve descripción de su contenido.

Capítulo I: Contiene el marco teórico que consiste en una recopilación de datos de diferentes fuentes bibliográficas e información relacionada con la solución del problema.

Capítulo II: Se describe el diseño del sistema, en el cual se selecciona la solución del problema que emerge del capítulo anterior y muestra las diferentes partes que lo componen con una explicación detallada de cada una de estas.

Capítulo III: En este capítulo se implementa el sistema electrónico, y se hace mención de los problemas que se tuvieron durante su desarrollo y se presenta la solución de los mismos.

Capítulo IV: Se describen las pruebas y resultados obtenidos durante la implementación del sistema electrónico; se muestran las respuestas de las etapas del prototipo final y resultados finales.

Capítulo V: Por último se presentan las conclusiones del proyecto y los comentarios del trabajo acerca de los objetivos planteados, así como algunas propuestas para trabajos futuros y mejoras del mismo.

Capítulo 1

Marco Teórico

Durante muchos años ha existido la necesidad de adecuar la potencia eléctrica de los sistemas de tracción y de los sistemas industriales impulsados por motores eléctricos.

La electrónica de potencia es una combinación de la energía, la electrónica y el control; la energía tiene que ver con el equipo de potencia estática y rotativa (giratoria) para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica; la electrónica se ocupa de los dispositivos y circuitos de estado sólido para el control deseado; y el control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas de lazo cerrado.

Por lo anterior, la electrónica de potencia puede definirse como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica [4].

1. 1 Estado del arte

1. 1. 1 Introducción

Las emisiones de contaminación asociadas con Vehículos eléctricos (VE) vienen de la generación de la electricidad para recargar las baterías, más que de su operación como medio de transporte. En el peor de los casos, una generación de energía que emplea solamente carbón, generará emisiones contaminantes mucho menores que las emisiones asociadas a vehículos que trabajan con gasolina. Una simulación en 1995 que reemplazaba los vehículos a gasolina por eléctricos (en el peor escenario) podrían reducir enormemente las emisiones: NMOG 98%, NO_x 92%, CO 99%. Ya que la generación eléctrica se ubica en zonas no urbanas, las personas de las ciudades no son expuestas a estas emisiones [9].

La conversión de potencia y control forman las bases del campo conocido como electrónica de potencia [10]. Recientemente la tecnología de la electrónica de potencia ha sido impulsada por las necesidades de controles eficientes en aplicaciones industriales, y el

desarrollo de fuentes de alimentación conmutadas de menor peso y tamaño, para equipo de computación y comunicaciones [11]. En respuesta a las necesidades tecnológicas de los VE's, el desarrollo de la tecnología en electrónica de potencia se ha acelerado.

Algunas compañías como GM, Nissan, BMW, Honda, Toyota, Mitsubishi y REVA han desarrollado VE's [12]-[14]. Algunos vehículos eléctricos emplean dispositivos semiconductores de potencia llamados MOSFET's/IGBT's [URL 1].

1.1.2 Baterías

La energía y potencia específicas de baterías electroquímicas son mucho menores a las entregadas empleando gasolina. Por esa razón, un número grande de baterías son requeridas para asegurar un nivel de potencia aceptable. Sin embargo, un VE con muchas baterías presenta varios inconvenientes: La reducción de espacio disponible en el interior, el incremento del peso y costo del vehículo y la degradación del rendimiento del vehículo. Así, el desarrollo de tecnologías de baterías se ha visto acelerado en los siguientes aspectos: eficiencia, razón de carga, ciclo de vida, entorno operativo, seguridad, costo, reciclaje. Los tipos de batería principalmente empleados han sido de ácido de plomo (Pb-Acid). Otras se basan en Nickel (Ni), presentando resultados interesantes en cuanto al peso. Otro tipo de baterías Zinc-Halógeno tales como Zinc-Bromino (Zn-Br), y baterías de alta temperatura tales como Sodio-Sulfuro (Na-S) son también atractivas [15]-[19].

Avances recientes emplean Ion-Litio (Io-Li), sin embargo requieren cobalto, que es un material caro y térmicamente inestable. Una alternativa es sustituir el cobalto con manganeso, ya que los electrodos de óxido de manganeso son más estables y más baratos. Compaq power ha desarrollado un nuevo material, estable a altas temperaturas, para mantener separados los electrodos. Las células de las baterías de Continental, utilizan un cátodo de hierro que es más estable térmicamente que el óxido de manganeso, además de barato y abundante, los electrodos son de fosfatos [URL 2].

1.1.3 Propulsión eléctrica

La propulsión eléctrica es la interfaz entre las baterías y las ruedas del vehículo, transfiriendo energía en la dirección requerida, con alta eficiencia y controlando la etapa de potencia todo el tiempo. Desde el punto de vista funcional, un sistema de propulsión eléctrico puede ser dividido en 2 partes: eléctrico y mecánico. La parte eléctrica incluye el motor, el convertidor de potencia, y el controlador electrónico. La parte mecánica se forma por el dispositivo de transmisión y las ruedas. Algunas veces el dispositivo de transmisión es opcional. El límite entre las partes eléctrica y mecánica es el núcleo del motor, donde la conversión de energía electromecánica toma lugar.

La propulsión eléctrica, principalmente la electrónica de potencia, juega un rol muy importante en los VE's, algunas veces esto se describe como el corazón de los VE's.

1.1.4 Propulsión de los vehículos eléctricos

La figura 1.1 ilustra el diagrama a bloques funcional de un sistema de propulsión de un VE, donde las flechas delgadas son señales, y las gruesas representan el flujo de potencia.

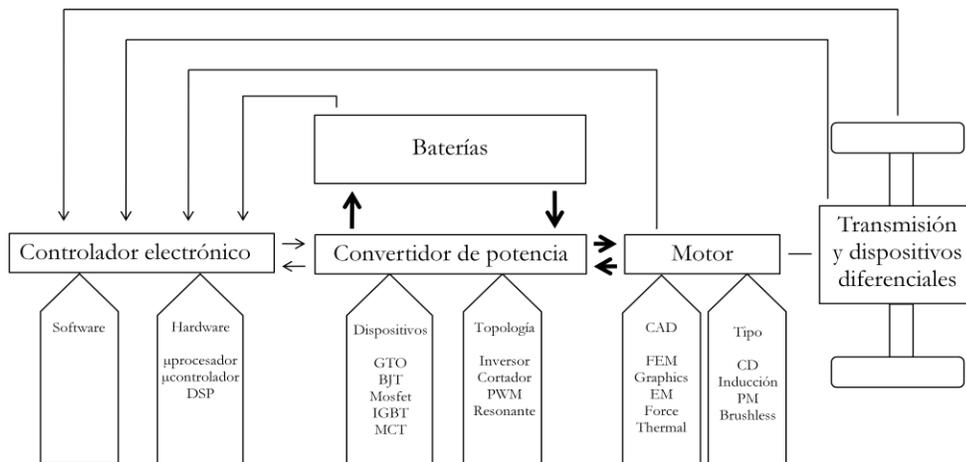


Figura 1.1. Diagrama a bloques funcional del sistema de propulsión de los VE.

Debido a la posibilidad de frenado regenerativo el flujo de potencia es reversible. Dependiendo de la estrategia de control del motor y los datos obtenidos de los sensores, se proporcionan al controlador electrónico las señales que se envían al convertidor de potencia. Estas señales son amplificadas para activar los dispositivos de potencia. Finalmente, el motor

se interconecta con las ruedas a través del sistema de transmisión. Los vehículos eléctricos utilizan dos motores (nissan FEV) o más, y en otros casos solo uno (GM impact 4, BMW E1/E2, y U2001). En la siguiente tabla se muestran algunos modelos de VE y los tipos de motores empleados [20].

Modelos de VE	Motores de VE
Fiat Panda Elettra	Motor de CD serie
Mazda Bongo	Motor de CD Shunt
Conceptor G-Van	Motor de CD excitado separadamente
Suzuki Senior Tricycle	Motor de CD de imán permanente
Fiat Seicento Elettra	Motor de inducción
Ford Think City	Motor de inducción
GM EV1	Motor de inducción
Honda EV Plus	Motor de imán permanente tipo serie
Nissan Altra	Motor de imán permanente tipo serie
Toyota RAV4	Motor de imán permanente tipo serie
Chloride Lucas	Motor de CD SR

Tabla 1.1. Aplicación de motores de VE's

1. 1. 5 Motores

Los motores eléctricos han estado disponibles por más de un siglo. La evolución de los motores ha sido lenta y larga, a diferencia de las ciencias de la electrónica y computación. Sin embargo, el desarrollo de motores es continuamente estimulado por la invención de imanes permanentes de alta energía (Permanent Magnets, PM), topologías sofisticadas y poderosas técnicas de diseño (CAD). La clasificación de motores para VE's se divide principalmente en dos grupos, los conmutados y no conmutados. Los motores de CA con conmutador han quedado obsoletos para la propulsión de VE. En la figura 1.2 se muestra la clasificación de los motores para VE's. Los tipos de motor que se observan en óvalos han sido empleados en VE's [20].

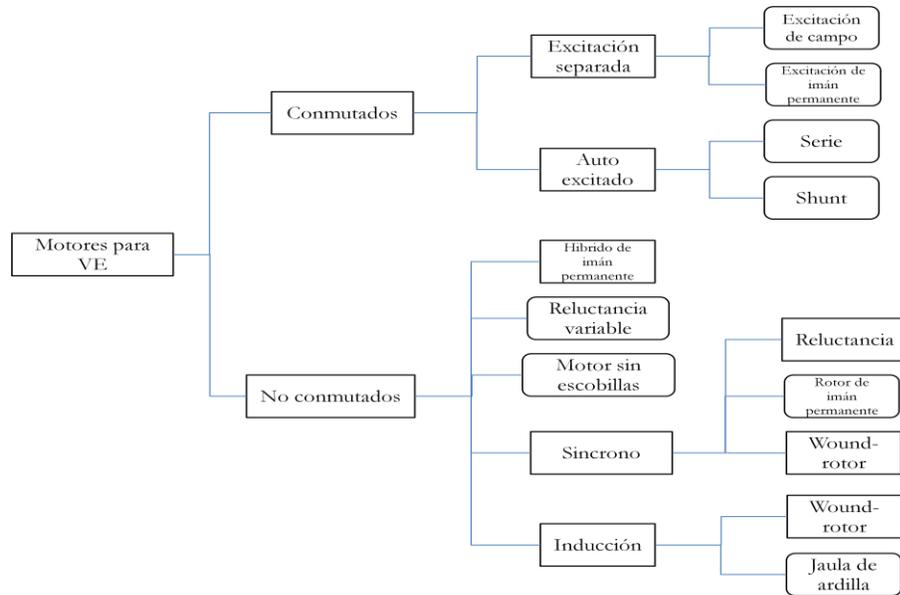


Figura 1.2. Clasificación de los motores de VE.

Los imanes permanentes proveen de una larga vida al motor. El único inconveniente es el costo inicial reflejado en el precio de los motores. Además de ferritas, se han introducido nuevos materiales como el neodimio-acero-boro (Nd-Fe-B), Alnico, Samario-Cobalto (Sm-Co). Debido a su alta inducción magnética y fuerza electromagnética y a su bajo costo, el Nd-Fe-B promete aplicaciones en motores. Con estos nuevos super-imanen, un nuevo número de topologías de motores con alta densidad y eficiencia, han sido recientemente desarrolladas [21].

Tradicionalmente los motores de CD (con materiales con mejores características) se han empleado en vehículos eléctricos, sin embargo, el problema principal es el mantenimiento en estos motores (conmutadores y escobillas).

Recientes desarrollos tecnológicos han posicionado mejor a los motores de corriente alterna (CA) con respecto de los de CD con las siguientes ventajas: alta eficiencia, alta densidad de potencia, bajo costo, mayor confiabilidad, y libres de mantenimiento. Ya que la alta confiabilidad y la operación libre de mantenimiento son consideraciones principales en la propulsión de los vehículos eléctricos, los motores de CA son más atractivos [22].

1. 2 Antecedentes

1. 2. 1 Historia de la electrónica de potencia

La primera revolución electrónica inició en 1948 con la invención del transistor de silicio; la mayor parte de las tecnologías electrónicas avanzadas actuales tienen su origen en esta invención. A través de los años, la microelectrónica moderna ha evolucionado a partir de los semiconductores de silicio [4].

La segunda revolución electrónica empezó en 1958 con el desarrollo del tiristor comercial. Ese fue el comienzo de la era de la electrónica de potencia. Y desde entonces, se han introducido diversos tipos de dispositivos semiconductores de potencia y nuevas técnicas de conversión [4].

La revolución de la microelectrónica dio la capacidad de procesar una gran cantidad de información a grandes velocidades. La revolución de la electrónica de potencia está dando la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mayor.

A finales de los años 80 y principios de los 90, la revolución de la electrónica de potencia tuvo un gran auge dentro de los avances tecnológicos. La figura 1.3 muestra la historia de la electrónica de potencia [4].

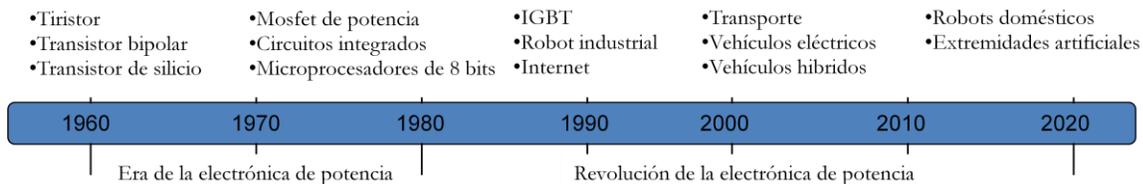


Figura 1.3. Historia de la electrónica de potencia.

1. 2. 2 Dispositivos semiconductores de potencia

Desde que se desarrolló el primer tiristor (SCR) a fines de 1957, han surgido grandes adelantos en los dispositivos semiconductores de potencia. Hasta 1970, los tiristores convencionales se habían utilizado en forma exclusiva para el control de la energía en

aplicaciones industriales. A partir de 1970, se desarrollaron varios tipos de dispositivos semiconductores de potencia que llegaron a comercializarse, estos se pueden dividir en cinco tipos [4]:

- Diodos de potencia,
- Tiristores,
- Transistores de Unión Bipolar (BJT),
- MOSFET de potencia, y
- Transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT).

Las especificaciones de los dispositivos semiconductores de potencia, comercialmente disponibles, aparecen en la tabla 1.2 [4].

Dispositivos semiconductores	Tipo	Especificación de voltaje/ Corriente	Alta frecuencia (Hz)	Tiempo de conmutación (μ s)	Resistencia en estado activo ($m\Omega$)
Diodos	Uso General	5000 V / 5000 A	1k	100	0.16
	Alta velocidad	3000 V / 1000 A	10k	2-5	1
	Schottky	40V / 60 A	20k	0.23	10
Tiristores desactivados en forma forzada	De bloqueo inverso	5000 V / 5000 A	1k	200	0.25
	Alta velocidad	1200 V / 1500 A	10k	20	0.47
	Bloqueo inverso	2500 V / 400 A	5k	40	2.16
	Conducción inversa	2500 V / 1000 A	5k	40	2.1
	GATT	1200 V / 400 A	20k	8	2.24
	Disparo lumínico	6000 V / 1500 A	400	200-400	0.53
TRIAC		1200 V / 300 A	400	200-400	3.57
Tiristores desactivados automáticamente	GTO	4500 V / 3000 A	10k	15	2.5
	SIT	4000 V / 2200 A	20k	6.5	5.75
Transistores de potencia	Individual	400 V / 250 A	20k	9	4
		400 V / 40 A	20k	6	31
		630 V / 50 A	25k	1.7	15
	Darlington	1200 V / 400 A	10k	30	10
SIT		1200 V / 300 A	100k	0.55	1.2
MOSFET de potencia	Individual	500 V / 8.6 A	100k	0.7	0.6
		1000 V / 4.7 A	100k	0.9	2
		500 V / 50 A	100k	0.6	0.4
IGBT	Individual	1200 V / 400 A	20k	2.3	60
MCT	Individual	600 V / 60 A	20k	2.2	18

Tabla 1.2. Especificaciones de los dispositivos semiconductores de potencia.

El transistor MOSFET de potencia presenta como principales ventajas la sencillez de control (por voltaje) y rápida frecuencia de conmutación (>300 KHz); su principal inconveniente es que en conducción se comporta como una resistencia (R_{on}), cuyo valor aumenta considerablemente con el voltaje máximo del semiconductor (la variación es proporcional a V_{DS} , figura 1.4). Su uso queda limitado para aplicaciones de bajo voltaje (<100 V) y altas frecuencias de conmutación, entre la aplicación que destaca está la fuente de alimentación conmutada [4].

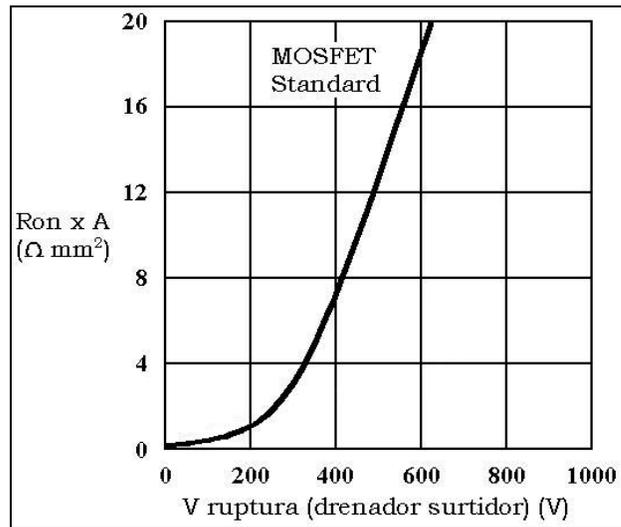


Figura 1.4. Resistencia de canal para MOSFET.

Debido al continuo desarrollo y mejora de los diferentes dispositivos, existen ámbitos de funcionamiento similares, con lo cual es difícil decidir cuál es el dispositivo idóneo. De esta forma, es cada vez más frecuente ver a los IGBT en aplicaciones de baja potencia y altas frecuencias, como fuentes de alimentación conmutadas, que eran de dominio del MOSFET. Sin embargo, en aquellas aplicaciones de bajo voltaje (< 250 V) y/o altas frecuencias (>150 KHz), los MOSFET siguen siendo la mejor opción [4]. En la tabla 1.3 se presenta una comparación entre ambos dispositivos semiconductores.

