

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



DISEÑO Y FABRICACION DE VARIADOR DE FRECUENCIA
PARA APLICACION EN AUTOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

POR:
HECTOR ALEXIS LOZANO FLORES

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE:
INGENIERO MECATRONICO

CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



DISEÑO Y FABRICACIÓN DE VARIADOR DE FRECUENCIA
PARA APLICACIÓN EN AUTOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS
POR:

HÉCTOR ALEXIS LOZANO FLORES

TESIS

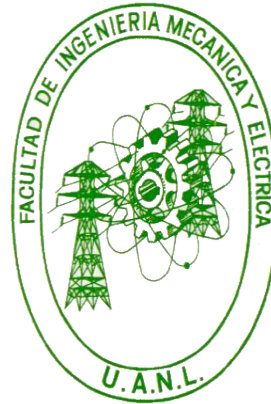
EN OPCIÓN AL GRADO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



DISEÑO Y FABRICACIÓN DE VARIADOR DE FRECUENCIA
PARA APLICACIÓN EN AUTOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS
POR:

HÉCTOR ALEXIS LOZANO FLORES

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

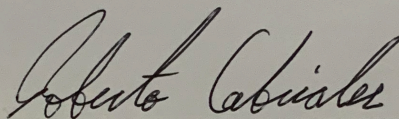
CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DE 2020

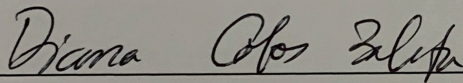
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE VARIADOR DE FRECUENCIA PARA APLICACIÓN EN AUTOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS**” realizada por el alumno **Héctor Alexis Lozano Flores**, matrícula 1667025, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Ingeniero Mecatrónico.

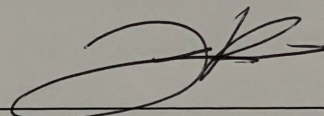
El comité de Tesis:



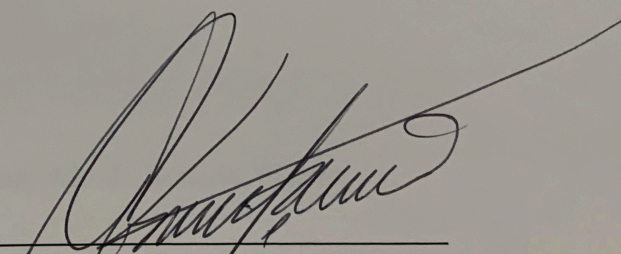
Dr. Roberto Carlos Cabriaes Gómez
Asesor



M.C. Diana Cobos Zaleta
Co Asesor



Dr. Luis Arturo Reyes Osorio
Co Asesor



Vo.Bo.

Dr. Arnulfo Treviño Cubero
Subdirección Académica

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no podría haberlo realizado sin el apoyo de muchas personas, quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar quiero agradecer a mí asesor, a los maestros que me formaron a lo largo de mi carrera universitaria, y me brindaron los conocimientos adecuados para poder lograr este trabajo, a mis padres que en todo momento me apoyaron para continuar con mis estudios, a mi novia Marlen que fue mi más grande motivación. Por último a mi alma mater que es UANL y la institución que fue mi casa estos últimos 5 años FIME, de igual forma ofrezco una disculpa a todas las personas que pude haber omitido no fue mi intención.

Héctor Alexis Lozano Flores

RESUMEN

Desde el punto de vista socioeconómico y ambiental, los vehículos eléctricos han surgido como una buena alternativa en el campo comercial, y prueba de esto es el surgimiento de nuevas empresas cuyo fin es fabricar vehículos eléctricos para su producción en masa, incluso empresas que no han sido conocidas tradicionalmente por fabricar vehículos eléctricos han incursionado con mucho éxito en este mercado como Tesla, Google y Apple entre otras.

Esto muestra en un corto plazo una tendencia a masificar el uso de vehículos eléctricos tanto en los sectores públicos como privados, por esta razón resulta interesante estudiar y evaluar los sistemas de control electrónico que se utilizan en los motores actualmente utilizados. Este proyecto pretende desarrollar a nivel de laboratorio un variador de frecuencia y su tecnología asociada a los vehículos eléctricos, como su impacto en el sistema eléctrico.

Y de esta forma poder comprender mejor el funcionamiento de dichos autos para que las nuevas generaciones ingenieros les sea posible poder estudiar esta tecnología que será utilizada con mayor frecuencia en los próximos años y de igual forma en base a esto mejorar los controles electrónicos para poder tener una respuesta más rápida y precisa y de esta forma eficientizar más el uso de las baterías de dichos autos eléctricos.

El sistema de control que se diseñó fue un sistema basado en 3 controladores de transistores mosfet o IGBT IR2110 para controlar el lado positivo y negativo de cada fase y así obtener las 3 fases desfasadas 120 grados cada uno y poder controlar mediante el ancho de las ondas la velocidad de dichos motores.

ÍNDICE ANALÍTICO

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ÍNDICE ANALÍTICO	4
CAPÍTULO 1.....	5
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 2.....	10
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1 Motores eléctricos usados en los EV y HEV.....	10
2.2 Control de velocidad de los motores de los EV y HEV.....	14
2.3 Transistores IGBT y Drivers	16
2.7 Propulsión de autos eléctricos e híbridos	22
2.8 Hipótesis.....	25
2.9 Objetivo.....	25
CAPÍTULO 3.....	26
PROCEDIMIENTOS	26
3.1 Materiales utilizados.....	26
3.2 Pruebas IR2110	26
3.3 Fabricación de variador de frecuencia	31
3.4 Programación del microcontrolador	35
CAPÍTULO 4.....	39
RESULTADOS.....	39
4.1 Prototipo VFD realizado	39
4.2 Comportamiento de señal trifásica obtenida.	41
4.3 Frecuencia contra velocidad	41
CAPÍTULO 5.....	43
CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS	45
LISTADO DE FIGURAS.....	47
LISTADO DE TABLAS.....	49
APÉNDICES.....	50
Apéndice A. Motores trifásicos de corriente alterna.....	50
Apéndice B. MOSFETs e IGBTs	51
Apéndice C. Recopilación de los primeros vehículos eléctricos	53
Apéndice D. Código desarrollado en este proyecto.....	54

INTRODUCCIÓN

En la actualidad vivimos creciendo como población en pasos agigantados, aunado a ello la tecnología avanza a nuestro paso para satisfacer las necesidades de la sociedad en cuanto a cualquier ámbito sea descrito, entre ellos se encuentra el ramo de la automoción.

En la actualidad ya nadie pone en duda que el futuro de los automóviles será eléctrico, los fabricantes apuestan cada vez más a la tecnología de vehículos eléctricos EV (por sus siglas en inglés Electric Vehicle) y vehículos híbridos HEV (por sus siglas en inglés Hybrid Electric Vehicle) la única pregunta ¿es qué tan rápido pueden llegar a las masas?

Desde el punto de vista socioeconómico y ambiental, los vehículos eléctricos han surgido como una buena alternativa en el campo comercial, y prueba de esto es el surgimiento de nuevas empresas cuyo fin es fabricar vehículos eléctricos para su producción en masa, incluso empresas que no han sido conocidas tradicionalmente por fabricar vehículos eléctricos han incursionado con mucho éxito en este mercado como Tesla, Google y Apple entre otras, Figura 1.



Figura 1. Tesla Model S de 60kWh es un liftback eléctrico con autonomía de 335 km, fuente: EPA (Environmental Protection Agency) (1).

Otras compañías como la japonesa Toyota lleva años teniendo éxito en ventas de autos híbridos ya que desde 1997 lanzo la primera generación de de su afamado Prius, con el cual ha cosechado un éxito innegable en todo el mundo, Figura 2.



Figura 2. Toyota Prius el híbrido más vendido en el mundo es un liftback con un rendimiento de 22.96 km/l, fuente: EPA (1).

Esto muestra en un corto plazo una tendencia a masificar el uso de vehículos eléctricos tanto en los sectores públicos como privados, por esta razón resulta interesante estudiar y evaluar los sistemas de control electrónico que se utilizan en los motores actualmente utilizados.

Por el momento los autos eléctricos siguen siendo un producto especializado con altos precios de venta, pero los analistas sugieren que el precio de los vehículos eléctricos está bajando mucho más rápido de lo esperado, gracias a baterías más baratas y políticas energéticas que promueven los autos de cero emisiones en China y Europa.

Por otro lado los autos híbridos HEVs que combinan propulsión de un motor eléctrico y motor de combustión (o motor térmico) son mucho más accesibles en precio debido a que no utilizan gran cantidad de baterías como los totalmente eléctricos EVs, y en poco tiempo han alcanzado al consumidor promedio cabe señalar que el control del motor eléctrico tanto los autos eléctricos como los híbridos se realiza de la misma manera.

Los autos híbridos también pueden clasificarse como los híbridos convencionales HEV y los híbridos enchufables PHEV (por sus siglas en inglés Plug-In Electric Vehicle) estos últimos son más parecidos en funcionamiento a los EVs que emplean principalmente el motor eléctrico y que se pueden recargar enchufándolos a la red eléctrica. Un generador de combustión interna recarga las baterías cuando se detecta que estas se están agotando. En el capítulo 3 de esta tesis se describirá a detalle los sistemas de propulsión de estas tecnologías.

En la Figura 3 se muestran la comparación de ventas acumuladas en Estados Unidos de los híbridos enchufables (PHEV) y de los eléctricos (EV) hasta julio de 2018 donde se muestra que ya el 53 % son autos totalmente eléctricos.

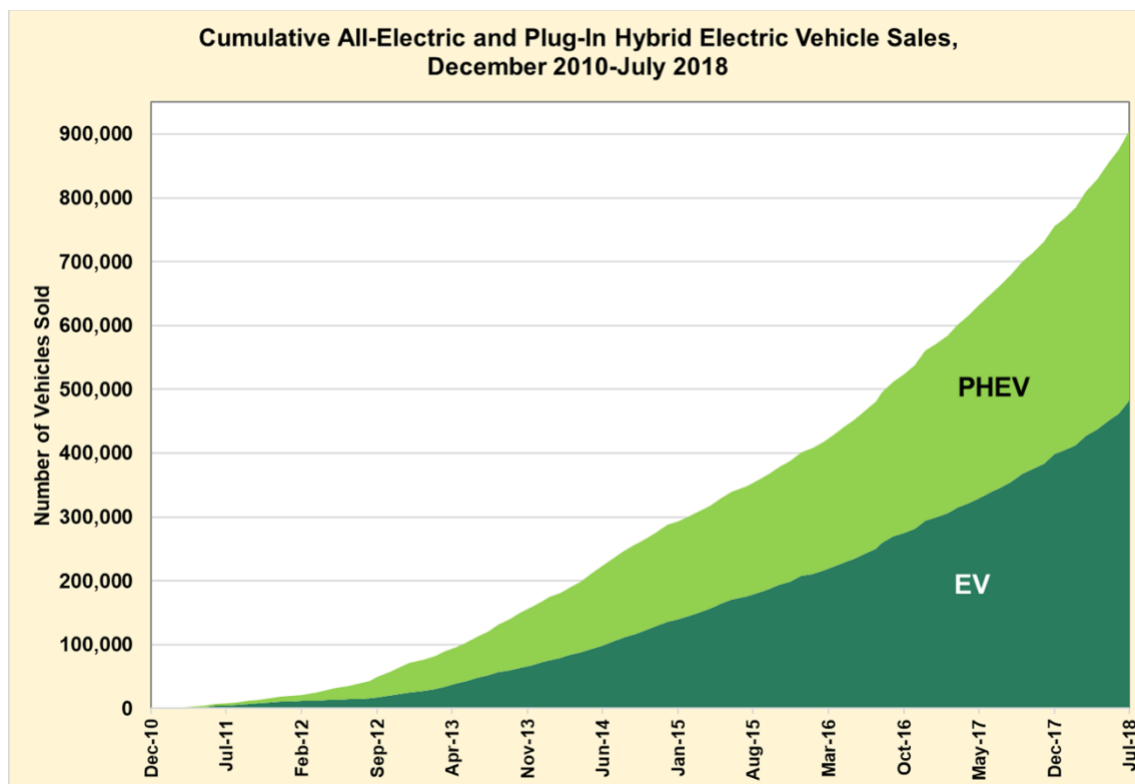


Figura 3. Ventas acumuladas en USA de EV y PHEV hasta julio de 2018, fuente: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2) .

También cabe recalcar la contribución de estos vehículos a la ecología, por ejemplo, según datos de Toyota al 2019 el Prius ha reducido en aproximadamente 108 millones de toneladas la cantidad de CO₂ en la atmósfera, en comparación a lo que hubiesen tenido el mismo número de autos con motor de gasolina de prestaciones similares, ahorrando a la vez millones de litros de combustible (3).

En la Figura 4 se muestran las ventas mensuales en USA de todos los modelos enchufables (PEV) que se venden desde diciembre de 2010 hasta junio de 2019.

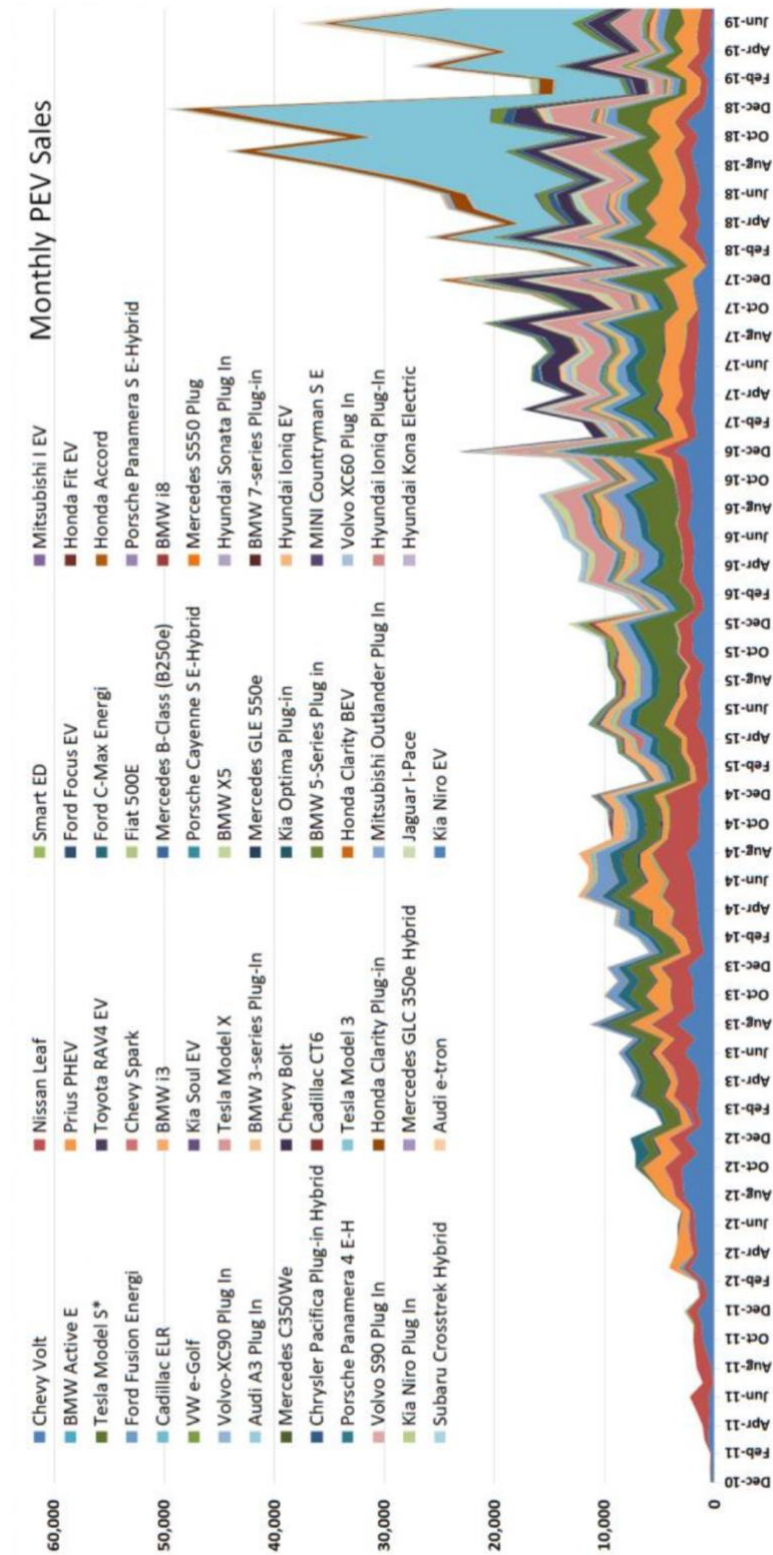


Figura 4. Ventas mensuales en USA de autos enchufables eléctricos e híbridos desde diciembre de 2010 hasta junio de 2019, fuente: Argonne National Laboratory, Light Duty Electric Drive Vehicles Monthly Sales Updates website, accesado el 25 de agosto de 2019 (4) (5).

Si comparamos los vehículos EV y los HEV y resaltamos sus ventajas desventajas llegaremos a la conclusión que los autos eléctricos son más limpios porque no emiten gases productos de la combustión a la gracias al atmósfera y al tener motores solamente eléctricos la eficiencia energética es muy superior, pero la principal desventaja es el costo y el tiempo de vida útil de sus baterías que al cambiarlas representaría una inversión fuerte otra desventaja es la autonomía ya que los mejores autos eléctricos a la fecha apenas supera los 300 km. Por otro lado, los vehículos híbridos no tienen el problema de la autonomía de los EVs que es su principal ventaja, tienen costos más accesibles, pero siguen siendo costosos para las personas de bajos recursos, son mucho más eficientes en rendimiento de combustible que los autos de combustión y sus emisiones de CO₂ son bajas, aunque no tanto como los EV.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Motores eléctricos usados en los EV y HEV.