Características	MOSFET	IGBT
Método de control	Voltaje	Voltaje
Control del circuito	Simple	Simple
Impedancia de entrada	Alto	Alto
Potencia de control	Bajo	Bajo
Velocidad de transición	Rápido(ns)	Medio
Frecuencia de operación	Rápido (<1 MHz)	Medio
Área segura de operación (SOA)	Amplia	Amplia
Voltaje de saturación	Alto	Bajo

Tabla 1.3. Comparación entre IGBT y MOSFET

Un dispositivo de potencia ideal debe contar con las siguientes características:

- Tener un voltaje activo igual a cero
- Soportar un voltaje infinito fuera de conducción
- Manejar una corriente infinita
- “Activarse” y “Desactivarse” en un tiempo cero, teniendo por lo tanto una velocidad de conmutación infinita

En la figura 1.5 se muestran aplicaciones y rangos de frecuencia de operación de los dispositivos de potencia [4].

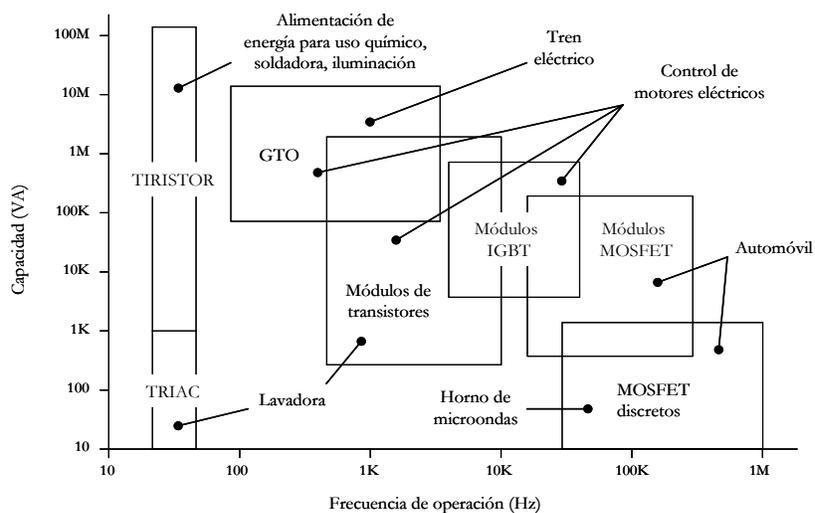


Figura 1.5. Evolución de los dispositivos de potencia.

1. 2. 3 Características de control de dispositivos de potencia

Los dispositivos semiconductores de potencia se pueden operar como interruptores mediante la aplicación de señales de control a la terminal de compuerta de los tiristores (y a la base de los transistores bipolares). La salida se controla mediante la variación del tiempo de conducción de estos dispositivos de conmutación [4].

Los dispositivos semiconductores de potencia se pueden clasificar a partir de:

- Activación y desactivación sin control (diodo).
- Activación controlada y desactivación sin control (SCR).
- Características de activación y desactivación controladas (BJT, MOSFET, GTO, SITH, IGBT, SIT, MCT).
- Requisito de señal continua en la compuerta (BJT, MOSFET, IGBT, SIT).
- Requisito de pulso en la compuerta (SCR, GTO, MCT).
- Capacidad de soportar voltajes bipolares (SCR, GTO).
- Capacidad de soportar voltajes unipolares (BJT, MOSFET, GTO, IGBT, MCT).
- Capacidad de corriente bidireccional (TRIAC, RCT).
- Capacidad de corriente unidireccional (SCR, GTO, BJT, MOSFET, MCT, IGBT, SITH, SIT, diodo).

1. 2. 4 Tipos de circuitos electrónicos de potencia

Para el control de la potencia eléctrica o del acondicionamiento de la misma, es necesario convertir la potencia de una forma a otra; las características de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia permiten dicha conversión. Los convertidores de potencia estáticos llevan a cabo estas funciones [4].

Los circuitos electrónicos de potencia se pueden clasificar en seis tipos:

- Rectificadores de diodos.
- Convertidores de CA-CD (rectificadores controlados).
- Convertidores de CA-CA (controladores de voltaje de CA).
- Convertidores de CD-CD (pulsadores de CD).

- Convertidores de CD-CA (inversores).
- Interruptores estáticos.

La selección de un dispositivo dependerá del voltaje, la corriente y los requisitos de velocidad del convertidor.

El trabajo realizado se basa en un convertidor de CD – CD, para entenderlo mejor, a continuación se explica cómo funcionan estos dispositivos [4].

1. 3 Pulsadores de CD

Los pulsadores de CD también conocidos como convertidores de CD a CD, se pueden considerar como un equivalente a un transformador de CA con una relación de vueltas que varía en forma continua; al igual que un transformador, pueden utilizarse como una fuente reductora o elevadora [4].

Los pulsadores de CD se utilizan ampliamente en el control de los motores de tracción para automóviles, tranvías eléctricos, grúas marinas, montacargas y elevadores de minas. Proporcionan control en aceleraciones continuas, alta eficiencia, respuesta rápida y dinámica. Los pulsadores se pueden utilizar para el frenado regenerativo de motores de CD, para devolver la energía a la alimentación, característica que permiten un ahorro de energía en aquellos sistemas de transporte que hacen paradas frecuentes [4].

1. 3. 1 Clasificación de pulsadores

Dependiendo de la dirección en la que fluyan la corriente y el voltaje (ver figura 1.6), los pulsadores se clasifican en cinco tipos, estos son [4]: pulsador de clase A, clase B, clase C, clase D, y clase E.

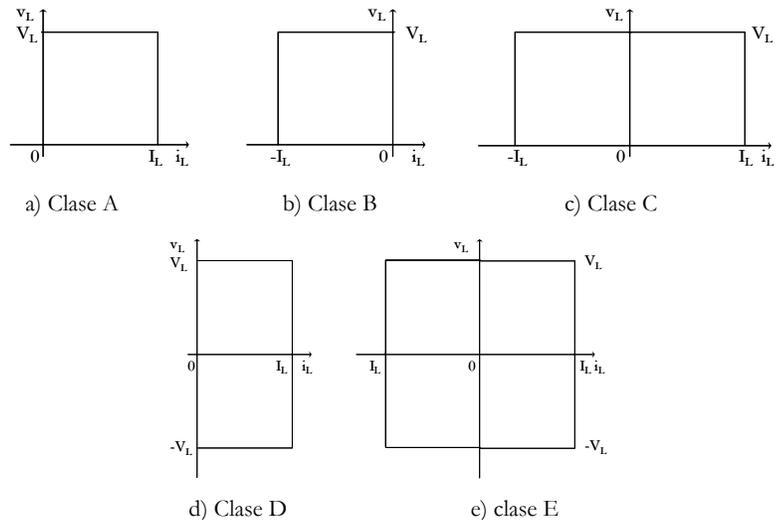


Figura 1.6. Clasificación de los pulsadores.

1. 3. 1. 1 Pulsador de clase E

La corriente de carga puede ser positiva o negativa, como se observa en la figura 1.6-e; el voltaje de carga también puede ser positivo o negativo, éste se conoce como pulsador de cuatro cuadrantes. Se pueden combinar dos pulsadores de clase C para formar un pulsador de clase E (ver figura 1.7). Las polaridades de voltaje de la carga y de la corriente se muestran en la figura 1.8-a; los dispositivos que operan en los diferentes cuadrantes aparecen en la figura 1.8-b. Para operar en el cuarto cuadrante, deberá invertirse la operación de la batería E [4].

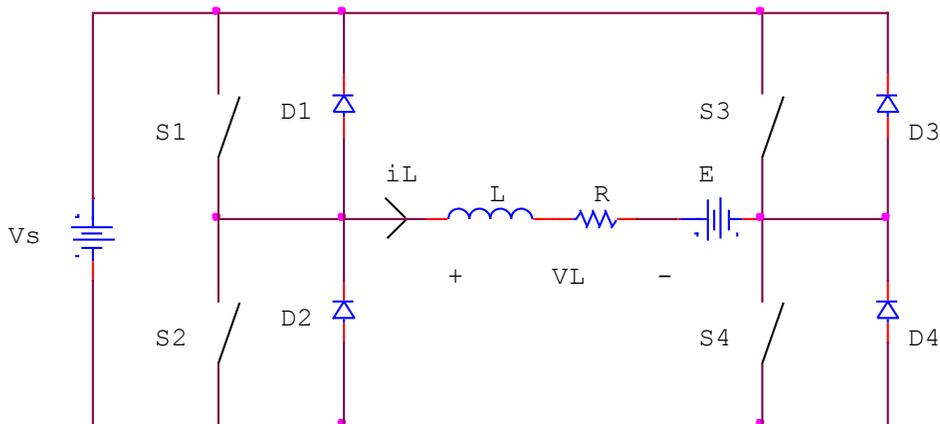


Figura 1.7. Circuito pulsador clase E.

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">$V_L \uparrow$</td> <td style="text-align: center;">$V_L \uparrow$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Inversión</td> <td style="text-align: center;">Rectificación</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">VL +Ve</td> <td style="text-align: center;">VL +Ve</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">iL -Ve</td> <td style="text-align: center;">iL +Ve</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px solid black;"></td> <td style="border-top: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">VL -Ve</td> <td style="text-align: center;">VL -Ve I_L</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">iL -Ve</td> <td style="text-align: center;">iL +Ve</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Rectificación</td> <td style="text-align: center;">Inversión</td> </tr> </table>	$V_L \uparrow$	$V_L \uparrow$	Inversión	Rectificación	VL +Ve	VL +Ve	iL -Ve	iL +Ve			VL -Ve	VL -Ve I_L	iL -Ve	iL +Ve	Rectificación	Inversión	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">$V_L \uparrow$</td> <td style="text-align: center;">$V_L \uparrow$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">S2, D4</td> <td style="text-align: center;">S1, S4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D4, D1</td> <td style="text-align: center;">D2, D4</td> </tr> <tr> <td style="border-top: 1px solid black;"></td> <td style="border-top: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">S3, S2</td> <td style="text-align: center;">S4, D2 I_L</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">S2, D4</td> <td style="text-align: center;">D2, D3</td> </tr> </table>	$V_L \uparrow$	$V_L \uparrow$	S2, D4	S1, S4	D4, D1	D2, D4			S3, S2	S4, D2 I_L	S2, D4	D2, D3
$V_L \uparrow$	$V_L \uparrow$																												
Inversión	Rectificación																												
VL +Ve	VL +Ve																												
iL -Ve	iL +Ve																												
VL -Ve	VL -Ve I_L																												
iL -Ve	iL +Ve																												
Rectificación	Inversión																												
$V_L \uparrow$	$V_L \uparrow$																												
S2, D4	S1, S4																												
D4, D1	D2, D4																												
S3, S2	S4, D2 I_L																												
S2, D4	D2, D3																												
a) Polaridades	b) dispositivos en conducción																												

Figura 1.8. Polaridades y dispositivos del circuito pulsador clase E.

1. 3. 2 Diseño de un circuito pulsador

El requisito principal para el diseño de los circuitos de conmutación es proporcionar un tiempo adecuado de desactivación, a fin de poder desconectar el dispositivo semiconductor principal [4].

Es más sencillo diseñar el circuito de conmutación si la inductancia de la alimentación se puede despreciar o si la corriente de la carga no es alta. Pero en el caso de una corriente más alta en la carga, las inductancias dispersas siempre presentes en los sistemas reales, juegan un papel significativo en el diseño del circuito. Los esfuerzos que imponen los voltajes sobre los dispositivos semiconductores de potencia dependen de la inductancia de la fuente y de la corriente de la carga [4].

En general el diseño incluye los siguientes pasos:

- Identificar los modos de operación del circuito pulsador.
- Determinar los circuitos equivalentes para los diversos modos de operación.
- Determinar las corrientes y los voltajes de estos modos y sus formas de onda.
- Evaluar los valores de los componentes de conmutación que satisfagan los límites del diseño.
- Determinar los requisitos de especificación de voltaje de todos los componentes y dispositivos.

Una alta frecuencia de pulsación reduce el tamaño de los elementos del filtro de entrada. Pero las frecuencias de las armónicas generadas por el pulsador también se incrementan en la línea de alimentación, esto puede causar problemas de interferencia con las señales de control y de comunicaciones [4].

1. 4 Importancia del uso de motores eléctricos

Avances recientes en baterías de alta energía, combinados con el desarrollo de motores más pequeños y más potentes, han abierto nuevos mercados para un amplio rango de nuevos productos, incluyendo aplicaciones portátiles, equipo de entretenimiento y vehículos eléctricos. La conveniencia de dispositivos tales como taladros portátiles, podadoras, y otras herramientas han resultado del rápido crecimiento del control de motores. Un nuevo énfasis en el diseño de motores se ha concentrado en un bajo consumo de energía para extender la vida útil de las baterías, proporcionando así más horas de duración [3].

Las preocupaciones de los diseñadores, para un funcionamiento mejorado y mayor eficiencia de operación no se limitan a aplicaciones portátiles. La siguiente generación de motores, en muchas aplicaciones industriales, tomará ventaja de los cambios que puedan ocurrir tanto en los motores como en los sistemas electrónicos que los controlarán y protegerán. Los controladores electrónicos de motores están teniendo mejoras en su empaque, control y potencia, además de que la interconexión y comunicación permite a los motores trabajar más eficientemente, adaptándose rápidamente a las nuevas aplicaciones [6].

El tamaño de un motor puede ser pequeño, desde una pequeña fracción de Watt hasta varios kilowatts, dependiendo de la aplicación. Las técnicas de control han cambiado de analógicas a digitales. La mejora de la tecnología en los semiconductores y los esquemas de control pueden ser implementados por un avance en los circuitos integrados, incrementando así la eficiencia de los dispositivos de potencia. Los motores están cambiando debido a los nuevos materiales magnéticos, laminaciones y embobinados [2].

Los motores eléctricos tienen directamente un gran impacto en la calidad de vida, esencialmente en calentadores y enfriadores de agua, aspiradoras, lavadoras de ropa, lava trastes, herramientas, así como en distintas formas de entretenimiento. El número de

motores que se pueden encontrar en casa, fácilmente pueden ser más de 50, mientras algunos automóviles fácilmente pueden exceder los 60 motores, éstos pueden estar en los limpia parabrisas, vidrios, espejos eléctricos, etc. [5].

1. 5 Necesidad del aumento de control de potencia

Los motores consumen aproximadamente el 50% de la electricidad generada en USA, cuando no se está realizando algún tipo de trabajo útil, se llega a consumir un 10% de esa energía; debido a esto los motores requieren un control más eficiente [5].

Los motores funcionan con mayor eficiencia a altas velocidades, el ruido producido por las altas velocidades es determinante para el desempeño de los trabajadores. El ruido excesivo de los motores, puede ser reducido haciendo una disminución en la velocidad del controlador del motor evitando los puntos de operación resonantes. Las unidades de operación en velocidades óptimas pueden producir menor ruido, previendo así un entorno agradable de trabajo. Como resultado, los motores con velocidad variable son atractivos para muchas aplicaciones nuevas. Los controladores de frecuencia variable proveen un ilimitado número de puntos de operación y una reducción considerable del ruido [5].

La calidad de aire en el interior de los edificios cerrados es una preocupación creciente, el incremento del aire acondicionado en países en desarrollo ha creado un mercado potencial para los controladores de motores. Un ejemplo claro es China, que incrementó al doble su consumo, de 5 millones a 10 millones de unidades en el año 2000 [5].

1. 6 Importancia del uso de controles de motor

Los beneficios de utilizar controles de motores no ocurren sin algunas implicaciones controversiales, incluyendo la necesidad de compatibilidad electromagnética, y la disminución de la interferencia electromagnética, deteriorando la calidad de potencia basada en el incremento del uso de controles digitales, la preocupación por la descarga electrostática como principal problema para los componentes semiconductores y nuevos aspectos de seguridad. No importa que terminología sea utilizada para la conmutación del control digital del motor – controlador de velocidad variable (CVV), controlador de frecuencia variable

(CFV) , o controlador de velocidad ajustable (CVA) – la conmutación del voltaje puede causar interferencia electromagnética [5].

Las descargas electrostáticas pueden causar daños en los dispositivos semiconductores de potencia y en los circuitos integrados. Afortunadamente, en los controles electrónicos, incluyendo la circuitería y los componentes semiconductores, pueden tratar los campos electromagnéticos, la calidad de potencia y las descargas electroestáticas. Estas soluciones se suman a otros elementos de complejidad para los sistemas de control de motores [5].

1. 7 Disponibilidad de nuevas tecnologías

El control de motores avanza a medida que mejoran las tecnologías motrices, nuevas y revisadas técnicas de control de motores, circuitos integrados diseñados específicamente para aplicaciones de control de motores, y mejoramientos en circuitos semiconductores de potencia. Muchas de estas mejoras permiten el uso de sistemas que anteriormente eran muy caros o técnicamente muy complejos. Como resultado, existe un cambio en el tipo de motores empleados para diferentes aplicaciones [5].

La reducción de costos es un importante aspecto del incremento en controladores digitales de motores. Por ejemplo, el costo para un controlador de motor industrial de 750 Watts decreció de \$685 dólares en 1981 a \$465 dólares en 1994. La reducción de costos es similar para todos los niveles de potencia [5].

En la automatización de fábricas en Estados Unidos, los motores controlados electrónicamente produjeron arriba de \$3 billones de dólares en ventas en el año de 1995 como se observa en la figura 1.9. La tecnología está cambiando a favor de los motores trifásicos de AC y los motores sin escobillas (brushless) de CD; para el año 2000 las ganancias rebasaron los \$4.3 billones de dólares en ventas. En Norte América, el 34% de los motores de AC son utilizados para ventiladores y bombas de agua [5].

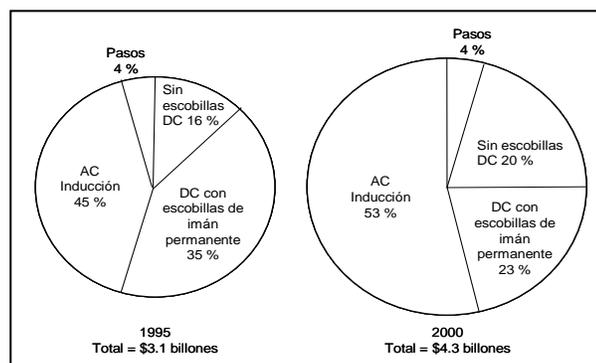


Figura 1.9. Ganancias en USA por la automatización de fábricas con controles de motores.

1. 7. 1 Circuitos integrados para el control de motores

Uno de los esfuerzos iniciales para simplificar el control de motores fue la introducción de circuitos integrados específicos para el control de motores, los primeros aparecieron a mediados de los 80's. Estos ejemplificaron algunos de los requerimientos claves para la conmutación y protección de transistores de potencia [3].

Uno de los primeros circuitos integrados para combinar controles de motor y dispositivos de potencia en un solo encapsulado fue desarrollado para una aplicación en una cámara de video. La cámara requería de alta eficiencia en un espacio limitado y en un circuito impreso flexible. Un puente H completo de MOSFETs fue integrado con una circuitería de control de CMOS en un circuito integrado monolítico que podía ser utilizado para montajes de superficie [3].