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos magnéticos variables, algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. Los motores eléctricos de tracción usados en locomotoras, en todos los EV y HEV realizan a menudo ambas tareas, si se los equipa con frenos regenerativos que recuperan parte de la energía en el frenado.

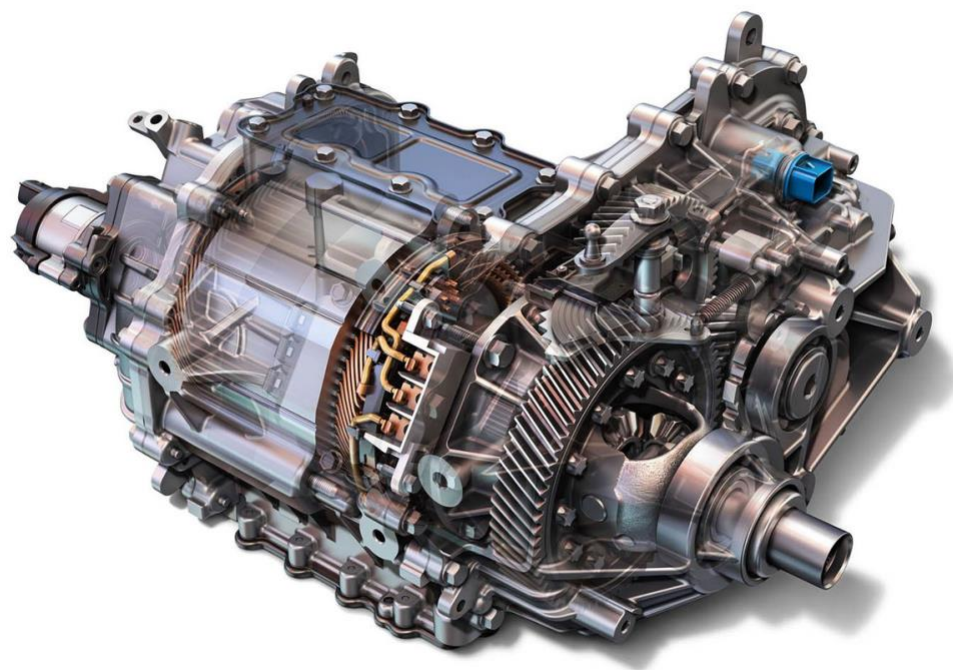


Figura 5. Motor eléctrico del Chevrolet Bolt es un motor síncrono de imanes permanentes.

Los motores eléctricos son ampliamente utilizados en instalaciones industriales, comerciales y particulares. Pueden funcionar conectados a una red de suministro eléctrico o a baterías. Así, en automóviles se usan distintos tipos de motores.

Las partes principales de un motor son el estátor, rotor y carcasa. El estátor es la parte fija y cilíndrica de la máquina rotativa, pudiendo ser desde electroimanes hasta placas ferromagnéticas dentro del estátor esta el rotor, la parte móvil, que puede ser compuesto por barras de material conductor, o tener enbobinado, o estar compuesto de materiales magnéticos como los imanes de tierras raras como el NdFeB (Neodimio-Hierro-Boro) (6). Todo ello es envuelto por la carcasa metálica. Según su alimentación mediante corriente alterna o continua y su arquitectura (7), se pueden dividir en las siguientes categorías:

Motores usados en los EV y HEV:

- **Motor asíncrono o de Inducción (AC)**
- **Motor síncrono de imanes permanentes (AC)**
- **Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable. (AC)**
- **Motor sin escobillas de imanes permanentes (DC)**

Motor asíncrono o de Inducción (AC)

Su principal característica es que el giro del rotor no corresponde a la velocidad de giro del campo magnético producido por el estátor. Este motor está formado por un rotor que puede ser de tipo jaula de ardilla o bobinado. En el estátor (anillo cilíndrico de chapa magnética) se encuentran las bobinas inductoras que son trifásicas, desfasadas entre sí a 120 grados. Entre las ventajas encontramos la alta eficiencia, coste bajo, fiabilidad, bajo ruido y vibraciones y par constante. Sus contras son su baja densidad de potencia, el bajo par en el arranque y el riesgo de sobrecarga. Es utilizado en la industria del VE, por ello Tesla Motors lo usa en todos sus modelos al igual que los pequeños fabricantes Reva o Tazzari.

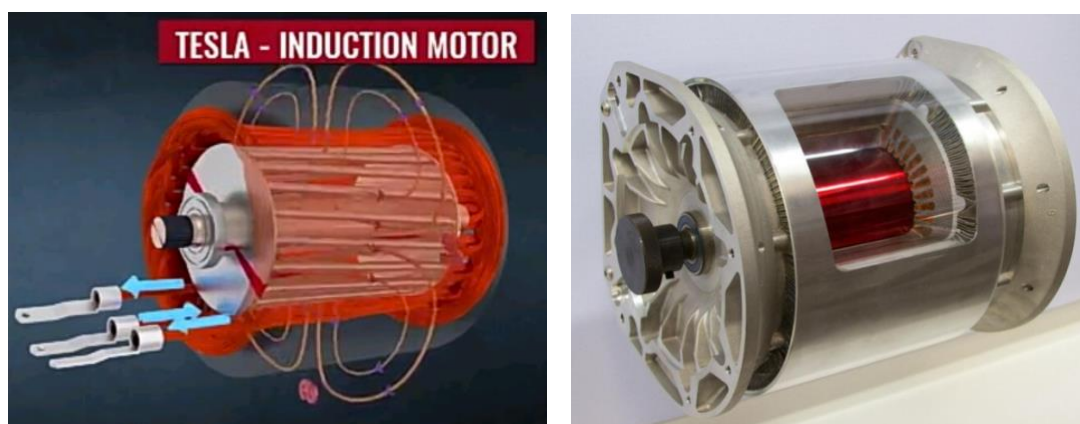


Figura 6. Motor jaula de ardilla usado el los vehículos de Tesla Motors

Motor síncrono de imanes permanentes (AC)

Con una velocidad de giro constante, siendo igual el giro del rotor que la velocidad del campo magnético creado por el estátor, el motor síncrono de imanes permanentes puede ser de dos tipos; de flujo radial o de flujo axial, dependiendo de la posición del campo magnético de inducción, que puede ser perpendicular o paralelo al eje de giro del rotor. Son más usados los de flujo radial. En cambio, los de flujo axial permiten ser integrados directamente en la rueda del vehículo, optimizando el espacio en el vehículo y simplificando los acoplamientos mecánicos entre motor y rueda, son los conocidos como «in-wheel motor». Las ventajas de este tipo de motor son su alto rendimiento, un control de velocidad sencillo, bajo ruido, vibración, tamaño y peso. Aunque tienen un alto coste, junto con los motores asíncronos, son los más extendidos dentro de los EV e híbridos. Lo montan Nissan, BMW, VW, Kia, BYD, Smart, el Outlander PHEV y el iMiEV (y sus «mellizos» Peugeot iON y Citroën C-Zero) de Mitsubishi o los híbridos de Chevrolet, Opel, Toyota y Lexus.



Figura 7. Conjunto Motor-Generador de dos versiones del HEV Prius.

Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable. (AC)

La corriente es conmutada entre las bobinas de cada fase del estátor hasta crear un campo magnético que gira. El rotor, que está hecho con un material magnético con polos salientes, son influenciados por el campo magnético, atrayéndose y creando un par que mantiene el rotor moviéndose a velocidad síncrona. Estos motores no necesitan imanes permanentes ni escobillas, y tienen a favor su elevado par, robustez y bajo coste, mientras que en contra tiene su baja potencia y la complejidad de su diseño. Renault y su departamento «Electric Powertrain»

desarrollaron el modelo 5A, un modelo de motor síncrono más eficiente que los de imanes permanentes.

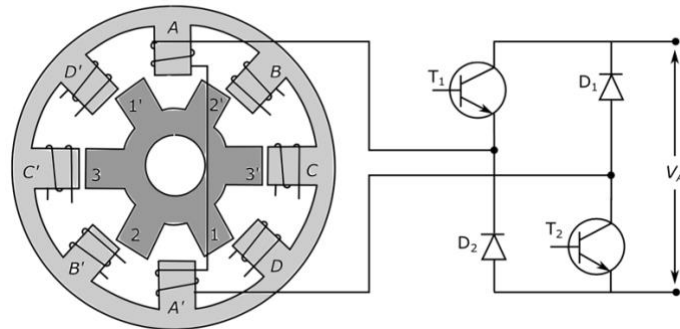


Figura 8. Puente asimétrico para motor de de reluctancia conmutada (8).

Motor sin escobillas de imanes permanentes (DC)

Conocidos con «brushless», estos motores poseen imanes permanentes situados en el rotor que funcionan mediante la alimentación secuencial de cada una de las fases del estátor. Pueden ser «inrunner», mayor velocidad de giro y menor par, o «outrunner» menor velocidad y mayor par. Aunque son usados mayormente en vehículos híbridos, los motores «brushless» ofrecen algunas ventajas para su uso en EV, su bajo ruido y rozamiento, robustez y ausencia de mantenimiento.



Figura 9. Motor brushless usado en EV ligeros marca Perm Motors.

2.2 Control de velocidad de los motores de los EV y HEV.

Todos los motores antes mencionados a excepción de los brushless son alimentados con un conjunto de tensiones polifásicas alternas (senoidales o trapezoidales), generadas por medio de un circuito con variador de frecuencia VFD (por sus siglas en inglés Variable Frequency Drive), que controlan la velocidad del motor regulando la frecuencia del voltaje suministrado. Dependiendo de la aplicación y el nivel de regulación de velocidad requerido, los VFD pueden controlarse mediante métodos escalares o vectoriales. El tipo más común de control de VFD es un método escalar denominado volts por hertz (V/Hz) o volts por frecuencia (V/f).

Se utiliza un variador de frecuencia (VFD) para controlar la velocidad de los motores de CA y lo hace variando la frecuencia de la tensión de alimentación al motor, mediante electrónica de potencia usando modulación de ancho de pulsos.

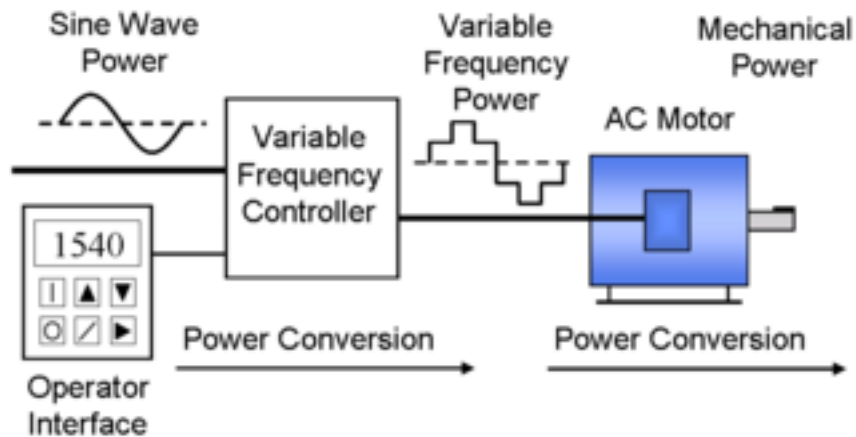


Figura 10. Esquema general de un VFD que controla un motor AC.

Los motores de CA están diseñados para un campo magnético (flujo) de fuerza constante. La intensidad del campo magnético es proporcional a la relación de voltaje (V) a frecuencia (Hz) o V / Hz. Pero un VFD controla la velocidad del motor variando la frecuencia del voltaje aplicado, de acuerdo con la ecuación de velocidad síncrona (9):

$$n = \frac{120f}{P}$$

n = número de revoluciones por minuto

f = frecuencia

P = numero de polos de la máquina

Variar la frecuencia de voltaje afecta tanto la velocidad del motor como la fuerza del campo magnético. Cuando se baja la frecuencia (para una velocidad del motor más lenta), el campo magnético aumenta y se genera un calor excesivo. Cuando se aumenta la frecuencia (para una mayor velocidad del motor), el campo magnético disminuye y se produce un par más bajo. Para mantener constante el flujo magnético, la relación V / Hz debe permanecer constante. Esto mantiene estable la producción de par, independientemente de la frecuencia (10).

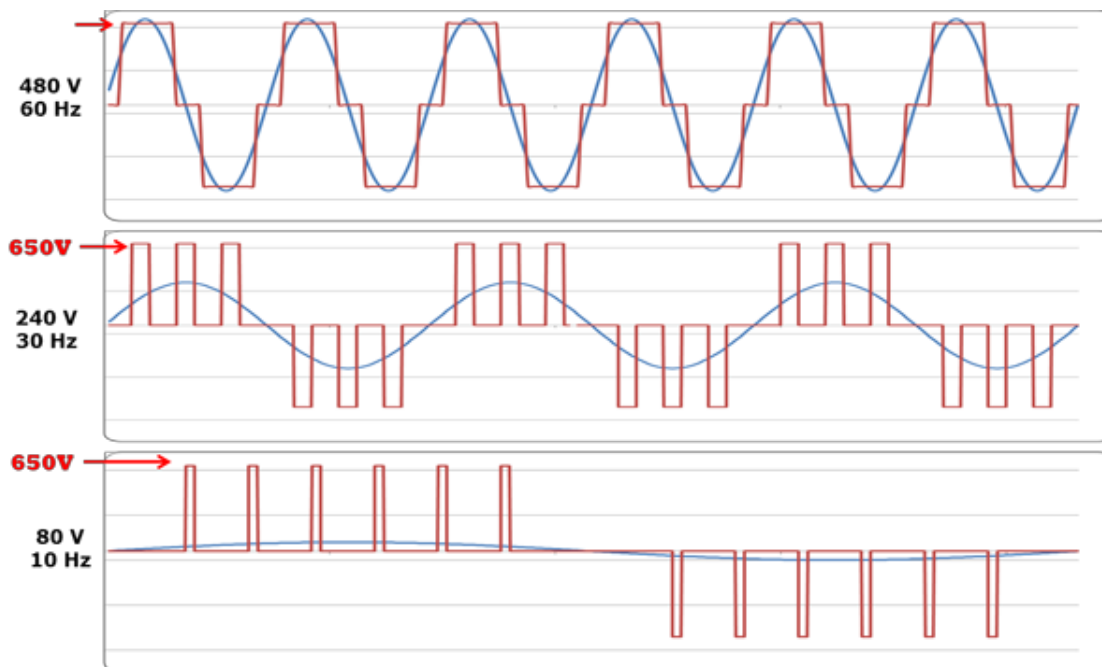


Figura 11. PWM utilizado para variar el voltaje y la frecuencia al mismo tiempo, también llamados de arranque suave.

El control V / Hz de un variador VFD evita esta variación en la intensidad del campo magnético variando el voltaje junto con la frecuencia, para mantener una relación V / Hz constante, esto se logra usando modulación de ancho de pulsos PWM (por sus siglas en inglés pulse-width modulation) (11), Figura 11. La relación V / Hz apropiada viene dada por la tensión y frecuencia nominal del motor.

El control tradicional V / Hz no utiliza retroalimentación, y solo cambia el voltaje y la frecuencia al motor en función de un comando de velocidad externo. Para el control de circuito cerrado V / Hz , se puede agregar retroalimentación del codificador para medir la velocidad actual del motor. Se genera una señal de error basada en la diferencia entre la velocidad actual y la velocidad ordenada, y el controlador genera un nuevo comando de frecuencia para compensar el error. Si bien mejora la regulación de la velocidad, el control de V / Hz en bucle cerrado

no es común debido al costo agregado y la complejidad del codificador y el hardware de retroalimentación. (12)

Los motores eléctricos usados en los EV y HEV tienen bobinas de excitación (usualmente tres o un múltiplo de tres) que están distribuidas en el estator, que dependiendo el fabricante puede ser conexión delta o estrella, siendo la conexión estrella la más usada (13).

El control de los diferentes tipos de motores usados en autos eléctricos puede ser fácilmente explicado en base al motor síncrono ya que independientemente de la tecnología y tipo de motor C.A. ya sea síncrono o de inducción, usado en un EV todos son controlados por medio del estátor. En la máquina síncrona de imán permanente clásica de un solo par de polos (la de embobinado más simple) las espiras del estator están conectadas formando un sistema de tres bobinas, lo que produce un circuito trifásico balanceado simétrico, que se alimenta conectándolo a un sistema de alimentación eléctrica trifásica, formado por tres fases desfasadas 120 grados entre sí.

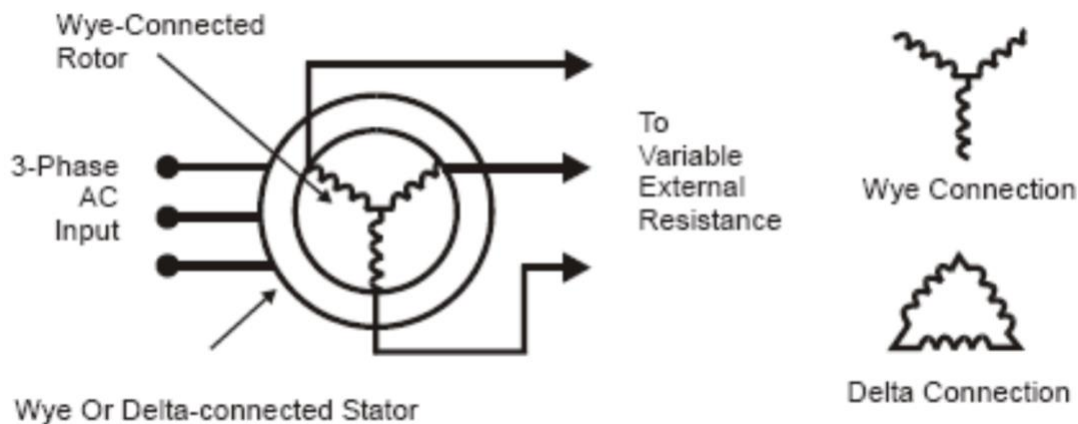


Figura 12. Circuito equivalente, conexión en “estrella” sin neutro y “delta”.