Los tres tipos principales de dispositivos semiconductores normalmente utilizados para los controladores de motor son: Circuitos integrados analógicos, microcontroladores y transistores de potencia [3].

Además de variar la velocidad del motor o su fuerza de torsión, los controles electrónicos del motor también se pueden utilizar para medir la temperatura, ruido, etc. y para comunicarse con otros sistemas electrónicos [3].

Es importante que los sistemas a base de motores tengan la capacidad de comunicarse con otros equipos electrónicos. Si varios motores encienden al mismo tiempo, la corriente eléctrica puede exigir altas demandas aumentando la infraestructura eléctrica. Si existiera un encargado de la carga que pueda comunicarse con las aplicaciones eléctricas más grandes, un interruptor controlado ayudaría a optimizar su operación, así también se puede proporcionar la información sobre el estado de cada unidad [3].

1. 8 Tracción eléctrica

La tracción se define como un sistema para obtener el movimiento de un vehículo [URL 14]. Entonces, la tracción eléctrica se puede definir como la obtención del movimiento de un vehículo mediante el uso de la energía eléctrica, esto es, haciendo uso de motores eléctricos.

Se pueden distinguir tres periodos en los avances de la tracción eléctrica:

- El primer periodo llega hasta 1905 y se caracteriza por la aparición del motor eléctrico de corriente continua. La locomotora eléctrica es entonces una máquina autónoma semejante a la de vapor y su energía se obtiene mediante pilas o acumuladores.
- El segundo periodo está unido al desarrollo del transformador de corriente alterna, el cual posibilita corrientes de tensión elevadas. A partir de este momento la corriente se va a producir en lugares alejados de la máquina, con lo cual ésta va perdiendo su autonomía. Aparecen diversos tipos de electrificaciones: de corriente continua o alterna.
- El tercer periodo comienza antes de la Segunda Guerra Mundial, con la aparición de convertidores que permitirán transformar la corriente alterna en corriente continua en el interior de la locomotora [URL 15].

1. 8. 1 Motores de tracción eléctrica

1. 8. 1. 1 Tipos de motores para automóviles eléctricos

El tipo de motor eléctrico más empleado en tracción de automóviles eléctricos es el de corriente continua, ya que es de fácil regulación. La regulación puede ser clásica con resistencias, o por puente rectificador controlado. Esta última es electrónica y se emplea según el tipo de alimentación. La mayor desventaja de los motores de corriente continua es su elevado costo de mantenimiento [URL 16].

Dentro de los motores de corriente alterna, el más usado es el asíncrono, trifásico y monofásico. Actualmente se regulan electrónicamente regulando la tensión y la frecuencia de la alimentación por medio de onduladores semicontrolados. Los motores síncronos necesitan un ondulator totalmente controlado en el inducido y puente rectificador en el

inductor. Al ser necesario controlar exactamente la frecuencia de alimentación, su regulación es difícil, siendo poco usado [URL 16].

1. 8. 1. 2 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores

Corriente continua:

- Ventajas:
 - Sencillez en electrónica de control.
 - Sistemas de control económicos y precisos.
- Inconvenientes:
 - No son libres de mantenimiento.
 - Mayor peso y volumen para misma potencia y par que su correspondiente en corriente alterna.

Corriente alterna:

- Ventajas:
 - Robustez mecánica y eléctrica.
 - Reducido peso.
 - Precio.
- Inconvenientes:
 - Electrónica de potencia, control menos preciso.

1.9 Modelado matemático de motores de CD de imán permanente

Ya que los motores de cd se usan en forma extensa en sistemas de control, para propósitos de análisis, es necesario establecer modelos matemáticos para los motores de cd para aplicaciones de control. Se utilizará el diagrama eléctrico de la figura 1.10 para representar un motor de cd de imán permanente [25].

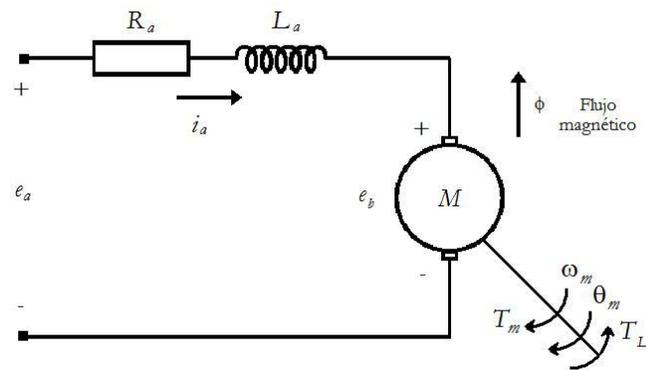


Figura 1.10. Modelado eléctrico de un motor de cd de imán permanente.

El circuito de armadura se modela con una resistencia R_a conectada en serie a una inductancia L_a , y a una fuente de voltaje e_b la cual representa la fuerza contraelectromotriz en la armadura cuando el rotor gira [25]. Las variables y parámetros del motor se definen como sigue:

$i_a(t)$ = Corriente de armadura	L_a = Inductancia de la armadura
R_a = Resistencia de armadura	$e_a(t)$ = Voltaje aplicado
$e_b(t)$ = Fuerza contraelectromotriz	K_b = Constante de la fuerza contraelectromotriz
$T_L(t)$ = Par de carga	ϕ = Flujo magnético en el entre hierro
$T_m(t)$ = Par del motor	$\omega_m(t)$ = Velocidad angular del motor
$\theta_m(t)$ = Desplazamiento del rotor	J_m = Inercia del rotor
K_i = Constante del par	B_m = Coeficiente de fricción viscosa

Con referencia al diagrama del circuito de la figura 1.10, el control del motor de cd se aplica a las terminales de la armadura en la forma del voltaje aplicado $e_a(t)$. Para un análisis

lineal, se supone que el par desarrollado por el motor es proporcional al flujo en el entre hierro y a la corriente de la armadura [25]. Por lo tanto:

$$T_m(t) = K_m(t)\Phi i_a(t) \quad (1.1)$$

Debido a que Φ es constante, la ecuación (1.1) se escribe como:

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (1.2)$$

en donde K_i es la constante del par en N-m/A, Lb pie/A, u oz-plg/A [25].

Mediante la ley de voltajes de Kirchhoff, se obtiene la dinámica eléctrica del motor de cd de la figura 1.10.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (1.3)$$

donde la fuerza contraelectromotriz está dada por:

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \quad (1.4)$$

Por otra parte, a través de la segunda ley de newton se obtiene la dinámica mecánica del motor de cd de la figura 1.10.

$$\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (1.5)$$

en donde $T_L(t)$ representa el par de carga del motor, y representa el par eléctrico generado por el circuito de armadura.

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (1.6)$$

Las ecuaciones (1.3) a (1.6) consideran a $e_a(t)$ como la señal de entrada del sistema; entonces la ecuación (1.3) considera que $di_a(t)/dt$ es el efecto inmediato de aplicar voltaje $e_a(t)$, entonces en la ecuación (1.6), $i_a(t)$ produce el par $T_m(t)$, la ecuación (1.4) define la fuerza contraelectromotriz, y finalmente, la ecuación (1.5), el par $T_m(t)$ produce la velocidad angular $\omega_m(t)$ y el desplazamiento $\theta_m(t)$ [25].

Las variables de estado del sistema se pueden definir como $i_a(t)$, $\omega_m(t)$ y $\theta_m(t)$. Al sustituir directamente y al eliminar las variables que no son de estado de las ecuaciones (1.3) a (1.6), las ecuaciones de estado del sistema de motor de cd escritas en forma matricial son:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} \\ \frac{d\theta_m(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{R_b}{L_b} & 0 \\ \frac{K_i}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e_a(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_L(t) \quad (1.7)$$

Observe que en este caso, las ecuaciones de estado, $T_L(t)$ se tratan como una segunda entrada [25].

El diagrama de estado del sistema se muestra en la figura 1.11 empleando la ecuación (1.7).

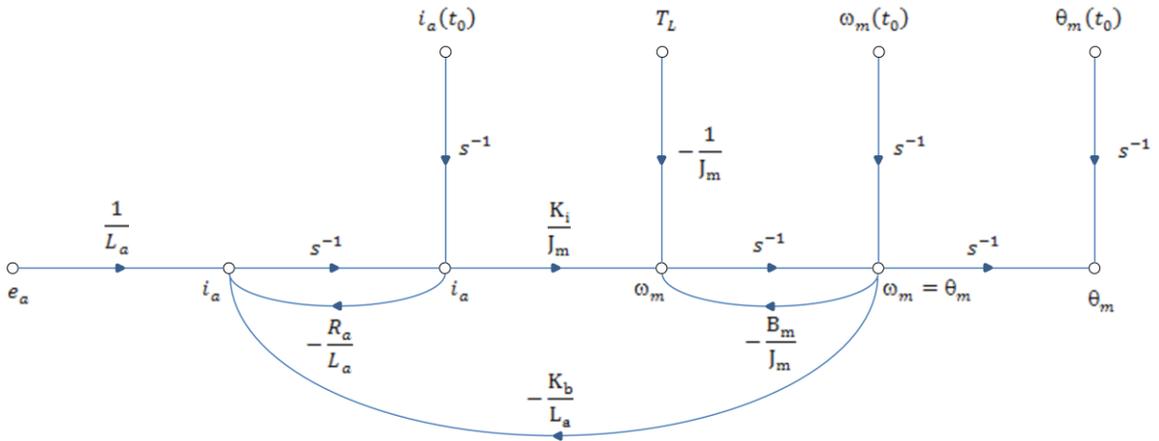


Figura 1.11. Diagrama de estado de un motor de cd.

La función de transferencia entre el desplazamiento del motor y el voltaje de entrada se obtiene del diagrama de estado como:

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_b L_a) s^2 + (k_b k_i + R_a B_m) s} \quad (1.8)$$

en donde $T_L(t)$ se igualó a cero.

La figura 1.12 muestra la representación en diagrama de bloques del sistema de un motor de cd. La ventaja de utilizar el diagrama de bloques es que proporciona una visión clara de la relación de funciones de transferencia entre cada bloque del sistema. Ya que se puede factorizar en el denominador de la ecuación (1.8), *el significado de la función de transferencia $\theta_m(s)/E_a(s)$ es que el motor de cd es esencialmente un dispositivo integrador entre estas dos variables.* Eso ya se esperaba puesto que, si $e_a(t)$ es una entrada constante, el desplazamiento de salida del motor será la salida de un integrador; esto es, se incrementará linealmente con el tiempo [25].

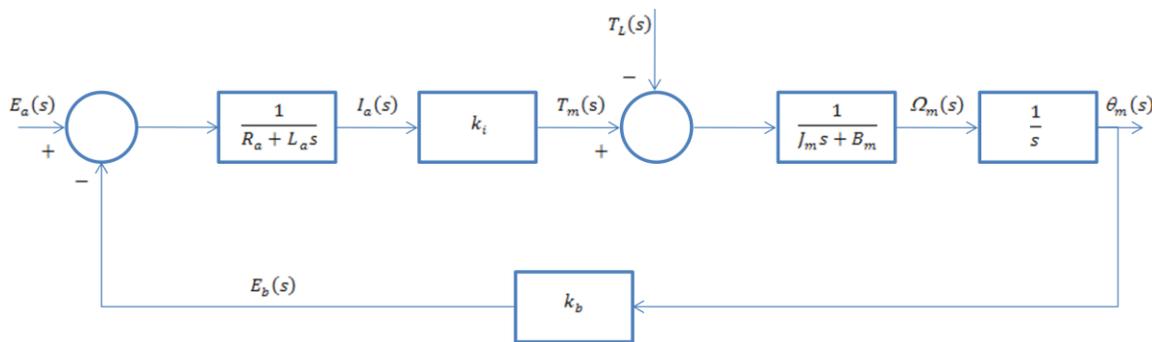


Figura 1.12. Diagrama a bloques de un sistema de motor de cd.

Aunque un motor de cd es por si mismo un sistema de lazo abierto, el diagrama de estado de la figura 1.11 y el diagrama a bloques de la figura 1.12 muestran que el motor tiene “interconstruido” un lazo retroalimentado provocado por la fuerza contraelectromotriz. Físicamente, la fuerza contraelectromotriz representa la realimentación de la señal que es proporcional al negativo de la velocidad del motor. Como se observa en la ecuación (1.7), la constante de la fuerza contraelectromotriz K_b representa un término que se añade a la

resistencia R_a y al coeficiente de fricción viscosa B_m . Por lo tanto, *la fuerza contraelectromotriz es equivalente a una "fricción eléctrica" que tiende a mejorar la estabilidad del motor, y en general, la estabilidad del sistema* [25].

Capítulo 2

Diseño del Sistema

Antes de empezar el diseño de cualquier sistema electrónico, lo primero que se tiene que hacer es plantear el problema, investigar, determinar y seleccionar los componentes necesarios para generar un diagrama a bloques general. A continuación se describen los requerimientos del sistema, para después determinar los elementos que lo formarán.

Lo que se requiere es un variador de velocidad y dirección de un motor de CD, que servirá para crear un vehículo eléctrico, las variaciones de velocidad resultarán en una aceleración y desaceleración del mismo.

2.1 Características específicas

El convertidor CD – CD clase E, es un sistema electrónico que consta de tres bloques importantes que son el de etapa lógica, etapa de acoplamiento y etapa de potencia. Estos se muestran en el diagrama de la figura 2.1.

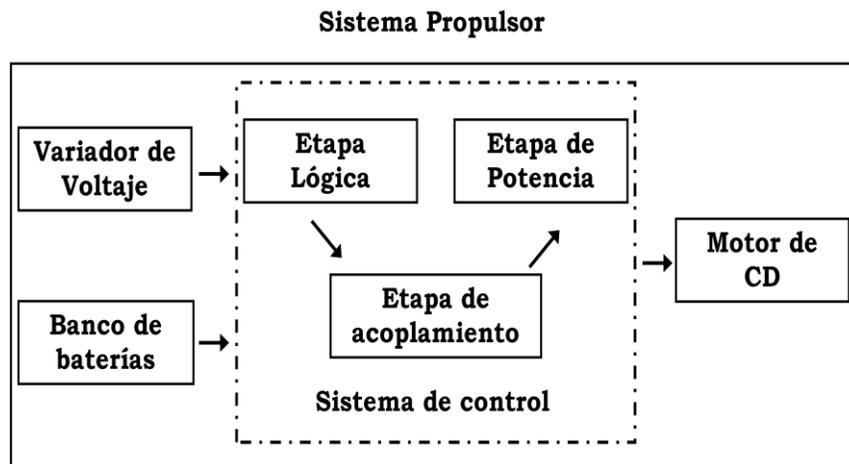


Figura 2.1. Diagrama a bloques del sistema propulsor.

El variador de voltaje proporciona un voltaje entre 0 – 5 V al sistema de control, dependiendo del voltaje recibido se generan las señales correspondientes de la etapa lógica.

El banco de baterías es un arreglo de 3 baterías de 12 V colocadas en serie, las cuales proporcionan 36 V, mismos que son necesarios para alimentar el motor de CD. Debido a la aplicación que se desarrolló, la corriente necesaria es muy elevada, por tal razón se utilizaron baterías de aplicación solar; las cuales son parecidas a las utilizadas en los vehículos de uso diario, la diferencia es que son de ciclado profundo y están especialmente diseñadas para soportar un alto número de descargas, y pueden ser recargados sin afectar su desempeño, a diferencia de las baterías automotrices, que al ser sometidos a condiciones de descargas profundas, pierden más rápidamente su capacidad [URL 3].

El motor de CD tiene una potencia de 1.5 hp, el voltaje con el que trabaja es de 36 V y consume una corriente de 35 A. Teóricamente estos son los valores a considerar para hacer el diseño de nuestro sistema electrónico, pero para tener valores reales, la corriente se midió de forma práctica.

Para medir una corriente elevada se pensó en los amperímetros que utilizan los automóviles, puesto que son fáciles de conseguir y de un costo muy bajo (figura 2.2); el problema que surgió al utilizar este tipo de medidor es que no ofrece una lectura exacta de corriente, y ésta era mayor a 60 A, lo que complicó aún más la situación.



Figura 2.2. Medidor de corriente comercial.

Para poder medir una corriente elevada se utilizó un “SHUNT” el cual se define como una carga resistiva a través de la cual se deriva una corriente eléctrica [URL 4], (ver figura 2.3) la cual tiene una relación de 50 mV – 300 A, es decir, por cada 10 mV se estarán midiendo 60 A.



Figura 2.3. SHUNT.

La figura 2.4 muestra el diagrama de conexiones y la forma en la que se midió la corriente consumida por el motor.

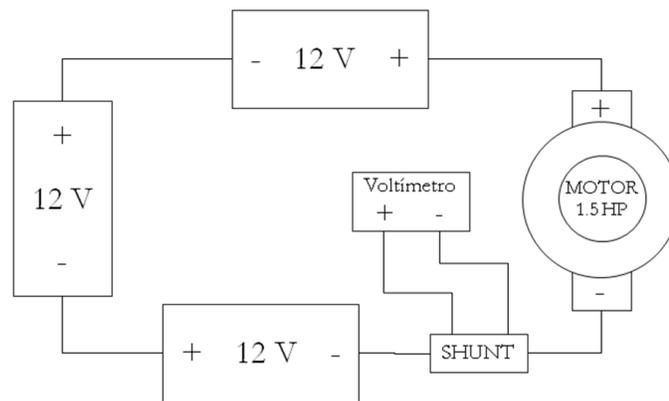


Figura 2.4. Diagrama de conexiones para medir la corriente consumida por el sistema electrónico.

Debido a que el motor es de 36 volts, este voltaje se obtiene haciendo un arreglo de 3 baterías de 12 volts en serie, también se coloca el “SHUNT” en serie; para hacer la medición de la corriente que consume el sistema, se mide el voltaje con un multímetro.

El voltaje medido fue de 34 mV, haciendo una relación de voltajes y corrientes se puede notar que la corriente con la que se debe hacer el diseño del sistema es de 204 A, para no forzar los circuitos se hará el diseño de la etapa de potencia para 220 A. Con esto ya se tienen los parámetros necesarios para iniciar el diseño.

Regresando nuevamente al diagrama a bloques de la figura 2.1 se puede observar que el sistema de control está constituido por tres bloques importantes los cuales se describen a continuación, así como los componentes electrónicos utilizados.

2.2 Requerimientos y especificaciones

El sistema de control transformará un voltaje variable de entrada (0 – 5V) en un voltaje variable de salida (0 - 36V) con una corriente máxima de 220 Amperes; el voltaje de entrada será modificado con un potenciómetro. Para controlar la dirección y la velocidad del motor de CD se implementará un convertidor de CD a CD clase E que manipula tanto las corrientes como los voltajes de carga.

El sistema de control se realizó a partir de tres bloques importantes que se muestran en el diagrama de la figura 2.5.