2.3 Transistores IGBT y Drivers

En los esquemas de control de velocidad con variadores en redes de distribución los VFD constan de 3 etapas, Figura 13, primero la señal trifásica se convierte en corriente directa mediante un grupo de diodos rectificadores, después esta corriente directa se modula mediante IGBTs nuevamente en corriente pulsante emulando una corriente alterna trifásica.

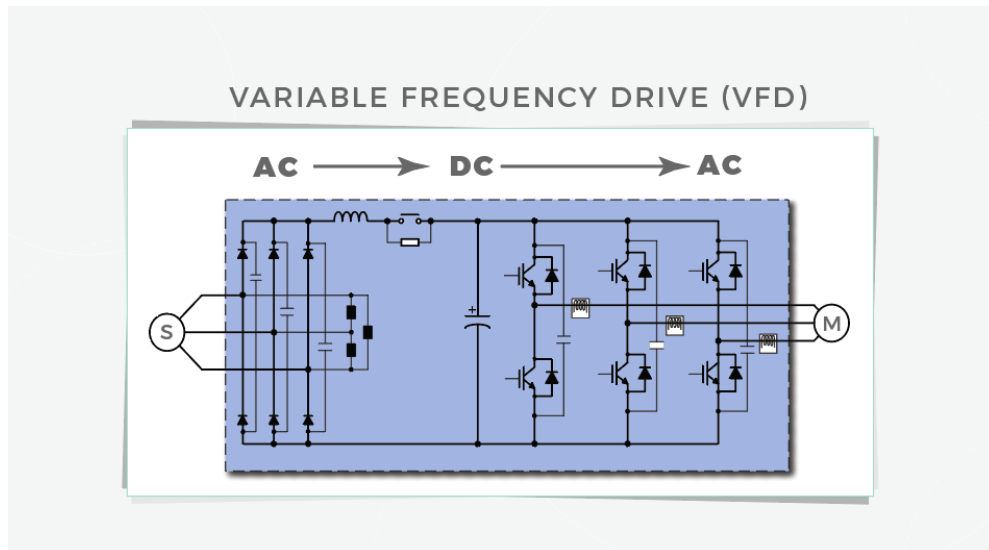


Figura 13. Circuito de un VFD donde a la derecha se muestran los 6 IGBT.

Aunque en los EV la primera etapa no se usa ya que la energía viene directamente de una batería con DC (14), la mitad derecha de la Figura 13 es idéntica a los VFD conectados a red de distribución trifásica.

El transistor bipolar era el único transistor de potencia funcional hasta que apareció el MOSFET en la década de 1970. El transistor bipolar requiere una corriente de base alta para encenderse, tiene características de apagado relativamente lentas (conocidas como cola de corriente) y es responsable de fugas térmicas debido a un coeficiente de temperatura negativo. Además, la tensión de estado activado más baja o la pérdida de conducción se rige por la tensión de saturación del colector-emisor VCE (SAT) (15).

El MOSFET, sin embargo, es un dispositivo que está controlado por voltaje y no por corriente. Los MOSFET tienen un coeficiente de temperatura positivo, lo que detiene el descontrol térmico. La resistencia en el estado no tiene límite teórico, por lo tanto, las pérdidas en el estado pueden ser mucho más bajas. El MOSFET también tiene un diodo de drenaje del cuerpo, que es particularmente útil para tratar con corrientes de rueda libre limitadas.

Todas estas ventajas y la eliminación comparativa de la cola actual pronto significaron que el MOSFET se convirtió en el dispositivo elegido para los diseños de interruptores de alimentación. Luego, en la década de 1980, apareció el IGBT. El IGBT es un cruce entre los transistores bipolares y MOSFET ver apéndice B, en la Figura 14 se describe la estructura de un IGBT.

El IGBT tiene las características de conmutación y conducción de salida de un transistor bipolar, pero está controlado por voltaje como un MOSFET. En general, esto significa que tiene las ventajas de la capacidad de manejo de alta corriente de un bipolar con la facilidad de control de un MOSFET. Sin embargo, el IGBT todavía tiene las desventajas de una cola de corriente relativamente grande y ningún diodo de drenaje del cuerpo (15).

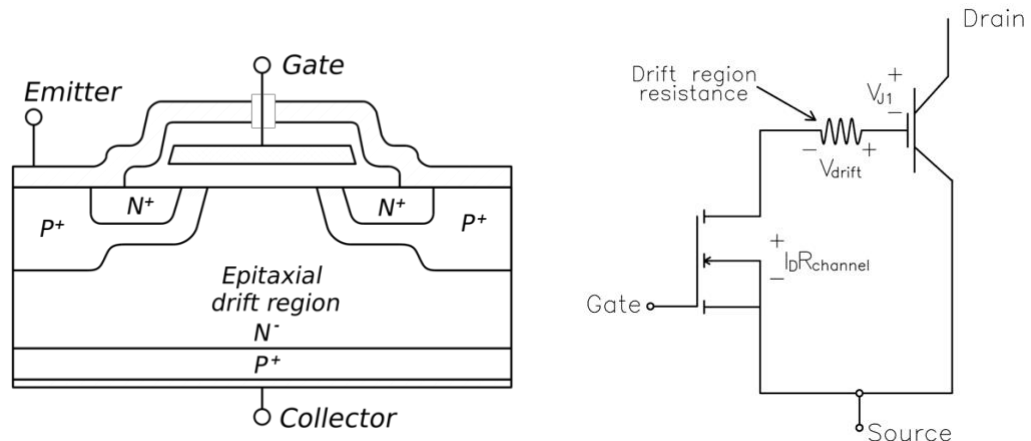


Figura 14. A la izquierda estructura de capas semiconductoras de un IGBT y a la derecha circuito equivalente de IGBT

En muchas situaciones, necesitamos usar MOSFET/IGBT configurados como conmutadores de lado alto y bajo. Tal como en los circuitos de puente H. En los circuitos de medio puente, Figura 15, tenemos 1 MOSFET/IGBT del lado alto y 1 MOSFET/IGBT del lado bajo. En los circuitos de puente completo, Figura 16, tenemos 2 MOSFET/IGBT de lado alto y 2 MOSFET/IGBT de lado bajo.

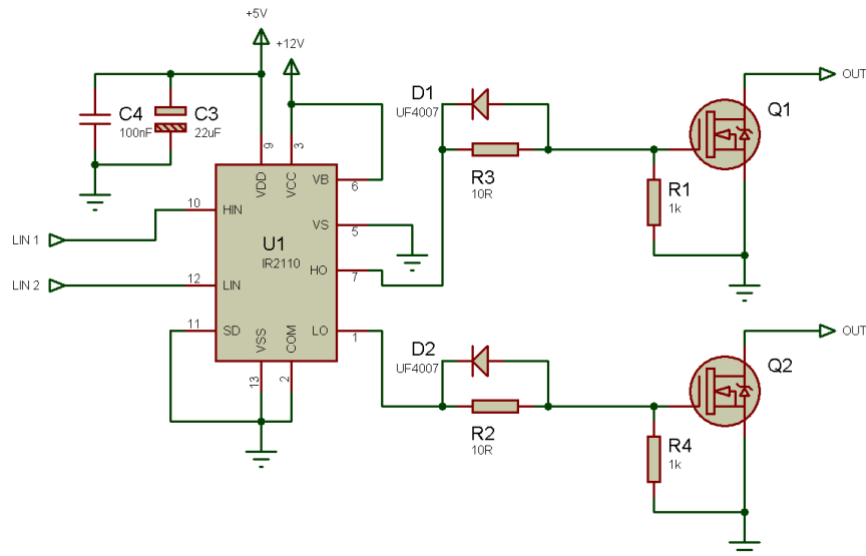


Figura 15. Circuito eléctrico de un medio puente H con MOSFET/IGBT.

En tales situaciones, existe la necesidad de utilizar circuitos de accionamiento del lado alto junto con los circuitos de accionamiento del lado bajo. La forma más común de tratar tales casos es usar controladores MOSFET/IGBT de lado alto-bajo. Sin lugar a duda, el chip controlador más popular es el IR2110, Figura 17 y Figura 18. Un IGBT comúnmente usado esta función es el 1MBC15-060 que será el utilizado en esta tesis.