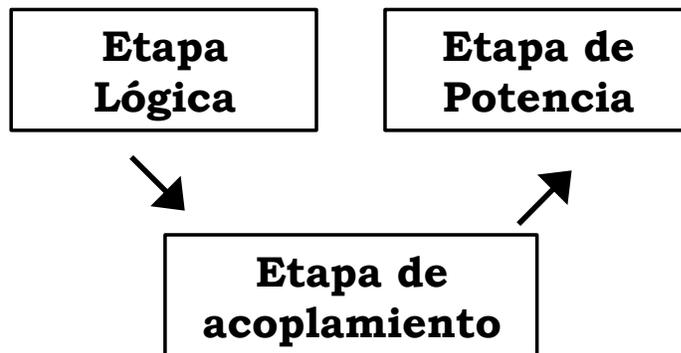


Figura 2.5. Diagrama a bloques del sistema de control del sistema propulsor.

A continuación se explica el desarrollo de las partes que componen al sistema.

2.2.1 Diseño de la etapa lógica

Esta etapa es de suma importancia ya que tiene la función de recibir señales de entrada, interpretarlas y generar señales de salida de control, las cuales ayudaran a manipular la etapa de potencia y así tener un buen control tanto de la velocidad, como de la dirección del motor.

Este bloque genera señales de control PWM (Pulse Wide Modulation) que realizan la activación y desactivación de dispositivos semiconductores de potencia y su modulación estará en función de un voltaje variable de entrada de 0 a 5 V; que viene del variador de voltaje.

La modulación de ancho de pulso (PWM) se obtiene al variar el ciclo de trabajo de una señal periódica, de manera que el tiempo de encendido aumente o disminuya en proporción inversa al tiempo de apagado [1]. Matemáticamente se expresa así:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

D = ciclo de trabajo

τ = tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T = periodo de la función

La figura 2.6 muestra tres señales de PWM diferentes. La figura 2.6a muestra una señal de PWM con un ciclo de trabajo del 10%, es decir que la señal está encendido 10% del periodo y apagado el otro 90%. La figura 2.6b y 2.6c muestran señales de PWM con ciclos de trabajo del 50% y del 90% respectivamente.

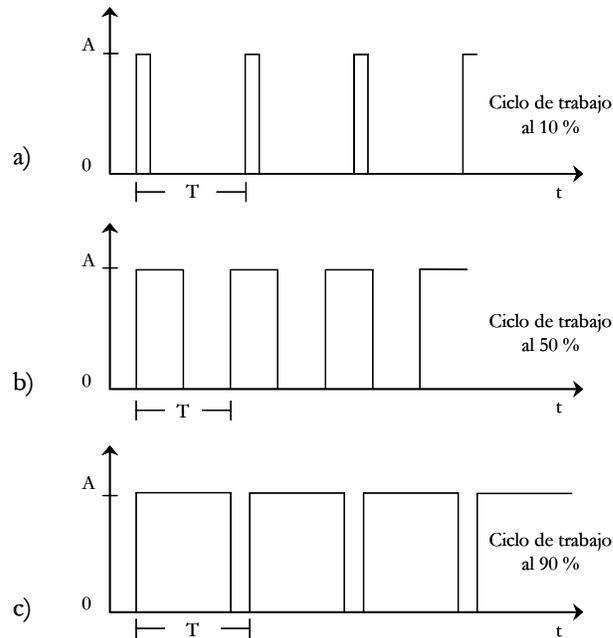


Figura 2.6. Señales de PWM con variación de ciclos de trabajo.

La generación de señales de PWM se puede hacer a partir de diferentes métodos, ya sean de tipo analógico o digital.

Para generar una señal de PWM de forma analógica se pueden utilizar amplificadores operacionales (figura 2.7) [1]. Pero esta opción es descartada ya que, como puede observarse, se necesitan varios circuitos integrados para generar una sola señal, en la aplicación que se está desarrollando se necesitan 2 señales PWM para poder manipular el convertidor CD-CD clase E (puente H).

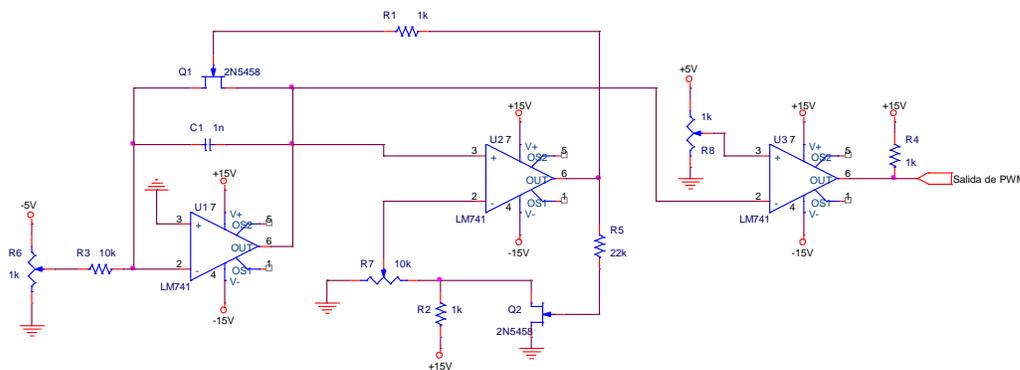


Figura 2.7. Señal de PWM generada a partir de amplificadores operacionales.

Otra opción para generar la señal deseada es utilizando un microcontrolador; por las características con las que cuenta, ya que además de que se generan señales de PWM, se pueden medir corrientes, voltajes, y generar distintas señales.

Las variables de entrada y salida consideradas para este sistema electrónico se muestran en la figura 2.8 y se explican a continuación.

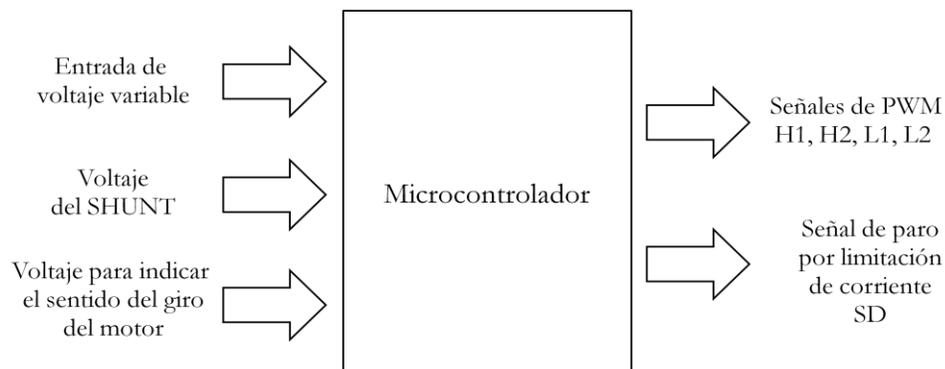


Figura 2.8. Señales de entrada y salida del microcontrolador.

A la entrada del microcontrolador se tiene un voltaje variable de 0 a 5 V. Este voltaje se genera conectando un potenciómetro de 15 K Ω a la fuente de alimentación de 5 V, dependiendo de su valor se genera el ancho de pulso que sirve para la activación y desactivación de los dispositivos semiconductores de potencia.

Como se mencionó en la sección 2.1, el voltaje generado por el “SHUNT” tiene una relación de voltaje/corriente de 50 mV/ 300 A, por lo tanto, se utiliza para protección, esto es para evitar que los dispositivos semiconductores de potencia sean dañados. El voltaje que se mide en el “SHUNT” es proporcional a la corriente consumida por el sistema electrónico.

Primero se hace una comparación de voltajes, esta comparación funciona como un limitador de corriente, y con esto se puede saber en qué momento debe de dejar de funcionar el sistema.

Para el cambio de dirección se emplea una señal digital, esta señal solo será interpretada como un 1 o un 0 lógico. Cuando se encuentre en 1 lógico el sentido de giro del motor será hacia la derecha, y cuando esta señal se encuentre en 0 lógico el sentido de giro del motor será hacia la izquierda.

Para tener el control de un convertidor CD – CD de clase E se deben controlar 4 interruptores, tal como se observa en la figura 1.8, estos interruptores pueden ser transistores de alta o de baja potencia, en este caso se utilizarán MOSFETS de potencia, para controlar los interruptores de la parte alta S1 y S3 se crean las señales de control H1 y H2, y para controlar los interruptores de la parte baja S2 y S4 se crean las señales de control L1 y L2.

A la salida del microcontrolador existen 5 señales que son H1, H2, L1, L2 y SD, a continuación se da una explicación de su función:

H1 y H2 se encargan de la activación de la parte alta del puente H, así mismo L1 y L2 se encargan de la activación de la parte baja del puente H, estas 4 señales tienen un control independiente entre sí, pero son dependientes de los valores de los voltajes de entrada ya que se generan a partir de los valores de voltajes de entrada generados por el potenciómetro, del voltaje que determina el sentido del giro del motor, y del voltaje generado por el SHUNT ya que si excede el valor de 36 mV el sistema automáticamente deja de funcionar para evitar el daño de los componentes.

La señal SD sirve para la activación y desactivación de los controladores que se utilizan en la etapa de acoplamiento, de esta señal se hablará en la sección 2.2.2.

Una vez definidas las señales de entrada y de salida, es necesario hacer una correcta selección de componentes electrónicos para realizar el sistema de control.

Lo que se necesita es la interpretación correcta de las señales de entrada para poder procesarlas y así obtener las señales control y de PWM a la salida. Se utilizó el *microcontrolador ATmega48V* [URL 5], sus características más relevantes se listan a continuación:

- Alto rendimiento, Microcontrolador de 8-Bits de baja potencia

- Segmentos de Alta resistencia de memoria no volátil
- 4, 8, y 16 Kb de memoria flash auto programable
- 256/512/512 Bytes de memoria EEPROM
- 512/1Kb de memoria interna SRAM
- Retención de datos: 20 años a 85°C y 100 años a 25°C
- Características periféricas
 - Seis canales de PWM
 - Comparador analógico
- Características especiales
 - Oscilador interno
 - Fuentes de interrupción internas y externas
- Entradas y salidas
 - 23 líneas programables de entrada y salida
- Voltaje de Operación:
 - 1.8 - 5.5V para el ATmega48V/88V/168V
- Rango de Temperatura:
 - -40°C to 85°C
- Velocidad:
 - ATmega48V/88V/168V: 0 - 4 MHz a 1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz a 2.7 - 5.5V
- Bajo consumo de energía
 - Modo activo:
 - 15 μ A at 32 kHz, 1.8V (incluyendo el oscilador)

Con estas características es posible satisfacer todos los requerimientos de diseño, además de que es un dispositivo económico y está disponible en el mercado.

Una vez seleccionado el microcontrolador se debe programar, para tal fin se emplea un diagrama de flujo, en el cual se muestran las diversas tareas que realizará (ver figura 2.9).

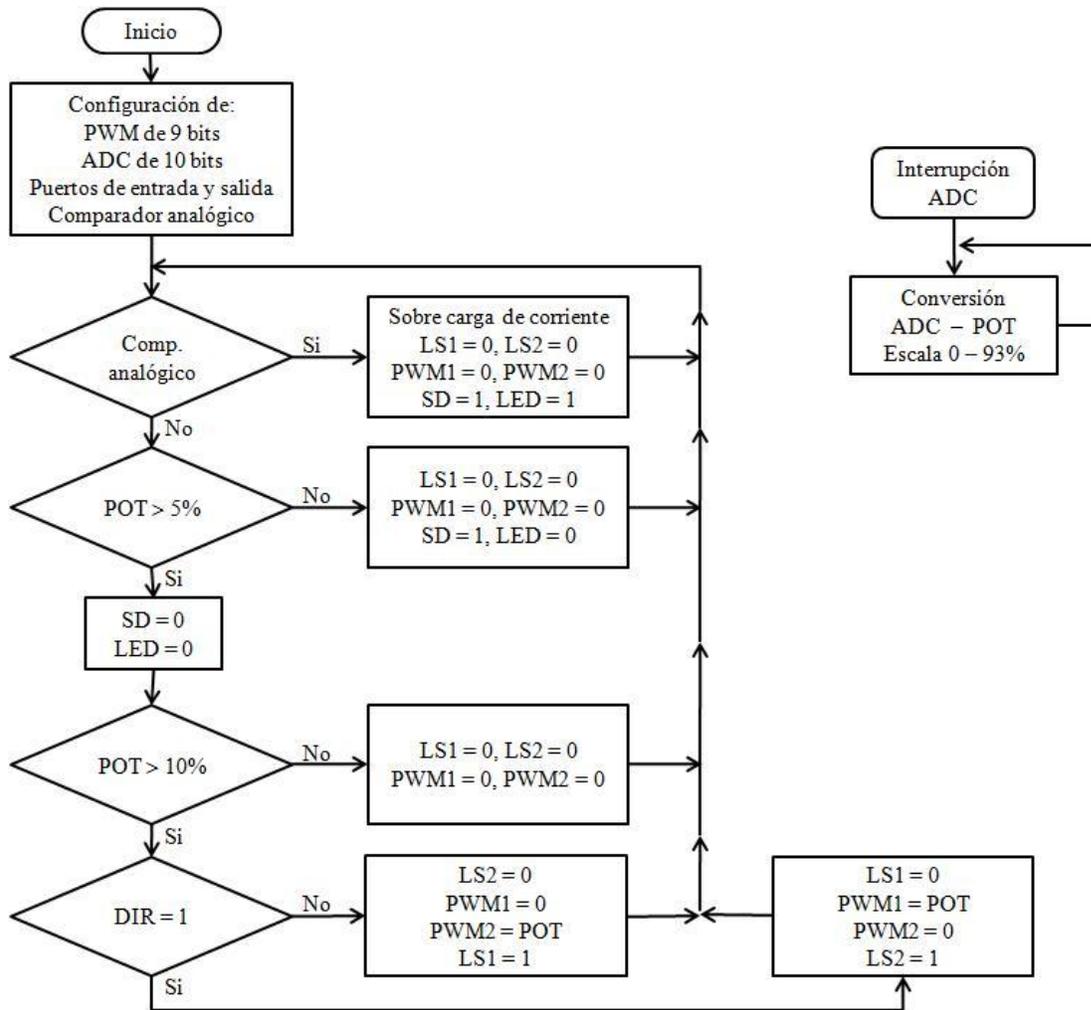


Figura 2.9. Diagrama de flujo.

A continuación se indican las tareas a realizar por el microcontrolador:

- Primero se configuran las señales de PWM, ADC, los puertos de entrada y salida y el comparador analógico.
- Con el comparador analógico se revisa que no exista una sobre carga de corriente para evitar el daño de componentes, si existe una sobre carga de corriente, inmediatamente se desactivan todos los circuitos integrados.
- Si no existe sobre carga se continúa con la lectura del voltaje en el potenciómetro, esto es para generar las señales de PWM a cierto ciclo de trabajo con una frecuencia de 15.7 KHZ, si el voltaje en el potenciómetro es muy bajo, no se hace nada, pero si el voltaje leído supera el 5% se generan las señales de activación de los IR2110.

- Finalmente se revisa en qué sentido se desea que gire el motor.

Con el microcontrolador realizando las tareas deseadas, se agregan dispositivos para complementar la etapa lógica.

Como ya se mencionó, la alimentación del microcontrolador es de 1.8 V a 5.5 V, pero la alimentación general del sistema es de 36 V, por lo tanto se tiene que reducir el voltaje para evitar el daño de algunos componentes. También es necesario reducir el voltaje a 14 V, ya que algunos dispositivos requieren de este valor de alimentación. La figura 2.10a muestra el circuito para convertir de 36 V a 14 V, la figura 2.10b muestra la forma de regular de 36 V a 5 V, otra opción para obtener la fuente de 5 V es tomar la alimentación de 14 V y reducirla con un regulador LM7805, pero si se hace esto se puede llegar a exigir demasiada corriente al regulador de 14 V y se toma el riesgo de dañarlo.

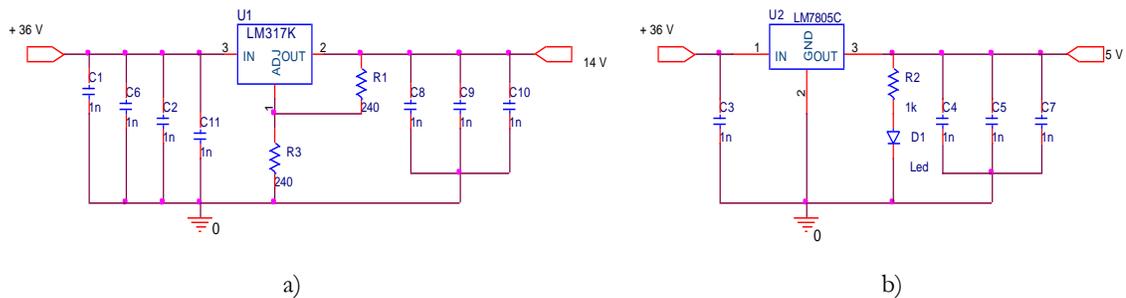


Figura 2.10. Fuentes de alimentación.

En la figura 2.11 observamos el diagrama de conexiones del microcontrolador, por una parte se observa una señal de reinicio (reset) la cual sirve para reiniciar el sistema, por otro lado está conectado el potenciómetro (pedal de aceleración), que sirve para regular el ciclo de trabajo de la señal de PWM y de esta forma controlar la velocidad de giro del motor.

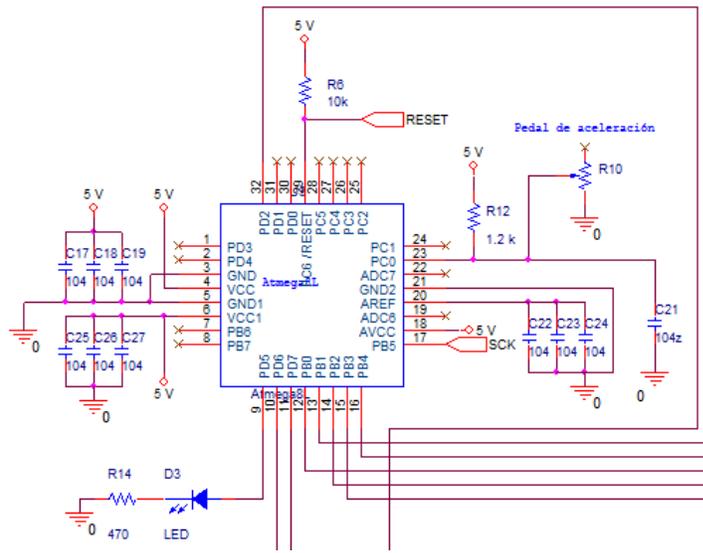


Figura 2.11. Señales de reinicio y pedal de aceleración.

La figura 2.12 muestra el interruptor de dirección, que nos indicará el sentido en el que girará el motor y también el interruptor de la alimentación. Otra parte importante del sistema es la programación del microcontrolador, para esto es necesario hacer uso de los pines MISO, MOSI, y SCK.

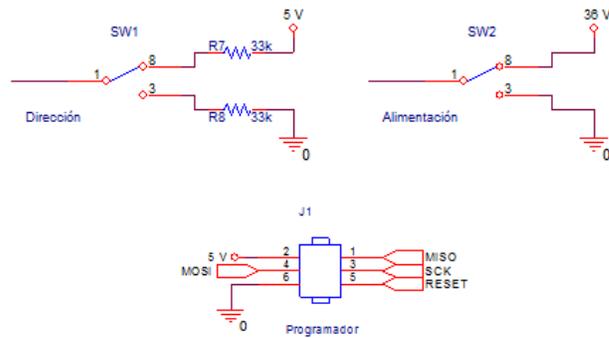


Figura 2.12 Interruptor de principal, señal de dirección y pines de programación.

En la figura 2.13 se muestran 2 señales que son de importancia:

Ajuste de corriente es un voltaje de referencia generado externamente con potenciómetros de precisión conectados en serie, los cuales permiten hacer un divisor de voltaje para tener un voltaje de referencia de comparación en el pin PD7/AIN1 que es la entrada negativa del comparador analógico del microcontrolador, con este voltaje de comparación se hace una limitación de corriente en el sistema.

La señal llamada *Shunt* es el voltaje generado por éste, el cual nos permite determinar la corriente que está consumiendo el sistema, esta señal es conectada al pin PD7/AIN0 que es la entrada positiva del comparador analógico del microcontrolador.

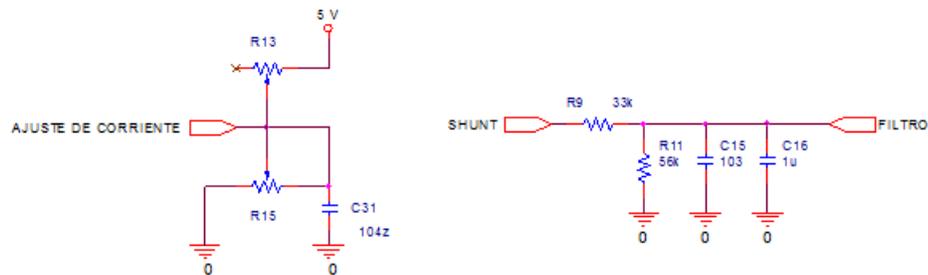


Figura 2.13 señales de ajuste de corriente y shunt.

Teniendo completo el diseño de la etapa lógica se hace el diseño para la etapa de acoplamiento, esto se describe a continuación.

2.2.2 Diseño de la etapa de acoplamiento

La etapa de acoplamiento tiene como función principal proporcionar las señales de control de PWM acondicionadas al MOSFET, ya que no se pueden conectar directamente el MOSFET y el microcontrolador, debido a que los niveles de corriente y de voltaje que son necesarios para su activación son más elevados de los que puede entregar un dispositivo digital, en este caso el microcontrolador; es por eso que se utilizó un circuito acoplador que acondiciona las señales generadas para una correcta activación de los dispositivos semiconductores de potencia (figura 2.14).

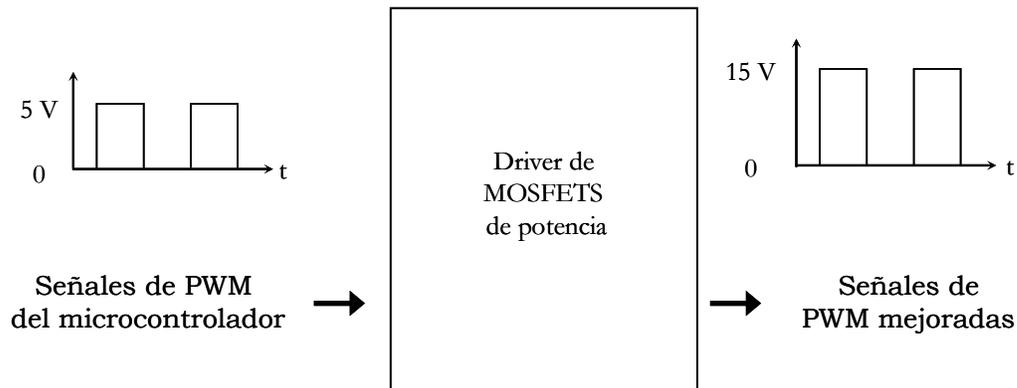


Figura 2.14. Señales de PMW mejoradas.

El circuito acoplador (driver), se encarga de acondicionar las señales generadas por el microcontrolador hacia el MOSFET.

Debido a la aplicación desarrollada, el controlador (driver) utilizado debe ser de alto voltaje y alta frecuencia para MOSFET's de potencia con canales de salida independientes referenciados tanto en la parte alta como en la parte baja y que puedan entregar más de 1 A; las entradas lógicas deben ser compatibles con salidas CMOS, esto es para que se puedan conectar directamente al microcontrolador y así no se genere ningún daño al sistema digital.

Tomando en cuenta las necesidades antes mencionadas, el controlador seleccionado para esta aplicación es el IR2110 [URL 6]. A continuación se mencionan sus características más relevantes:

- Canal flotado diseñado para operación en *arranque (bootstrap)*
- Rango de operación de +500 V a + 600 V
- Tolerante a transientes de voltajes negativos
- Rango de voltaje en la compuerta de 10 V a 20 V
- Corriente de salida ± 2 A
- Protección de bajo voltaje para ambos canales
- Compatibilidad con 3.3 V lógicos

- Fuente lógica separada con un rango de 3.3 V a 20 V
- Tierras lógica y de potencia con un desplazamiento de ± 5 V
- Entradas CMOS accionadas en flanco de bajada
- Retardo de propagación para ambos canales
- Salidas en fase con las entradas

Para el circuito de control se utilizan dos drivers IR2110 ya que solo cuenta con dos canales. Estos circuitos integrados fueron escogidos porque tienen controladores independientes en la parte alta y baja que son utilizados para la correcta activación de los MOSFETS de potencia que conforman el convertidor CD – CD clase E. El diagrama de conexiones se muestra en la Figura 2.15.

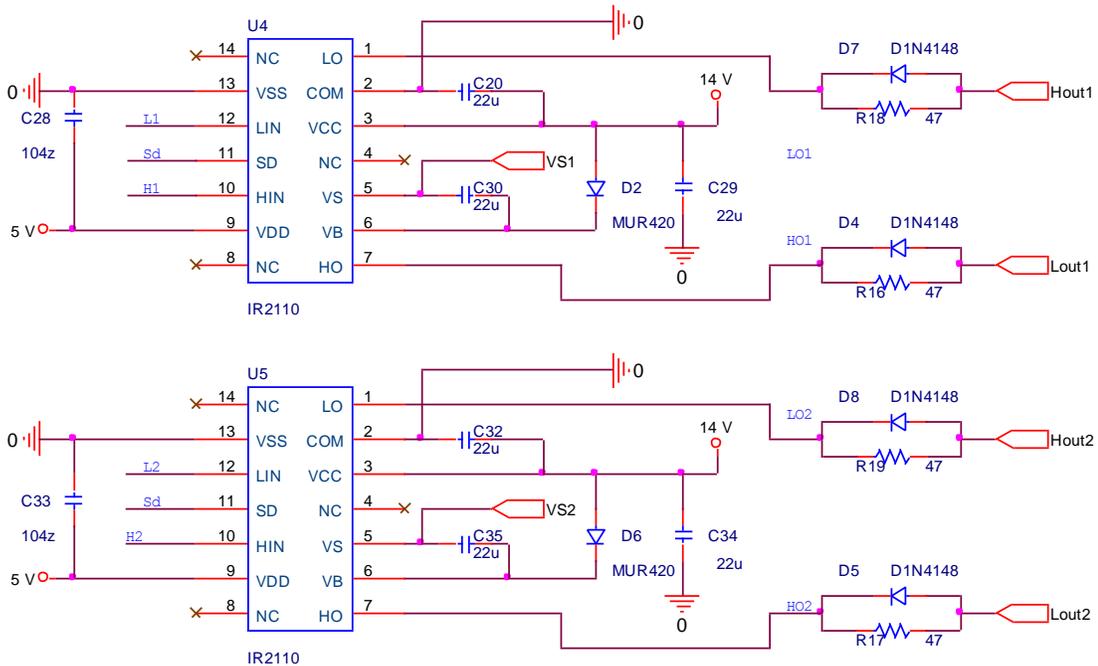


Figura 2.15. Diagrama de conexiones de la etapa de acoplamiento.

Las señales de entrada del IR2110 vienen del microcontrolador del circuito de la parte lógica que son H1, H2, L1, L2, y se conectan a los pines 10 y 12 de cada circuito integrado, estos trabajan de forma simultánea, controlando la parte alta y la parte baja del Puentes H como se muestra en la tabla de la figura 1.9b.

En el arreglo de MOSFETS M1 y M4 mostrado en la figura 2.17 tienen que trabajar simultáneamente, el IR2110 puede proveer una parte alta y una baja para ambos interruptores y conmutar ambos MOSFETS al mismo tiempo. El IR2110 es alimentado con +14V DC (a través del pin 3). Para VDD, el voltaje debe ser menor a 14V así que fue alimentado con 5V en el pin 9.

Las señales Hout y Lout son las que se encargan de la activación de los dispositivos semiconductores de potencia, y la señal SD es la encargada de la activación del driver.

El IR2110 necesita de un circuito de arranque el cual consiste en el capacitor C30 y C35, se utilizan diodos de recuperación rápida MUR420 para minimizar voltajes pico en el canal de la parte baja, debido a que esta es la única que tiene referencia a tierra. El canal de la parte alta es flotado ya que no es referenciado. Los capacitores de arranque minimizan la sobrecarga y los picos de voltaje que puedan existir entre VS y VB (pines 5 y 6 respectivamente), esto se puede observar en la figura 2.15.

Un resistor debe ser puesto en serie con la compuerta del MOSFET para reducir los rizados de voltaje. Esos rizados de voltaje son causados por capacitancias e inductancias parásitas de los MOSFETS, que a su vez forman un circuito resonante, el cual es causante de un voltaje pico, por esta razón es puesto el resistor en serie, para amortiguar los rizados de voltaje (figura 2.15).

Escoger el valor ideal de un resistor para la compuerta del MOSFET puede ser difícil. Un resistor con un valor alto puede reducir el rizo de forma considerable, pero la eficiencia en la conmutación de la compuerta se reduce. La eficiencia es afectada debido a que la resistencia causa que el voltaje en la compuerta del MOSFET sea menor. Con un voltaje pico menor, la eficiencia de conmutación disminuirá.

Para la conmutación de los MOSFETS, tanto en la parte alta (HO pin7) como en la parte baja (LO pin1) del IR2110 se han conectado resistencias con un valor de 47Ω hacia las compuertas de los MOSFETS, también se agregaron diodos en paralelo para eliminar los picos negativos de voltaje, de este modo, se previenen rizados en la compuerta y se evita que la

eficiencia de conmutación sea afectada. Las señales vistas después del resistor son llamadas Hout y Lout y estas son las que se conectan a las terminales de compuerta (gate) de los MOSFETs (figura 2.15).

VS que es el pin 5 es conectado a la terminal de fuente (source) de los MOSFETS, así mismo todas las señales acondicionadas (Hout, Lout) van directo a un conector, en el cual se harán las conexiones con el puente de potencia de manera manual (figura 2.15).

Una vez realizados los diseños de la etapa lógica y de acoplamiento, falta elaborar el diseño de la etapa de potencia, esta última no es menos importante, pero debido a que se necesita de las dos antes mencionadas se dejó para el final, a continuación se describe como se realizó el diseño.

2.2.3 Diseño de la etapa de Potencia

El dispositivo central del sistema son los MOSFETS de potencia, por lo tanto se utilizarán conocimientos en electrónica de potencia; esta elección se hizo debido a los altos niveles de corriente y voltaje que pueden manejar, además cuentan con una conmutación rápida.

Existen módulos de MOSFETS los cuales manejan corrientes hasta de 400 Amperes pero su costo es elevado (aproximadamente 450 dólares), entonces para hacer una reducción de costos se hizo un arreglo de MOSFETS (figura 2.16) para que trabajen en paralelo y sean capaces de controlar una corriente elevada (220 A).

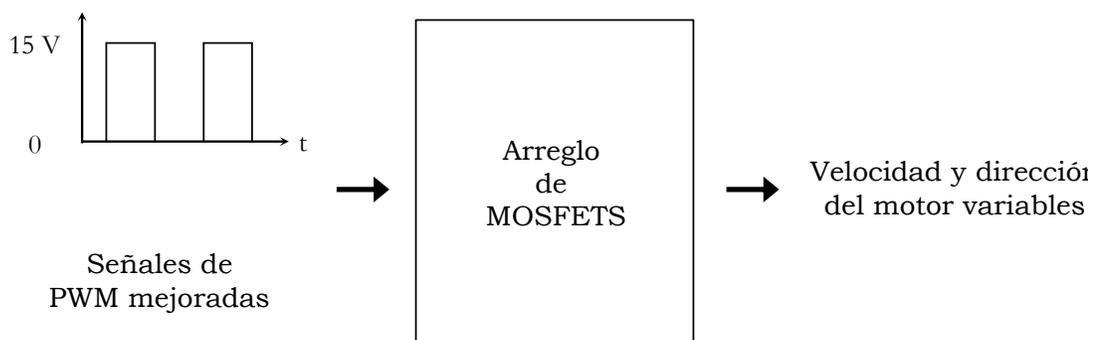


Figura 2.16. Aplicación de los MOSFET S de potencia.

El MOSFET elegido para este proyecto es el IRFPS3810 [URL 10]. Este fue seleccionado debido a que tiene una baja resistencia estática de encendido de $9\text{ m}\Omega$, soporta un voltaje hasta de 100 V y tiene una alta capacidad de manipulación de corriente de 105 A , así que empleándolos en paralelo puede manipular una corriente de 315 A .

El pin de drenaje (*drain*) del IRFPS3810 también se encuentra en la parte trasera del MOSFET, de este modo es como se harán arreglos de 3 MOSFETS conectados en paralelo (ver figura 2.17) para cada parte del convertidor cd – cd clase E.

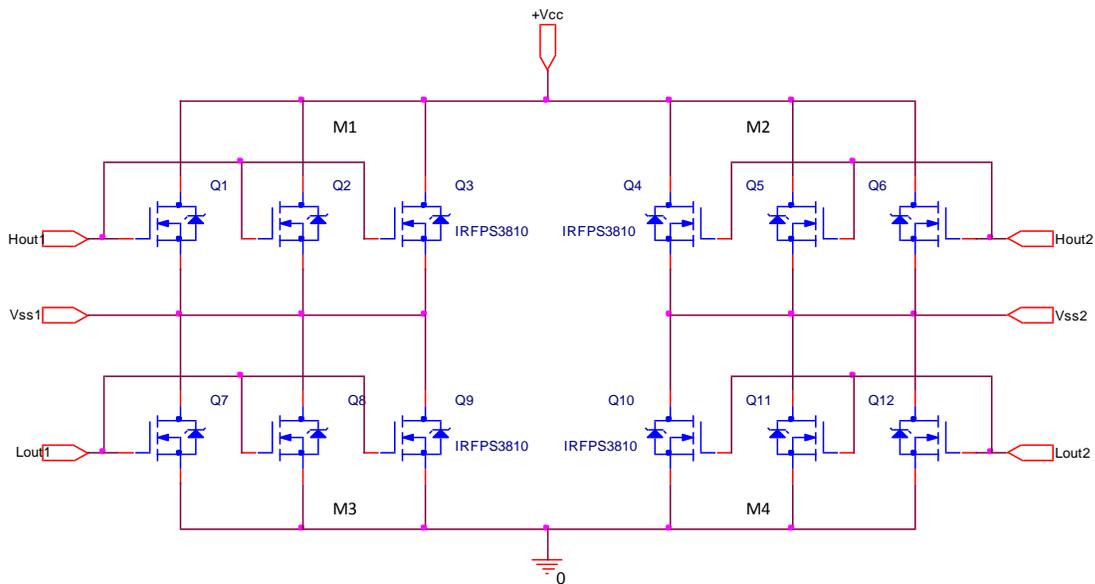


Figura 2.17. Diagrama de conexiones de los MOSFETS en paralelo.

Debido a que en el diagrama de conexiones del puente H la parte alta se comparte al drenaje (*drain*) de los MOSFETS, ambos canales se conectarán con el mismo disipador de calor para lograr una conexión en paralelo. En la parte baja se conectarán de forma individual dos disipadores de calor para cada canal, ya que no tienen terminales en común.

Teniendo el diseño del sistema de control de la etapa lógica, las señales mejoradas de la parte de acoplamiento y el arreglo de MOSFETS solo queda implementar el sistema, eso se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Implementación del sistema

En este capítulo se muestra la implementación del sistema electrónico, y se explican a detalle los pasos que se siguieron, desde la programación del microcontrolador, hasta la elaboración de los circuitos impresos.

3.1 Implementación del sistema digital

Basándose en el diseño del capítulo anterior, se conectan los componentes en un protoboard para hacer las pruebas necesarias de conexión y verificar un buen funcionamiento.

Una vez ensamblado el sistema, se tiene que hacer la interpretación del diagrama de flujo mostrado en la figura 2.9, esto es para la elaboración del programa que permita el correcto funcionamiento del microcontrolador; para esto se emplea el software llamado AVR Studio 4 (figura 3.1), el lenguaje de programación utilizado es C (anexo 1).

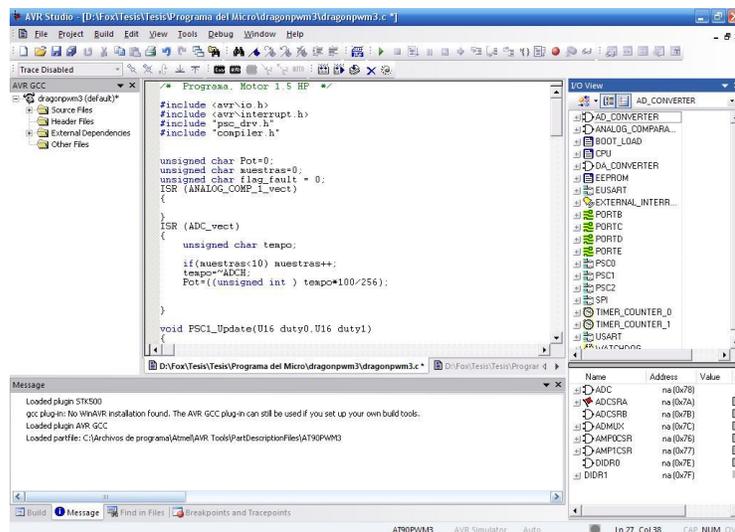


Figura 3.1. Ventana principal del software ARV Studio 4.