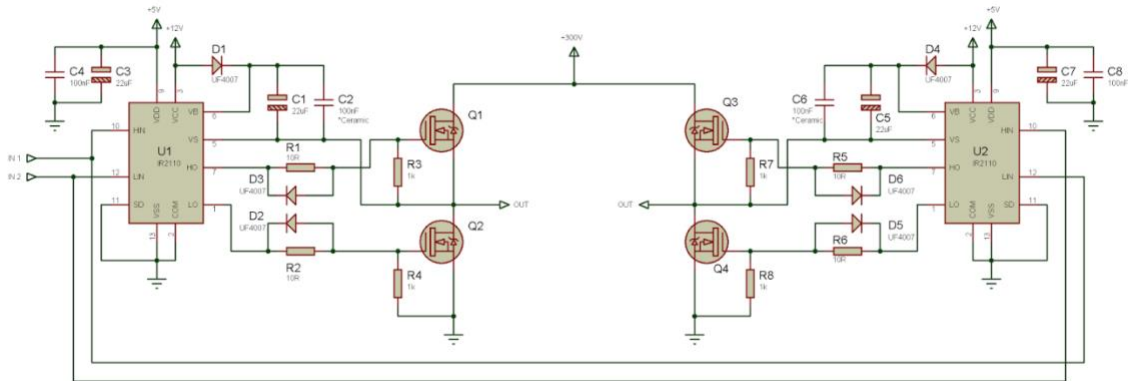


Figura 16. Circuito eléctrico de un puente H completo con MOSFET/IGBT.

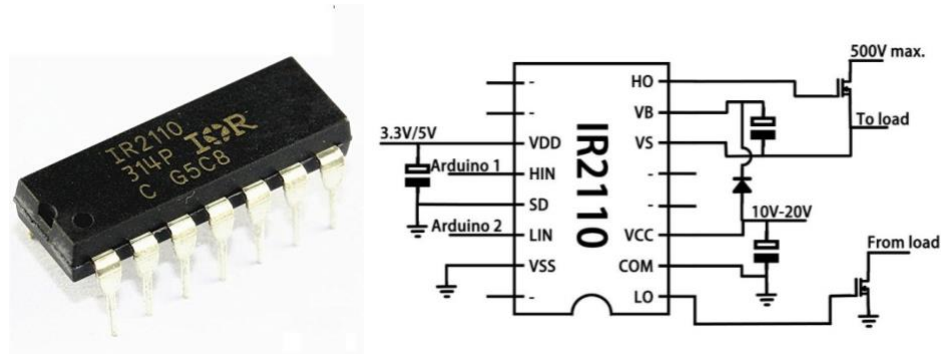


Figura 17. A la derecha encapsulado PDIP 14 del driver IR2110 a la izquierda "pinout" disposición de los pines.

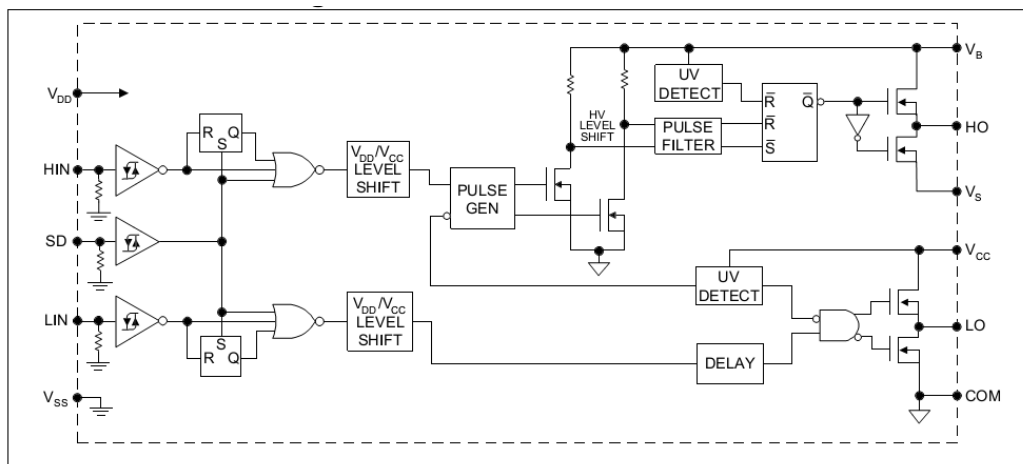


Figura 18. Diagrama de Bloques del interior del driver de MOSFET el IR2110.

En el IR2110 el pin nombrado VCC es el suministro del lado bajo y debe estar entre 10V y 20V. VDD es el suministro lógico. Puede estar entre + 3V a + 20V (con referencia a VSS). El voltaje real o de disparo que se elige usar depende del nivel de voltaje de sus señales de entrada de acuerdo con la siguiente figura:

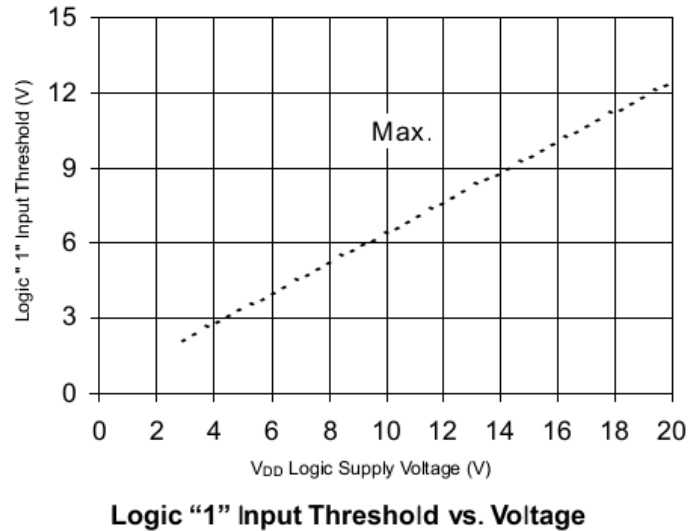


Figura 19. Voltaje límite (threshold) necesario para ser recibido como un "1" lógico de acuerdo al voltaje suministrado en un IGBT.

También cabe mencionar que para poder activar los IGBT con el controlador lógico IR2110. Es necesario utilizar la técnica de un capacitor bootstrap esto es por que como nuestro transistor IGBT necesita un voltaje mínimo para ser activado que muchas veces no es alcanzado con la electrónica de control debido a esto se usa un capacitor conectado al IR2110 para crear lo que se conoce como una fuente flotante que se carga con la suficiente energía y cuando se manda el pulso para activar nuestro IGBT o MOSFET se descarga dicho capacitor en el canal N de nuestro transistor para así obtener suficiente carga eléctrica para la activación del IGBT, la capacitancia necesaria puede obtenerse en base a la ecuación 1, (10).

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{min}}$$

Ecuación 1. Calculo de capacitancia necesaria en un circuito bootstrap.

Donde:

Q_g = Carga de la compuerta del IGBT. [Coulombs]

$I_{qbs(max)}$ = Corriente de reposo en el lado superior del driver.
[Amperes]

Q_{ls} = Nivel de carga requerida por ciclo. [Coulombs]

$I_{Cbs(leak)}$ = Corriente de fuga del capacitor de *bootstrap*.
[Amperes]

f = Frecuencia de operación. [Hertz]

V_{CC} = Voltaje de alimentación del driver. [Volts]

V_f = Voltaje de caída a través del diodo. [Volts]

V_{LS} = Voltaje de caída a través del transistor inferior.
[Volts]

V_{min} = Voltaje mínimo entre las terminales V_B y V_S .

Haciendo esta modificación al medio puente H que se muestra en la Figura 15, se puede obtener el circuito de la Figura 20.

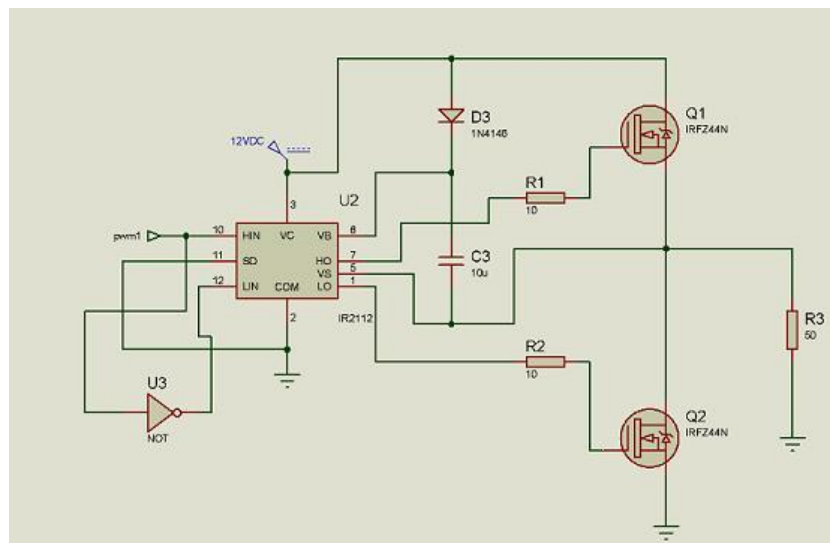


Figura 20. Circuito eléctrico de un medio puente H con MOSFET/IGBT. Con capacitor Bootstrap

2.7 Propulsión de autos eléctricos e híbridos

Como en corto plazo, la tendencia a masificar el uso de vehículos eléctricos tanto en los sectores públicos como privados, por esta razón resulta interesante estudiar y evaluar los sistemas de control electrónico que se utilizan en los motores actualmente utilizados. Este proyecto pretende desarrollar a nivel de laboratorio un variador de frecuencia y su tecnología asociada a los vehículos eléctricos, como su impacto en el sistema eléctrico.