La programación del microcontrolador se hace mediante los pines MISO(PD2, pin 5), MOSI(PD3, pin6), SCK(PD4, pin16), RESET(PE0, pin3), VCC(pin8) y GDN(pin9), estos son los únicos que se necesitan para realizar esta operación.

En primera instancia, la programación se prueba en un protoboard independiente de la etapa de acoplamiento, con la finalidad de evitar posibles daños a los componentes que se encuentran inhabilitados al momento de conectar la alimentación del microcontrolador para su programación.

Terminada y verificada la etapa lógica, se procede a la implementación del sistema de acoplamiento, esto se describe a continuación.

3.2 Implementación del sistema de acoplamiento

Para la etapa de acoplamiento se emplea el diagrama esquemático de la figura 2.15. Ya con los sistemas conectados y en perfecto funcionamiento se realiza el circuito impreso para el montaje de los componentes en la placa. El diagrama esquemático general se observa en la figura 3.2.

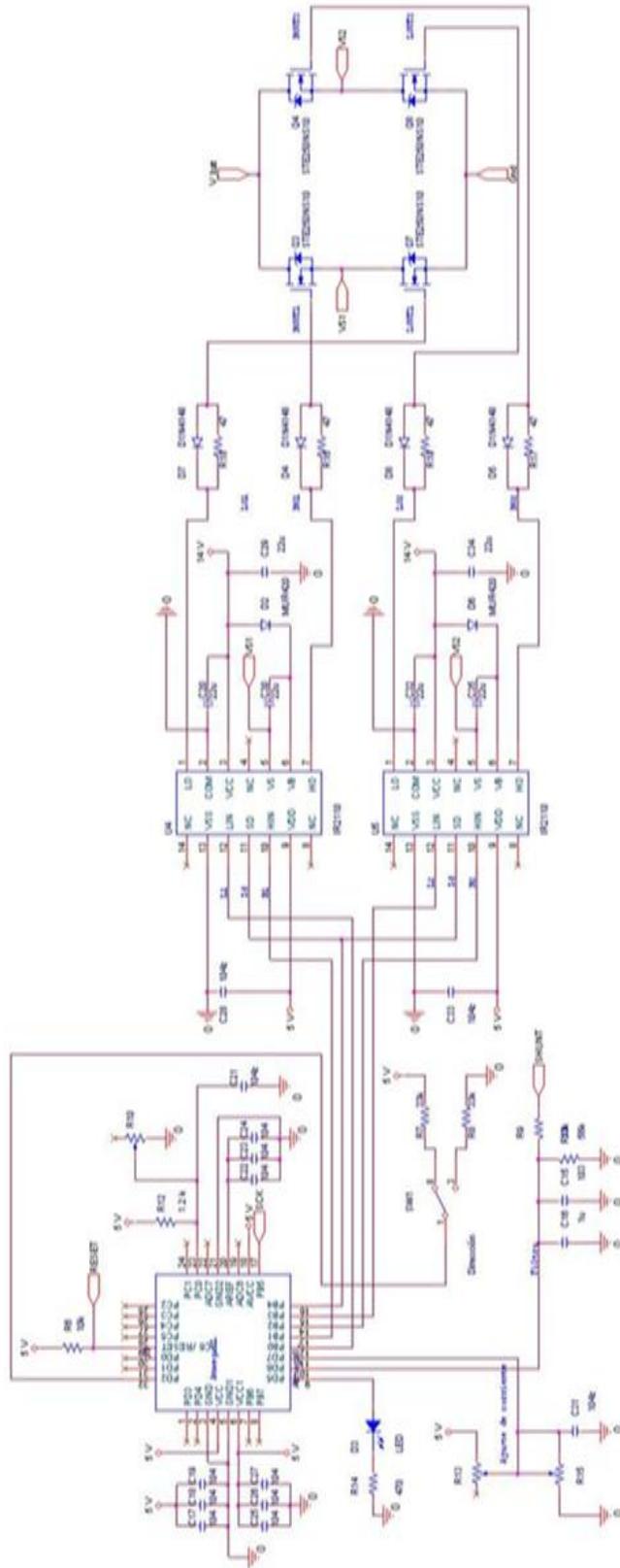


Figura 3.2. Diagrama general de conexiones.

3.3 Implementación del sistema de potencia

Para la implementación de la etapa de potencia se parte de la Figura 2.15, la cual muestra una conexión de MOSFETS en paralelo, al intentar hacer las conexiones se encontró con un problema, este es el encapsulado (figura 3.3).

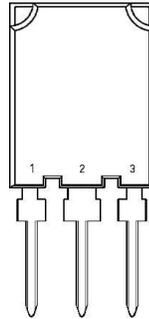


Figura 3.3. Encapsulado del MOSFET IRFPS3810.

Se quiere que la corriente de 220 A se divida en 3 MOSFETS, es decir un promedio de 73 Amperes por cada uno. Por esta razón se debe colocar un buen disipador de calor para evitar el calentamiento y el daño de los MOSFETS, así mismo se debe lograr que los pines compuerta (gate, pin 1), drenaje (drain, pin2), y fuente (source, pin3) se conecten entre sí.

Como podemos observar en la figura 3.3, el encapsulado de este MOSFET no tiene orificio alguno con el cual se pueda sujetar a algún disipador de calor, tampoco se encontró alguna base que soporte tanta corriente y en la que se puedan hacer las conexiones de los pines de forma simple.

En total se haría una conexión de 12 MOSFETS y esto involucra un riesgo, ya que si algún componente no hace bien contacto o tiene una mala conexión se pueden dañar, o incluso por la corriente manejada pueden explotar los dispositivos semiconductores poniendo en riesgo la integridad de la persona que se encuentra implementando este sistema.

Para evitar más riesgos se buscó otra opción de MOSFET que tuviera un encapsulado más viable para esta aplicación, el que se eligió fue el STE250NS10 [URL 11] ya que cuenta con un encapsulado el cual permite que las conexiones al sistema sean más fáciles, también cuenta con características muy atractivas, las cuales son una baja resistencia

de encendido de $4.5 \text{ m}\Omega$, soporta un voltaje de 100 V y tiene una alta capacidad de manipulación de corriente de hasta 220 A . En la figura 3.4 se muestra el encapsulado y el diagrama esquemático interno.

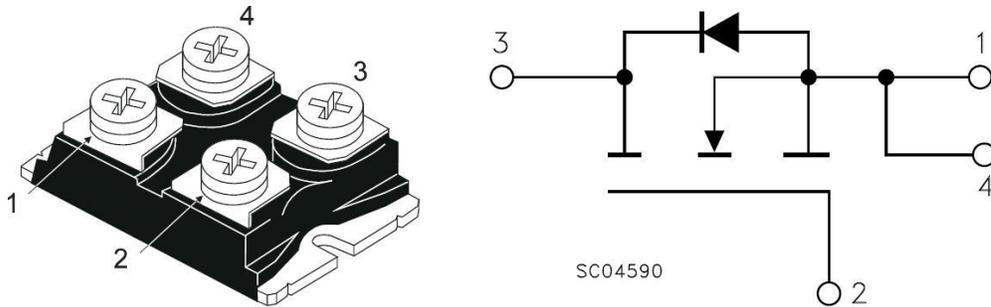


Figura 3.4. Encapsulado y diagrama esquemático interno del MOSFET STE250NS10.

En el diseño de la etapa de potencia aparece un diodo, este es un diodo interno que viene integrado con el MOSFET, pero para reforzarlo y evitar problemas se utilizó un diodo que tiene el mismo encapsulado que el del MOSFET.

El diodo elegido fue el STPS200170TV1 [URL 12], además del encapsulado se eligió porque es un diodo doble, que soporta un voltaje de 170 V y trabaja a 100 A , como vienen dos diodos en este encapsulado con estas características, si se conectan en paralelo se puede decir que trabaja a 170 V y a 200 A . En la figura 3.5 se observa el encapsulado y el diagrama esquemático interno.

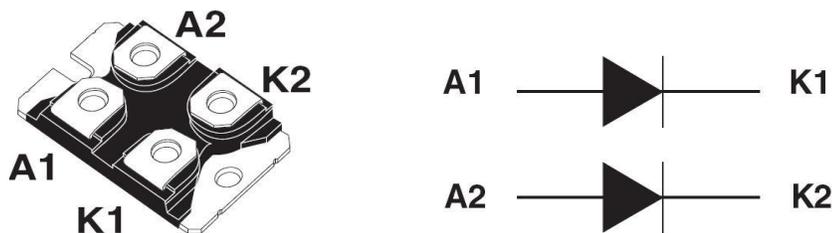


Figura 3.5. Encapsulado y diagrama esquemático interno del DIODO STPS200170TV1.

Con los MOSFETS y los diodos listos se hace el montaje de los componentes en una placa de aluminio que a su vez servirá como disipador de calor. Para conectar los componentes entre sí, fue necesario emplear láminas de latón, las cuales servirán de conductores. En la figura 3.6 se observan las conexiones realizadas para la etapa de potencia.

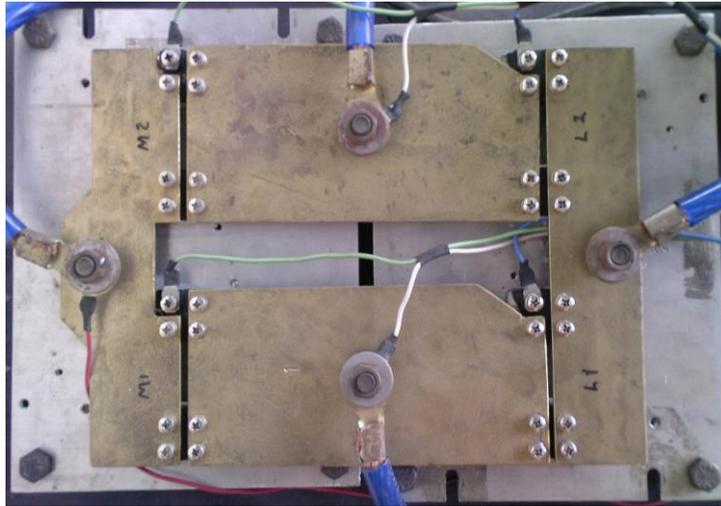


Figura 3.6. Diagrama de conexiones del circuito electrónico de potencia.

Como la corriente que se manipulará para el funcionamiento de este sistema es elevada, se utilizó un cable de corriente de calibre cero. Se seleccionó esta opción debido a que entre mayor sea el grosor del cable, menor será el calentamiento, por lo tanto se transfiere mejor la energía. Este cable fue utilizado para hacer las respectivas conexiones entre las baterías y la etapa de potencia, así como el motor con la etapa de potencia.

Lo único que falta para terminar el sistema de control es la elaboración del circuito impreso y el montaje en placa, así como la implementación del sistema móvil de pruebas, esto se describe en las siguientes secciones.

3.4 Elaboración del circuito impreso y el montaje en placa

En el sistema electrónico desarrollado se utilizan componentes de montaje superficial, por lo tanto, se elabora un circuito impreso de dos caras. Esto se realizó con el software Orcad Capture CIS versión 9.00.1153 y con el software Orcad Layout plus versión 9.00b. El primero se utilizó para elaborar el diagrama esquemático y para hacer las respectivas conexiones entre componentes, el segundo para elaborar el circuito impreso.

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran las caras superior e inferior del circuito impreso respectivamente.

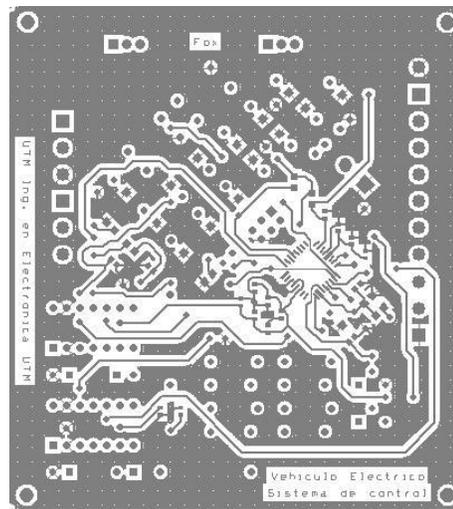


Figura 3.7. Cara superior de la placa del circuito impreso.

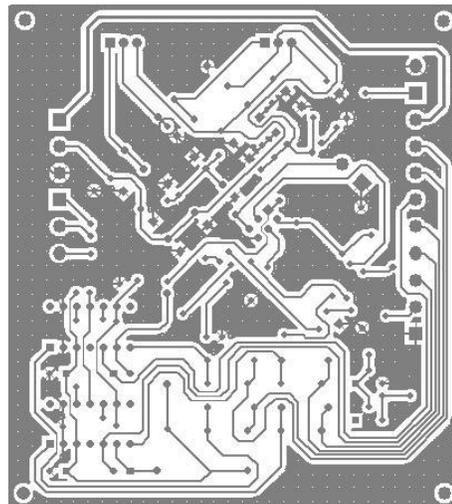


Figura 3.8. Cara inferior de la placa del circuito impreso.

En la cara superior es donde se soldarán los componentes de superficie. Las dimensiones de la placa son de 8.5 cm de ancho por 9.5 cm de largo.

La placa se tiene que limpiar muy bien con una lija de agua, esto es para quitar las impurezas que tenga el cobre, después se pone el acetato con la cara de la tinta impresa hacia la placa, con una plancha tibia se le aplica calor hasta que la pintura se quede en el cobre, eso se puede observar en la figura 3.9.

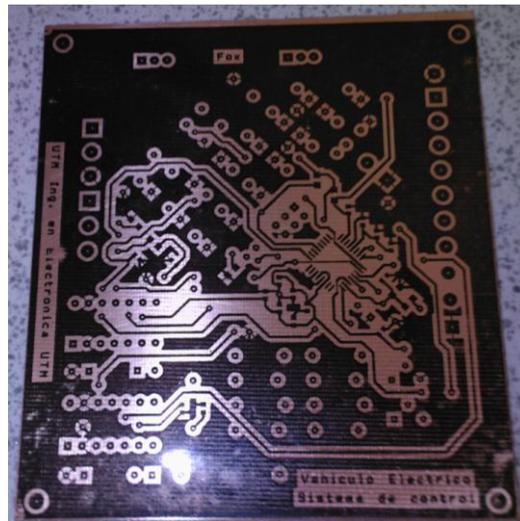


Figura 3.9. Circuito impreso en la placa de cobre.

El área sombreada será la que se conservará el cobre, y el área que no tiene pintura es la que se eliminará. Si llegara a quedar algún punto o alguna pista donde se vea discontinuidad se remarca con un plumón de aceite donde esté falto de color para que no exista ningún problema a la hora de poner la placa en cloruro férrico que es comúnmente llamado ácido.

Para que el ácido tenga una mayor reacción se mezcla con agua tibia, se debe hacer con mucho cuidado para evitar accidentes.

Cuando una cara esta lista, se perfora la placa para hacer que coincidan los componentes de un lado y otro, y se repite el mismo proceso de pasar el acetato a la placa

con ayuda de la plancha para que la pintura se quede en el cobre y nuevamente se coloca en ácido.

En la figura 3.10 se muestra la placa de cobre terminada, para que quede bien limpia y se remueva bien la pintura de las pistas lo que se hace es limpiarla con thinner, preferentemente hay que ponerse guantes para evitar irritación en la piel.

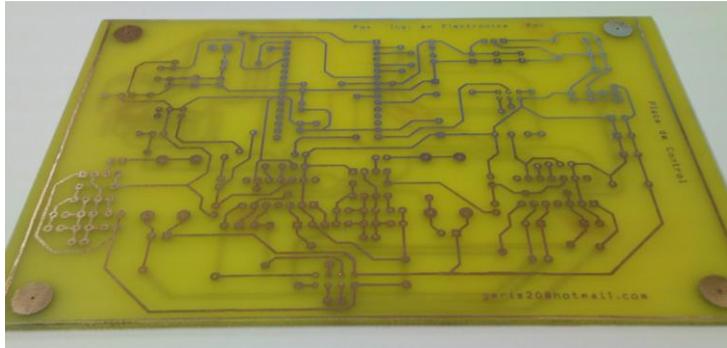


Figura 3.10. Circuito impreso de dos caras.

Lo siguiente es soldar los componentes, primero se empieza con los más pequeños, es decir, los que quedan más a ras de placa, y así hasta soldar los que son más altos y estorbosos, para evitar dañar los componentes de superficie, estos son soldados al final. La figura 3.11 muestra la placa terminada con todos los componentes electrónicos soldados.

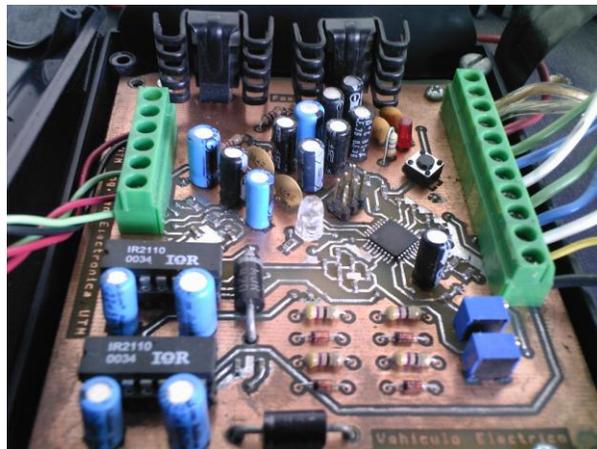


Figura 3.11. Circuito electrónico de control.

3.5 Implementación del sistema móvil de pruebas

Con el sistema electrónico implementado y funcionando, es necesario hacer un móvil en el cual se puedan hacer las pruebas finales. Una vez unidos el sistema electrónico con el dispositivo móvil al que se le puede llamar vehículo eléctrico. Este proceso se describe a continuación.

Primeramente se elaboró el chasis, mostrado en la figura 3.12, este chasis se elaboró de algunos materiales reciclados, como son rines y llantas de bicicletas, fierro tubular, lámina, madera, etc.



Figura 3.12. Chasis del vehículo eléctrico.

En un principio se realizó una conexión directa del motor con el eje de tracción del vehículo eléctrico (figura 3.13), el problema que se presentó es que el motor se forzaba demasiado, haciendo que tuviera un mal desempeño y la exigencia de corriente fuera elevada.



Figura 3.13. Motor conectado directamente al eje de tracción.

Para evitar el inconveniente antes descrito, fue necesario emplear una serie de engranes para aumentar el torque y la potencia de salida del motor (figura 3.14); cuando el engrane del motor se conecta a uno de mayor tamaño se reduce la velocidad del eje secundario de rotación, y se reduce el torque, este último engrane se conecta a otro grande (implementado con un engrane de una estrella de cambio de velocidades de bicicleta) al eje de tracción, donde se logra una segunda reducción en velocidad, de esta manera se reduce el torque en el eje de tracción del vehículo, y en consecuencia se reduce el esfuerzo realizado por el motor.



Figura 3.14. Juego de engranes.

El sistema de frenado utilizado es el que se emplea en las bicicletas de montaña, es un sistema de disco ventilado, se hicieron adaptaciones en el volante y en el eje para poder hacer este montaje. La figura 3.15 muestra el sistema de frenado.

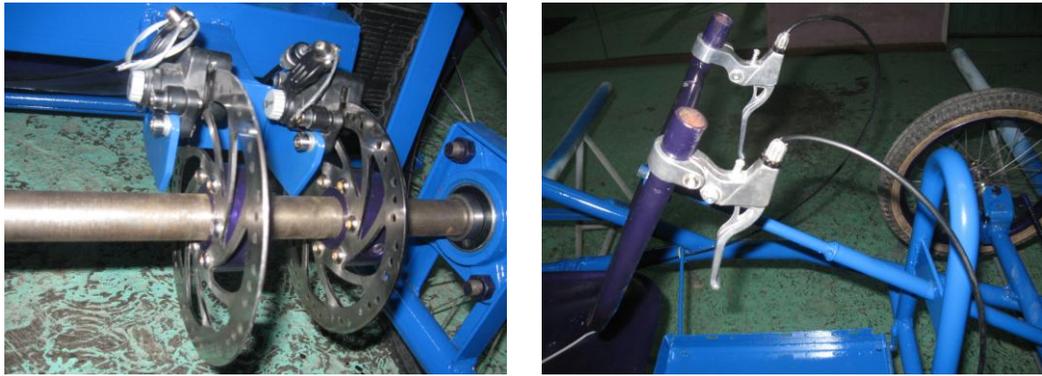


Figura 3.15. Sistema de frenado del vehículo eléctrico.

Para poder hacer la variación de velocidad de una forma cómoda y segura, se empleó un pedal que posee un potenciómetro, el cual permitirá la aceleración o desaceleración, ya que éste tiene un resorte, el cual hace que el potenciómetro regrese a su estado inicial cuando se deja de presionar (figura 3.16)



Figura 3.16. Adaptación del potenciómetro al pedal de aceleración.

Una vez terminado el sistema (anexo 2), se hacen pruebas en conjunto, es decir, se hará trabajar el sistema electrónico con el sistema mecánico. Como es un proyecto de grandes dimensiones estas pruebas se llevarán a cabo en una cancha de futbol rápido, esto es con la finalidad de contar con el espacio suficiente para obtener mejores resultados. Esa documentación la podemos encontrar en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Pruebas y resultados

En este capítulo se exponen las pruebas que se realizaron para verificar el funcionamiento del sistema así como los resultados obtenidos, se observarán las señales de las diferentes etapas del sistema. Por las dimensiones del proyecto, algunas de las pruebas se realizaron en los laboratorios avanzados de electrónica y otras en la cancha de fútbol rápido de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

4.1 Sistema digital

En esta sección se mostrarán los datos obtenidos en el laboratorio, las mediciones se realizaron utilizando un pequeño motor de prueba, un osciloscopio y una fuente de voltaje. Las mediciones se realizaron a la salida del microcontrolador, para verificar que el sistema responde correctamente a las distintas señales de entrada y así pasar a las siguientes pruebas.

En la figura 4.1 se muestra la señal de activación de uno de los controladores de acoplamiento (IR2110) que son generadas por el microcontrolador; en el canal 1 se puede observar la señal modulada por ancho de pulso (PWM) HS1 trabajando a un 50%. En el canal 2 se observa la señal de 0 V LS1.

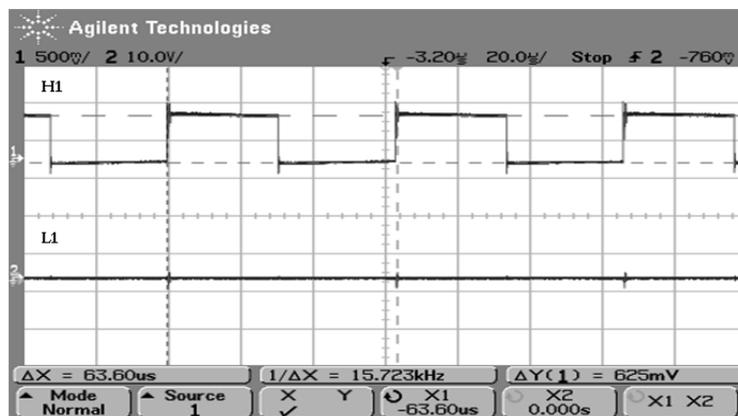


Figura 4.1. Señales de activación H1 y L1 generadas por el microcontrolador.

Como se puede observar en la figura 4.2 se muestran las dos señales de activación del otro controlador de acoplamiento (IR2110). La señal HS2 que es una de las señales de activación del dispositivo semiconductor de la parte alta del sistema tiene un voltaje de cero volts, y la señal LS2 que representa una de las señales de activación del dispositivo semiconductor de la parte baja del sistema se encuentra activa con una amplitud de 5 V, esto con el objeto de mantener los niveles de voltaje necesarios para el funcionamiento correcto del circuito pulsador clase E (figura 1.8).

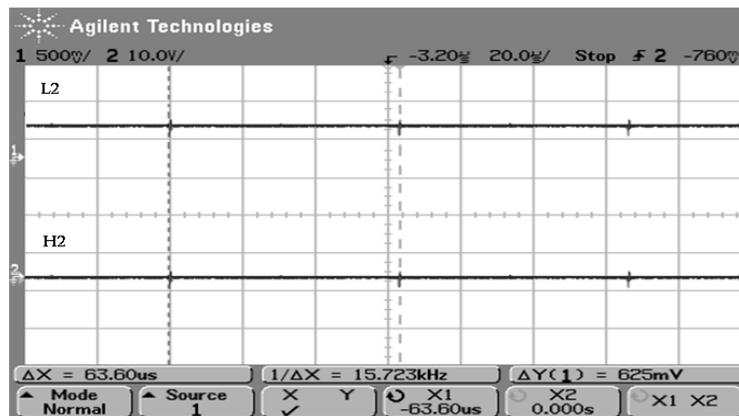


Figura 4.2. Señales de activación H2 y L2 generadas por el microcontrolador.

4.2 Sistema de acoplamiento

Al igual que en el sistema digital, se muestran las señales del sistema de acoplamiento, las cuales cumplen con los requisitos de amplitud en voltaje para la activación de los dispositivos semiconductores de potencia.

Las señales de salida del acondicionador de señal (IR2110) para los MOSFETs Hout1, Lout1, Hout2 y Lout2 (capítulo 2, sección 2.2.2) se pueden observar en las figuras 4.3, y 4.4 respectivamente.

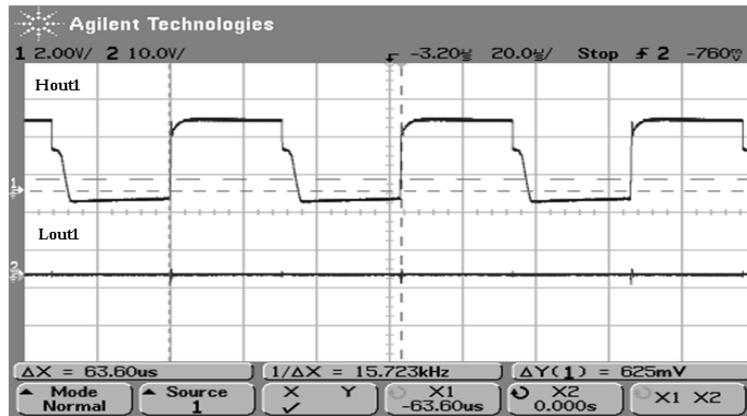


Figura 4.3. Señales mejoradas Hout1 y Lout1 obtenidas del IR21110.

Las mediciones realizadas se hicieron con puntas atenuadoras, por eso es que algunos voltajes son menores a 5 V en las imágenes mostradas. Así mismo, el sistema se probó a escala, es decir, con un voltaje de alimentación de 20 V, este voltaje es menor al voltaje con el que se alimentará el sistema que es de 36 V y se utilizó un motor de CD de 24 V.

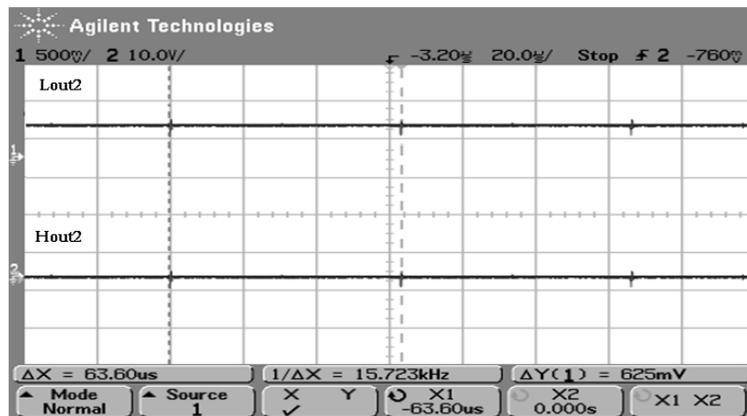


Figura 4.4. Señales mejoradas Hout2 y Lout2 obtenidas del IR21110.

La figura 4.5 muestra una comparación entre la señal generada por el microcontrolador y la señal obtenida por el controlador IR2110, como se puede apreciar se conserva la forma de onda, se tiene una pequeña distorsión pero el voltaje está amplificado a la salida del driver, la señal tiene un ciclo de trabajo del 50%, más adelante se mostraran señales con distintos ciclos.

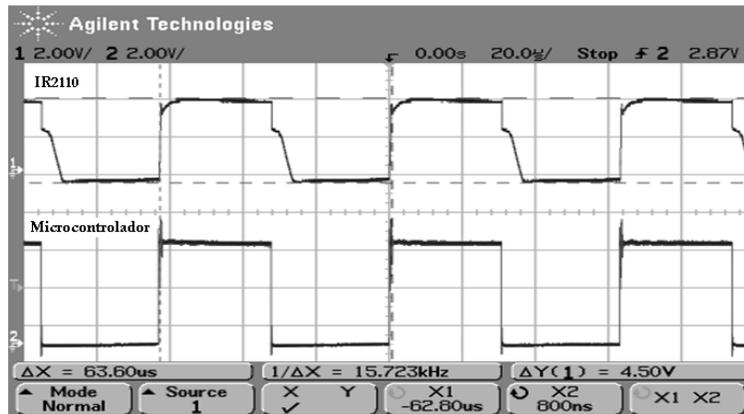


Figura 4.5. Comparación de señales de entrada y salida del IR2110.

Con las señales obtenidas anteriormente, se demuestra que el sistema digital se encuentra funcionando correctamente, ya que las señales generadas por el microcontrolador son las esperadas para el buen funcionamiento del sistema electrónico, ahora se muestran las pruebas de la siguiente etapa.

4.3 Sistema de potencia

Las graficas que se muestran a continuación son las que se obtienen al medir directamente en las terminales del motor, como se observa en la figura 4.6, la señal medida es igual a la señal generada por el microcontrolador (figura 4.5), lo que las hace diferentes es la amplitud de la señal, la generada por el microcontrolador es de 5 Vpp, y la obtenida directamente del motor es de 20 Vpp, que se mide a la salida de los MOSFETS de potencia.

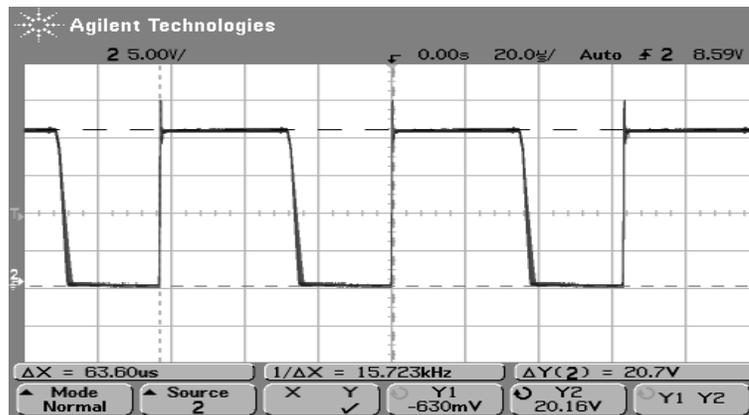


Figura 4.6. Señal obtenida en las terminales del motor con una punta de osciloscopio normal.

En la imagen 4.7 podemos observar la señal de voltaje entregada al motor con una variación de PWM y un ciclo de trabajo aproximadamente del 15%. Cuando tenemos un ciclo de trabajo pequeño, el motor gira lentamente.

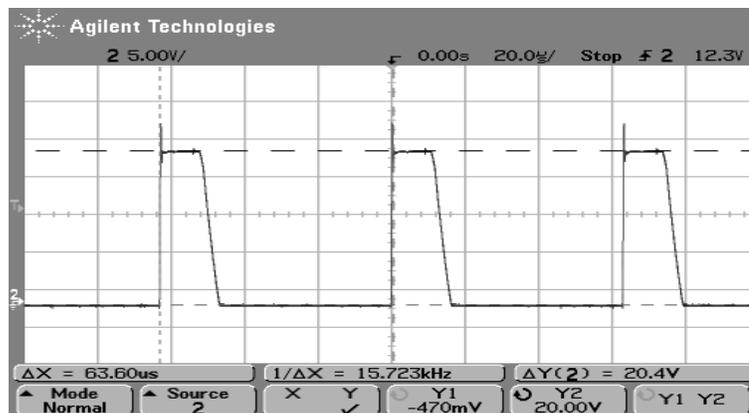


Figura 4.7. Variación de velocidad del motor con un ciclo de trabajo del 15%.

La siguiente figura (4.8) muestra una variación en la señal de PWM con un ciclo de trabajo del 90%, logrando con esto que el motor gire a mayor velocidad.

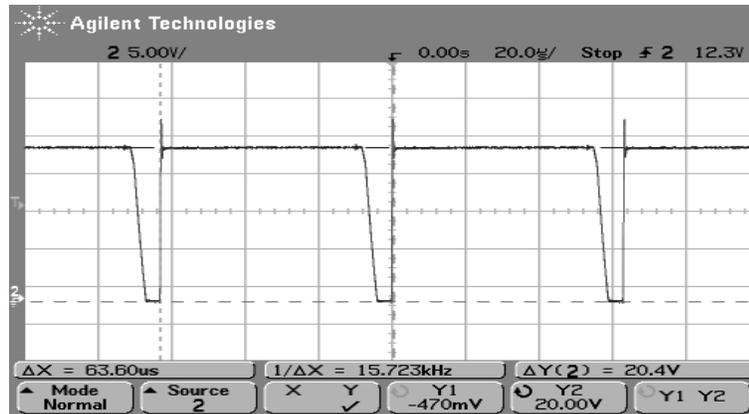


Figura 4.8. Variación de velocidad del motor con un ciclo de trabajo del 90%.

Como se corroboró con las pruebas realizadas en el laboratorio, se obtuvieron los resultados esperados. Ahora se muestran las pruebas del sistema electrónico montado en el vehículo eléctrico. La figura 4.9 muestra el sistema electrónico debidamente conectado.

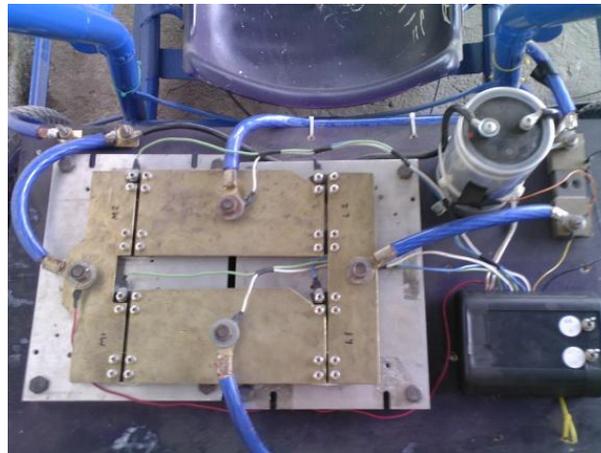


Figura 4.9. Sistema electrónico montado en el vehículo eléctrico.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas después de realizar pruebas en una cancha de fútbol rápido, estas mediciones se hicieron con la ayuda de un osciloscopio portátil *FLUKE-43*.

En la figura 4.10 se observa una señal que representa la corriente consumida por el sistema, esta señal se midió directamente del “SHUNT”, como se puede observar el voltaje promedio es de 1.8 mV. El “SHUNT” tiene una relación de conversión de 50 mV – 300 A, por lo tanto, haciendo una relación de voltajes se obtiene la corriente promedio consumida por el sistema que es de 10.8 Amp.

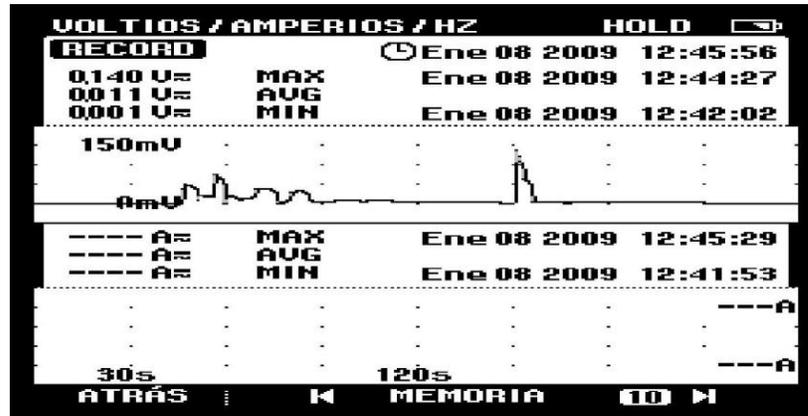


Figura 4.10. Corriente consumida por el sistema.

Las señales del voltaje entregado al motor se muestran en la figura 4.11, como se observa se tienen diferentes señales de PWM, éstas se obtienen al variar el ciclo de trabajo de los MOSFET's.