El sistema de propulsión de los autos eléctricos EVs es muy sencillo y en la gran mayoría solo cuentan con una marcha o cambio solo una relación de transmisión ya que la velocidad puede ser controlada electrónicamente.

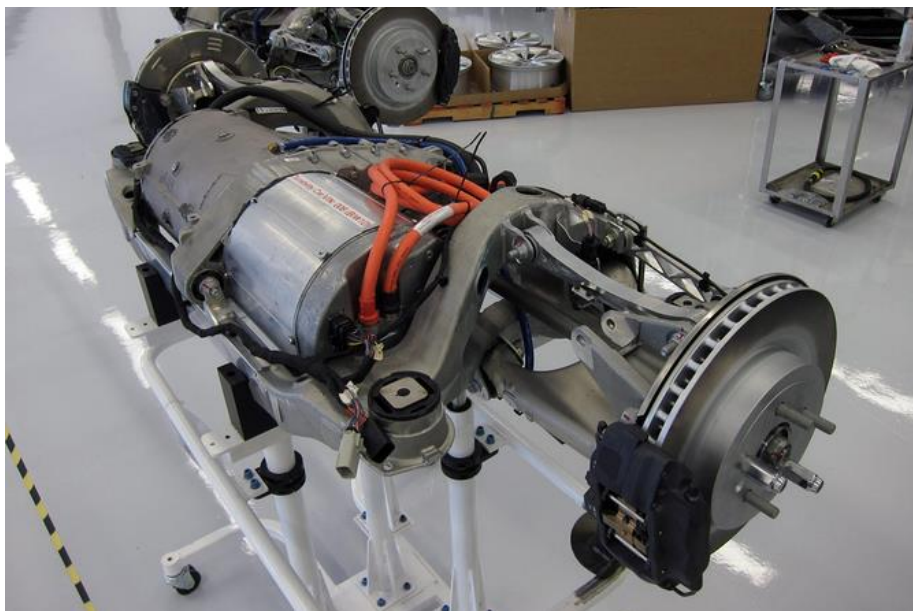


Figura 21. Sistema de propulsión usado en los vehículos de Tesla Motors

Si un motor de combustión solo tuviera una marcha, apenas sería capaz de alcanzar los 30 kilómetros por hora, que es lo que ocurre, por ejemplo, con la marcha atrás. Lo que nos lleva a otra limitación de los motores de combustión: solo son capaces de girar en un sentido, lo que hace necesario incorporar un sistema de transmisión que permita invertir el giro para integrar la marcha atrás. En cambio, los motores eléctricos pueden girar en ambos sentidos.

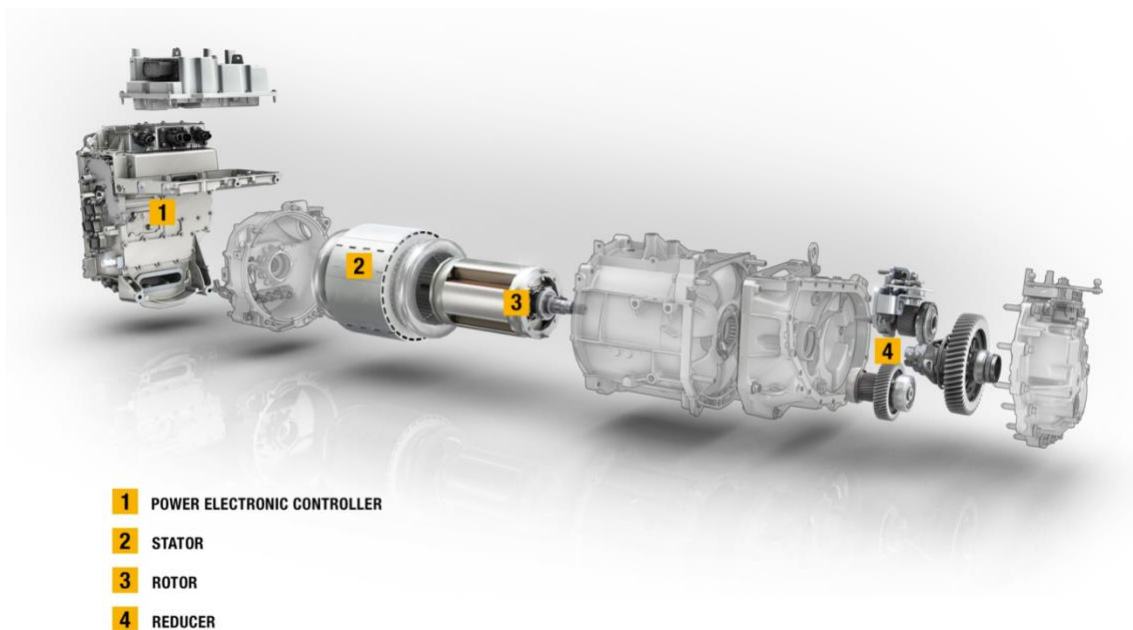


Figura 22. Sistema de propulsión usado en los vehículos Renault eléctricos.

En el caso de los autos híbridos el sistema de propulsión puede ser de tres tipos:

Sistema paralelo: En este sistema el motor térmico es la principal fuente de energía y el motor eléctrico actúa aportando más potencia al sistema. El motor eléctrico ofrece su potencia en la salida y en la aceleración, cuando el motor térmico consume más. Este sistema destaca por su simplicidad, lo que abre la puerta a la posibilidad de implementarlo en modelos de vehículos ya existentes, sin necesidad de diseños específicos, y facilita la equiparación de su coste al de un vehículo convencional. Este es el sistema que utiliza el Honda Insight.

Sistema combinado: En este sistema el motor eléctrico funciona en solitario a baja velocidad, mientras que a alta velocidad, el motor térmico y el eléctrico trabajan a la vez. El motor térmico combina las funciones de propulsión del vehículo y de alimentación del generador, que provee de energía al motor eléctrico, lo que suele aumentar la eficiencia del sistema, ya que se puede aprovechar la energía generada por el motor térmico, que en ciertas circunstancias puede ser en exceso, y en lugar de desperdiciarla, utilizarla para recargar las baterías del sistema eléctrico. El Toyota Prius utiliza este sistema.

Sistema en serie: En este sistema el vehículo se impulsa sólo con el motor eléctrico, que obtiene la energía de un generador alimentado por el motor térmico. El Chevrolet Volt es un híbrido eléctrico en serie.

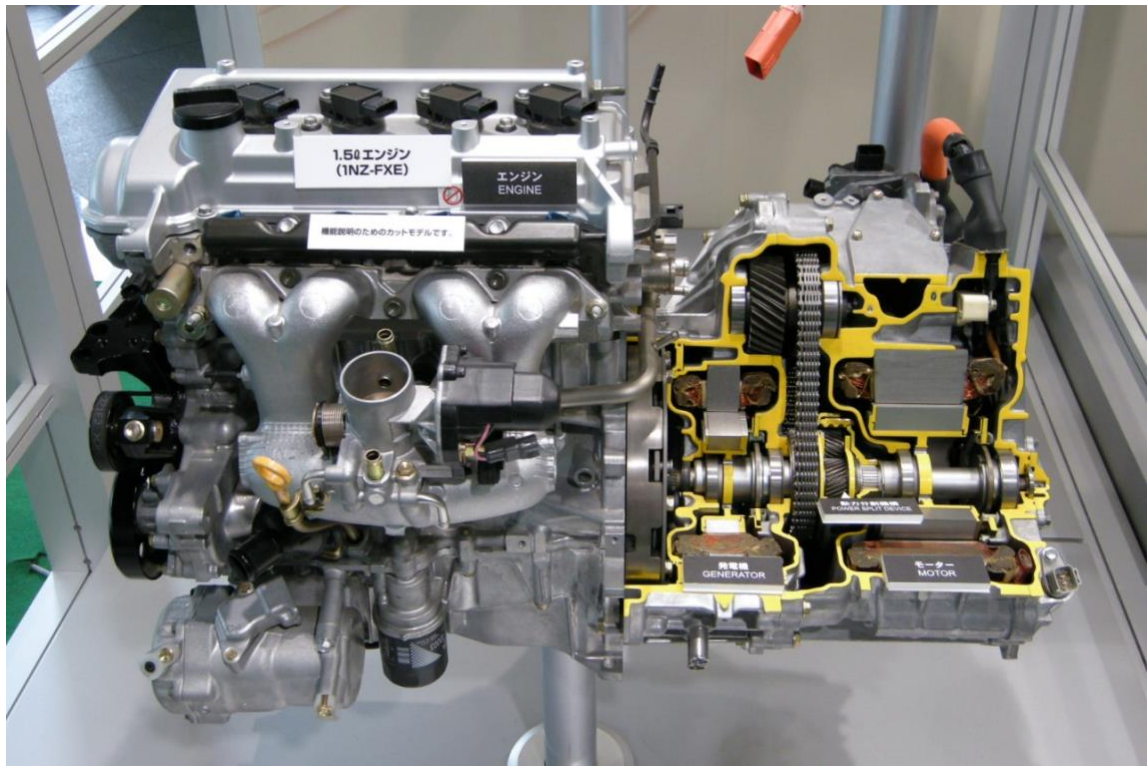


Figura 23 Sistema combinado de un HEV, Toyota Prius.