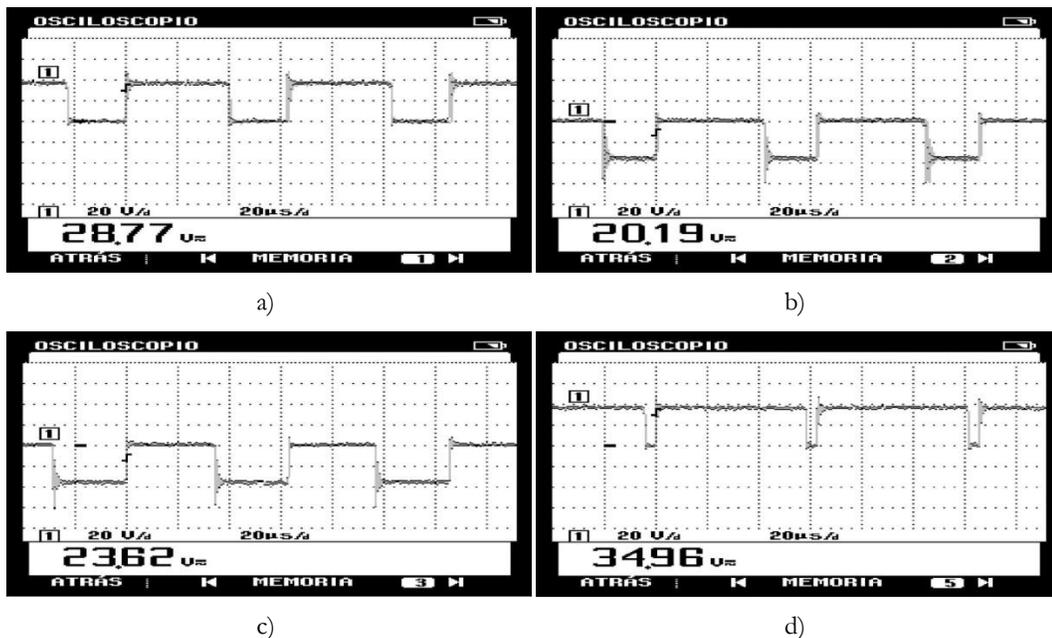


Figura 4.11. Variación del ciclo de trabajo de la señal de PWM.

En el inciso *a)* de la figura 4.11 se puede apreciar una señal de PWM con un ciclo de trabajo aproximadamente del 60%, en el inciso *b)* de la figura 4.11 se tiene una señal con un ciclo de trabajo aproximadamente del 70%, en el inciso *c)* el ciclo de trabajo es aproximadamente del 55%, y por último en el inciso *d)* se tiene un ciclo de trabajo aproximadamente del 92%. Al tener diferentes anchos de pulso se obtienen diferentes velocidades en el motor, y como resultado una aceleración ó desaceleración del vehículo.

Las revoluciones del motor se midieron con el apoyo de un tacómetro, este se muestra en la figura 4.12, como puede verse, posee una base la cual se fija en el eje donde se desea medir las revoluciones por minuto.



Figura 4.12. Tacómetro.

En la figura 4.13 se muestra la adaptación que se le hizo al vehículo eléctrico para poder fijar la base del tacómetro y así realizar las pruebas y mediciones de las revoluciones del eje alcanzadas por el vehículo.



Figura 4.13. Adaptación de tacómetro al eje de tracción del vehículo eléctrico.

Una vez realizada la adaptación y puesto en marcha el vehículo, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 4.14, como se puede observar, se tiene una aceleración hasta tomar una velocidad constante.



Figura 4.14. Gráfica de las RPM obtenidas por el tacómetro.

Se hicieron varias pruebas y los resultados fueron muy parecidos como se observa en la figura 4.15.



Figura 4.15. Gráfica de las RPM obtenidas por el tacómetro en una segunda prueba.

El PWM fue programado para que su ciclo máximo de trabajo fuera del 92%, esto se hizo para proteger el rendimiento de las baterías, para que no se lleguen a descargar rápidamente con constantes cambios bruscos. Considerando que el voltaje de alimentación del sistema es de 36 V y que el ciclo de trabajo es de 92%, se puede decir que el voltaje promedio que debería recibir el motor es de 33 V, es decir que cuando el PWM esté en su punto máximo el voltaje que le llegará al motor es de 33 V. La figura 4.16 muestra una lectura del voltaje medido, este fue de 32 V, con esto se puede decir que el sistema tiene una eficiencia del 96.96%.

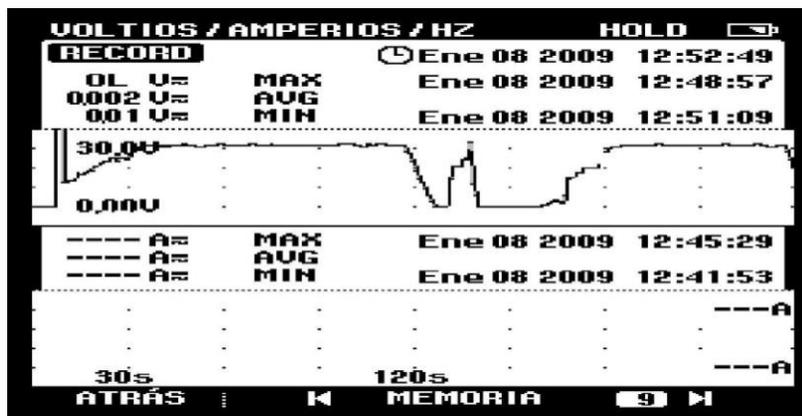


Figura 4.16. Voltaje obtenido en el motor.

Estas fueron todas las pruebas a las que se sometió el sistema. En seguida solo queda plantear las conclusiones y los posibles trabajos a futuro en el capítulo posterior.

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se construyó un sistema propulsor pulsador clase E, el cual demostró que con la buena selección de sus dispositivos semiconductores puede ser utilizado para aplicaciones de potencia, esto se comprobó al ser utilizado para poner en funcionamiento un vehículo eléctrico. Una vez concluido este proyecto y considerando las diferentes etapas de su desarrollo, a continuación se presentan las conclusiones:

- El convertidor CD – CD clase E desarrollado es un sistema electrónico terminado a nivel de circuito impreso con chasis y estructura metal-mecánica dando como resultado un vehículo eléctrico, listo para utilizarse en caminos que no presenten irregularidades de baches o topes. El convertidor soporta corrientes de hasta 220 Amperes, que son de un valor considerable.
- Las pruebas del sistema desarrollado fueron realizadas satisfactoriamente en el laboratorio, posteriormente se hicieron pruebas en la cancha de futbol rápido de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, y los resultados obtenidos también fueron satisfactorios, inclusive fueron mejores que los esperados, ya que se hicieron pruebas con un peso de 200 Kg excedente al del vehículo eléctrico.
- Los objetivos planteados al inicio de este trabajo se cumplieron satisfactoriamente, también se elaboró un circuito impreso de doble cara, con algunos componentes de montaje superficial, con esto se logró un sistema de tamaño pequeño pero con una gran capacidad de manejo de corriente (220 A), con esto se puede observar que con un buen diseño electrónico se pueden manipular grandes cantidades de corriente.

A continuación se listan los principales problemas que se presentaron durante el desarrollo de este proyecto:

- Uno de los principales problemas encontrados fue la poca bibliografía con la que se cuenta en cuanto al manejo de altas corrientes, así que fue necesario comprar libros, debido a que en la bibliografía encontrada, no se hablaba de este tema.
- Otro problema fue la selección de los dispositivos semiconductores de potencia, ya que debido a los costos que representa fue difícil la adquisición de estos, además de que las consideraciones que se tomaron para su elección no fueron simplemente de

tipo electrónico, sino también de tipo estructural, pues algunos de ellos son de difícil montaje para la aplicación que se desarrolló.

- Así mismo, a parte de los costos del material, otro problema fue el tiempo de envío, ya que el tiempo de espera fue de hasta dos meses, esto debido a que el material adquirido no se consigue en el país, y fue necesario hacer pedidos especiales en el extranjero.
- Las conexiones de los dispositivos semiconductores de potencia son otro obstáculo, ya que al manejar corrientes tan altas no se pueden conectar con cables, así que se sustituyeron los cables para las conexiones por láminas de bronce con un grosor de 1/8 de pulgada, aparte de ser un buen conductor, se facilitó esta tarea.

Como comentario final se puede decir que además de cumplir con los objetivos propuestos, se logra hacer una importante aportación a la sociedad, a la universidad, a los profesores y estudiantes, ya que tanto la experiencia adquirida como la información recapitulada quedan plasmadas en este documento de tesis.

Trabajos futuros

El presente trabajo puede tomarse como base para iniciar otros proyectos, los cuales pueden ser aplicados en electrónica de potencia, electrónica de control o en sistemas mecánicos. A continuación se hacen algunas sugerencias:

- Con el desarrollo del diseño mecánico y electrónico se facilita la elaboración de un vehículo que emplee energía solar.
- En la actualidad las aplicaciones en electrónica de potencia van en ascenso, cada día se realizan nuevos proyectos en donde se hace el uso de ella, un proyecto futuro podría ser que en lugar de utilizar un motor de CD de 36 V a 35 A, se utilice uno con mayor voltaje para así reducir el consumo de corriente, logrando un mejor rendimiento de las baterías.
- Modificando el programa del microcontrolador se puede implementar un controlador PID, con el cual se podría mantener una velocidad constante no importando el ángulo de inclinación del camino, ni la sinuosidad, logrando con esto un sistema de mejores características.
- El sistema electrónico es un sistema con ventajas sobre otro tipo de convertidores cd – cd existentes en el mercado, la más destacada es que el sistema soporta una corriente de hasta 220 A, y puede servir de base para el desarrollo de nuevos convertidores para manejo de corrientes elevadas, ya que no existen trabajos similares en la Universidad.
- Las modificaciones a realizar a la parte mecánica son muchas, como: un mejor sistema de frenado, un sistema de suspensión, y se podría desarrollar alguna estructura con la cual se logre un mejor desplazamiento, al realizar un diseño aerodinámico.

Referencias bibliográficas

- [1] R.F. Coughlin y F.F. Driscoll, *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*, 4a. Edición, Prentice-Hall, 1993.
- [2] R. Krishnan, *Electric motor drives Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [3] W. Leonhard, *Control of electrical drives*, Springer, 3ra edición, 2001.
- [4] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1993.
- [5] W. Sheperd, L. N. Hulley and D.T.W. Liang, *Power electronics and motor control*, second edition, Cambridge, USA, 2004.
- [6] R. Valentine, *Motor control electronics hanbook*, Mc-Graw Hill, USA, 1998.
- [7] California air resources board office of strategic planning, “Air pollution-transportation linkage”, 1989.
- [8] H. Elizabeth, M. Ofelia, “Contaminación Urbana por tráfico automovilístico”, Instituto de geofísica, UNAM, 2002.
- [9] L. G. O’Connell, “Electric Vehicles: A clean, energy-efficient urban transportation alternative”, EPRI Rep., Vol. 30, no. 5, sep/oct 1991.
- [10] W. W. Burns, III, “Power electronics – Keeping pace with society”, IEEE Trans. Power Electron., vol. PE-1, 1986.
- [11] M. Nishiahara, “Power electronics diversity”, in Proc. Int. Power Electronics Conf., 1990.
- [12] F. A. Wyezalek, “GM electric vehicle technology”, in Proc. Int. Symp. Automotive Technology Automation, 1991.
- [13] N. Irie, M. Fukino, and H. Horie, “Nissan FEV – A new concept electric vehicle”, in Proc. Int. Electric Vehicle Symp., 1992, no. 13.02.
- [14] K. Faust, A. Goubeau, and K. Scheuerer, “introduction to the BMW-E1”, SAE SP-915, 1992.
- [15] W. H. Deluca, A. F. Tummillo, J. E. Kulaga, C. E. Webster, K. R. Gillie, and R. L. Hogrefe, “Performance evaluation of advanced battery technologies for electric vehicle applications”, in Proc. Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. 1990.

- [16] T. Moore, "The push for advanced batteries", EPRI J, 1991.
- [17] A. Hiny, Battery R&D Report. Power Sources Manuf. Assoc. Pub., 1992.
- [18] D. Coates and L. Miller, "Advanced batteries for electric vehicle applications", in Proc. Int. Electric Vehicle Symp., 1992, no. 14.03.
- [19] W. A. Adams, W. Fell, G. S. Song, and M. Walker, "Consideration od aluminium/air and zinc/bromie flow batteries as EV range extenders", in Proc. Int. Electric Vehicle Symp., 1992, no. 18.02.
- [20] Holon Academic Institute of Technology, "Overview of power electronic drives for electric vehicles", HAIT Journal of Science and Engineering B, Volume 2, 2005.
- [21] T. J. E. Miller, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Loondon, U.K.: Oxford Univ. Press, 1989.
- [22] C. C. Chan and K. T. Chau, "Advanced ac propulsión systems for electric vehicles", in Proc. Int. Symp. Automotive Technology Automation, 1991.
- [23] Roland Reichel, Why Solar Powered Mobility?, Bundesverband Solarmobil E.V. (German Solar Car Federation).
- [24] Daniel Soto E., "Aumento del rendimiento en un vehículo eléctrico, utilizando celdas fotovoltaicas", PUCC, Santiago de chile, 2002.
- [25] Kuo, Benjamin C. "Sistemas de control automático", séptima edición, prentice hall, México, 1996.

Páginas web

- [URL 1] http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 2] http://www.euroresidentes.com/Blogs/avances_tecnologicos/2007/06/bateras-para-vehiculos-elctricos.html, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 3] http://www.batmex.com/PRODUCTOS_archivos/page0008.htm, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 4] [http://es.wikipedia.org/wiki/Shunt_\(electrónica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Shunt_(electrónica)), último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 5] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 6] <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 7] <http://www.greenpeace.org/espana/transporte/emisiones-de-co2>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 8] <http://www.theclimateproject.org/>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 9] <http://www.electraton.com.mx/electraton.htm>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 10] <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfps3810.pdf>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 11] <http://media.digikey.com/PDF/Data%20Sheets/ST%20Microelectronics%20PDFS/STE250NS10.pdf>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 12] <http://eu.st.com/stonline/products/literature/ds/11857/stps200170tv1.pdf>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 13] <http://www.digikey.com/>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 14] <http://www.ferro-rail.com/Diccionario.html>, último acceso a la página septiembre de 2009.
- [URL 15] [http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA\(Traccion_electrica\).html](http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA(Traccion_electrica).html), último acceso a la página septiembre de 2009.

[URL 16] http://gitel.unizar.es/contenidos/cursos/AEI/08-09/tema_5.ppt, último acceso a la página octubre de 2009.

Anexo 1

```
/* Programa Motor de CD de 1.5 HP */
#include <avr\io.h>
#include <avr\interrupt.h>
#define MAX_POT 92

volatile unsigned int Pot=0;
unsigned char muestras=0;

/*Interrupcion del comparador analogico*/
ISR (ADC_vect)
{
    unsigned int tempo;

    if (muestras<10) muestras++;
        tempo=ADC>>1;
    Pot=(unsigned int ) (MAX_POT-tempo*MAX_POT/512);
}

void Pwm_Update(unsigned int duty0, unsigned int duty1)
{
    //PwmA
    OCR1A = (unsigned int) 511-(duty0*511/100);
    //PwmB
    OCR1B = (unsigned int) 511-(duty1*511/100);
}

int main(void)
{
    PORTB &=~(1<<PB0); //LS1
    PORTB &=~(1<<PB1); //HS1
    PORTB &=~(1<<PB2); //HS2
    PORTB &=~(1<<PB3); //LS2
    PORTB &=~(1<<PB4); //SD

    PORTD |= (1<<PD2); //Direccion //pull-up
    PORTD &=~(1<<PD6); //High Impedance AIN0
    PORTD &=~(1<<PD7); //High Impedance AIN1
    DDRD &=~(1<<PD2); //IN Direccion
    DDRD |= (1<<PD5); //Salida de Prueba para el comparador
    //analogico LED SOBRECORRIENTE

    DDRD &=~(1<<PD6); //AIN0
    DDRD &=~(1<<PD7); //AIN1
    DDRB |= 0x1F; //Parte baja como salidas
    // PB0-PB3
    //LS1,HS1,LS2,HS2 y SD

    //Habilita ADC
    //Vref = 1.1 interno con Cap externo ADC0
    ADMUX |= (1<<REFS1)|(1<<REFS0);
```

```

// ADC, Conversion continua, Interrupcion ADC,
// Preescala 32
ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADATE)|(1<<ADIE)|(1<<ADPS2)|(1<<ADPS0);

/*Fast PWM 9-bit*/
TCCR1A = 0xF0 | (1<<WGM11);          //No inverting OC1A, OC1B

//TCCR1B = (1<<WGM12)|(1<<CS10);
TCCR1B = 0x09;

/*Interrupcion comparador analogico*/
SREG = 0x80;                          // enable interrupt
sei();
// Inicia conversi3n
ADCSRA|=(1<<ADSC);

while(muestras<10);
PORTB&&~(1<<PB4); // Activaci3n del IR2110
                    // con SD en bajo

while(1)
{
    /*Comparador analogico - por sondeo*/
    if (ACSR&&(1<<ACO))
    {
        PORTB &= ~(1<<PB0);           //LS1 = 0
        PORTB &= ~(1<<PB3);           //LS2 = 0
        Pwm_Update(0,0);              //HS1, HS2 = 0
        PORTD |= (1<<PD5);             //Led sobrecorriente activado
    }
    if (Pot>5)
    {
        PORTD &= ~(1<<PD5);           //Led sobrecorriente desactivado
        if (Pot>10)
        {
            if (PIND&&(1<<PD2)) //checa la direcci3n de
                                // rotaci3n del motor
            { //desactivar primero la parte baja
                // de la parte alta activa
                PORTB &=~ (1<<PB0); //LS1 = 0
                Pwm_Update(Pot,0); //cambiamos el pwm
                                // de la parte alta
                PORTB |= (1<<PB3); //LS2 = 1
                //despues activar la otra parte baja
            }
        }
    }
    else
    {
        PORTB &=~ (1<<PB3); //LS2 = 0
        //desactivar primero las partes
        //bajas -- death time
        Pwm_Update(0,Pot);
        PORTB |= (1<<PB0); //LS1 = 1
    }
}

```

```
    }  
  }  
  else  
  {  
    PORTB &= ~(1<<PB0);  
    PORTB &= ~(1<<PB3);  
    Pwm_Update(0,0);  
  }  
}  
else  
{  
  PORTB&=~(1<<PB0);      //LS1 = 0  
  PORTB&=~(1<<PB3);      //LS2 = 0  
  Pwm_Update(0,0);      //HS1, HS2 = 0  
  PORTD &= ~(1<<PD5);    //LED = 0  
}  
asm ("sleep");  
}  
}
```

Anexo 2

Nombre	Cant.	No. de componente	Precio (dólares)	Total (dólares)
Microcontrolador	1	AtMega48V	\$ 2.10	\$ 2.10
Mosfet	4	STE250NS10	\$ 42.68	\$ 170.72
Mosfet	16	IRFPS3810	\$ 8.08	\$ 129.28
Driver	2	IR2110	\$ 5.52	\$ 11.04
Diodo	4	STPS200170TV1	\$ 30.62	\$ 122.48
Motor	1	Applied motor's	\$ 350.00	\$ 350.00
Acumulador	3	L-31TDC-190	\$ 230.00	\$ 690.00
Estructura metálica	1	Fox's designs	\$ 500.00	\$ 500.00
Componentes varios			\$ 100.00	\$ 100.00
			TOTAL	\$ 2075.62

Total en pesos con un tipo de cambio de 13.5 pesos

\$ 28,020 pesos 87/100 M.N.

Cotización de C.I. obtenida de la página <http://www.digikey.com/> [URL 13] (julio de 2009).