2.8 Hipótesis

Es posible el diseño y fabricación de un variador de frecuencia a escala nivel laboratorio utilizando electrónica de potencia y control disponible comercialmente y de bajo costo para evaluar los parámetros más importantes en el control de consumo de energía en auto eléctricos y ayudar a aumentar la autonomía de las baterías.

2.9 Objetivo

Establecer los conceptos y las técnicas de control de velocidad usando variadores de frecuencia reagrupando las más exitosas reportadas en la literatura. Estableciendo de forma concisa las ventajas y desventajas de estas técnicas desde el punto de vista tecnológico e industrial.

Objetivo Particular

Elaborar el diseño y fabricación de un variador de frecuencia, utilizando un modelo e implementación de control electrónico describiendo la influencia del control sobre un motor eléctrico síncrono utilizado en autos eléctricos e híbridos.

PROCEDIMIENTOS

3.1 Materiales utilizados

Para la parte de potencia se usó un motor <Brushless> de marca Electrify modelo Rimfire 0.15. Para la alimentación se usó una fuente de Voltaje power Suply, Modelo LW-3010KDS Variable de 0 a 30 volts , asegurando un voltaje estable. Para la parte de control se usó un Arduino Mega 2560 programado en C++. El Arduino es una tarjeta integradora de proyectos que cuenta con un microcontrolador programable. En la tabla 1, se listan los componentes usados.

Tabla 1. Abreviaciones de componentes y materiales	
Material	Abreviación
IGBT canal N 600 V 15 A	1MBC15060
Driver para MOSFET o IGBT 500V	IR2110
Motor Electrify modelo Rimfire 0.15	M_Rimfire
Fuente	Fuente
Tarjeta Arduino Uno	Arduino
Resistencias de diferentes valores	Res
Capacitor de poliéster 0.1 uF	CP-.1/100V
Capacitor Electrolítico 10 uF	CE-10/100V-TEAPO

3.2 Pruebas IR2110

Al realizar el circuito variador de frecuencia primero se realizaron pruebas de los controladores IR2110 para asegurar que el circuito del variador de frecuencia funcionara correctamente se probaron 3 circuitos con configuraciones similares.

La primera configuración fue utilizando el circuito integrado IR2110 como un simple activador como se describe en las referencias (10) (16), así cuando se recibiera una señal digital de +5V el motor se energizaría por medio del transistor IGBT este primer circuito propuesto se muestra en la Figura 24.

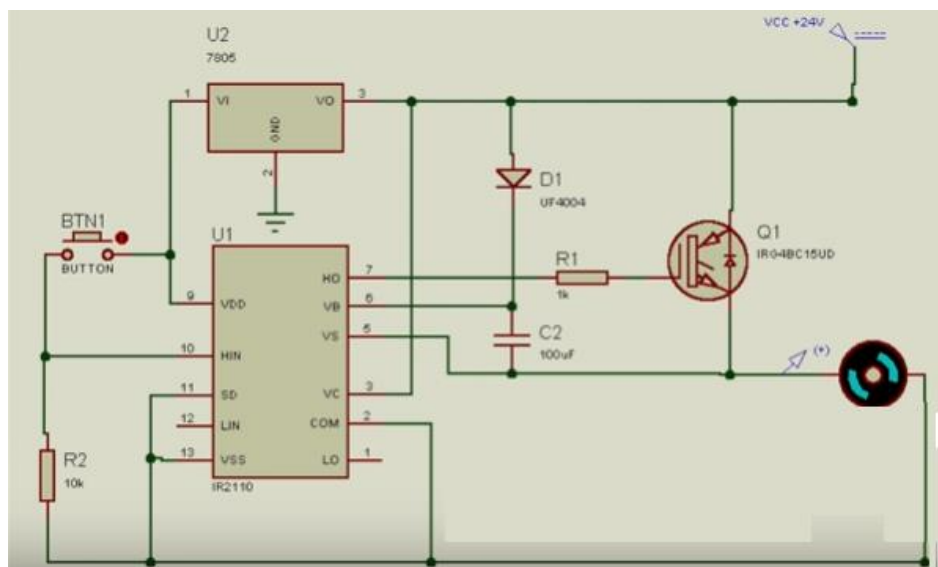


Figura 24. Circuito de prueba IR2110 como se propone en distintas referencias (10) (16), presenta múltiples fallas sobre motores potentes.

El capacitor bootstrap fue calculado como se indica en la referencia (10), utilizando los parámetros de la tabla 2, cualquier valor de capacitancia superior a 6.83 nF cumplirá los requisitos.

Tabla 2. Valores utilizados para calculo de capacitor bootstrap, (10) (17) (15)

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{min}}$$

Donde:

Q_g = Carga de la compuerta del IGBT. [Coulombs]

$I_{qbs(max)}$ = Corriente de reposo en el lado superior del driver. [Amperes]

Q_{ls} = Nivel de carga requerida por ciclo. [Coulombs]

$I_{Cbs(leak)}$ = Corriente de fuga del capacitor de *bootstrap*. [Amperes]

f = Frecuencia de operación. [Hertz]

V_{CC} = Voltaje de alimentación del driver. [Volts]

V_f = Voltaje de caída a través del diodo. [Volts]

V_{LS} = Voltaje de caída a través del transistor inferior. [Volts]

V_{min} = Voltaje mínimo entre las terminales V_B y V_S .

Q_g 1.00E-09

I_{qbs} 2.00E-05

Q_{ls} 4.00E-11

I_{cbs} 4.00E-06

f 1.00E+04

V_{cc} 24

V_f 0.7

V_{LS} 1

V_{min} 21

$C \geq$ 6.83E-09

La primera prueba basada en las referencias no funciono de la manera prevista ya que al activarse el capacitor bootstrap mediante el pulso digital de nuestro 1 lógico y después de retirar dicho pulso el capacitor no descargaba correctamente a tierra y la base del IGBT no cambiaba de estado dejando el motor encendido sin cambio alguno. Después de analizar el problema, de porque el motor no se detenía, se propuso como solución colocar una resistencia de 10kΩ conectando al capacitor bootstrap a tierra lo que se conoce como una conexión “pull down”, al colocar esta resistencia el capacitor se descargará a tierra directamente sin ser afectado por la impedancia variable de la carga que en este caso es el motor.

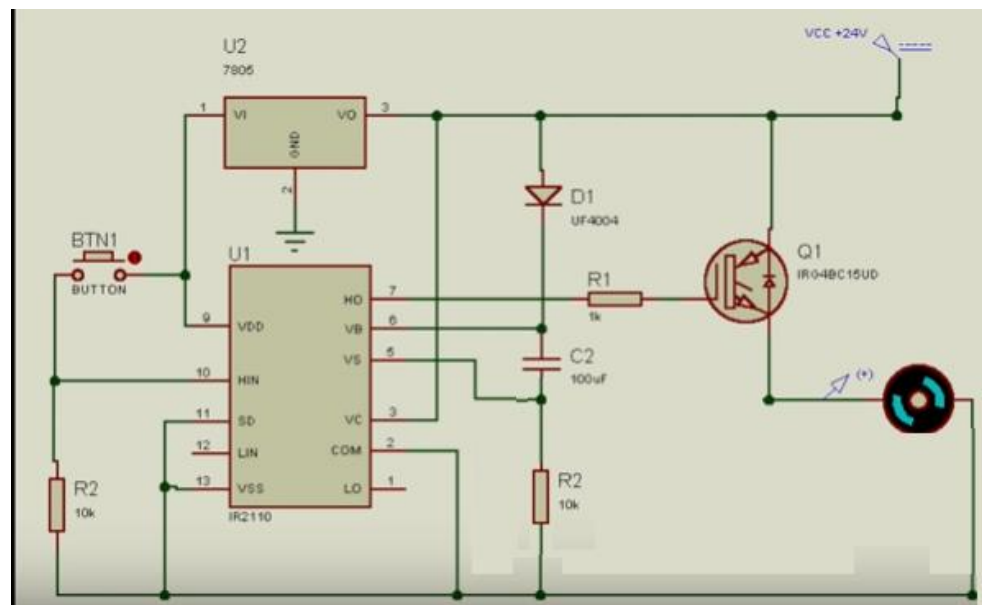


Figura 25. Circuito de prueba IR2110 modificación resistencia a tierra.

Las pruebas iniciales se realizaron con un pulsador y después se uso un PWM (Pulse With Modulation) como recomienda la hoja de especificación del IR2110.

La segunda configuración aparentemente funcionaba de forma correcta pero presentaba sobrecalentamiento sobre el mismo IR2110, este calentamiento solo se presentaba al conectar motores de mayor potencia al IGBT y dependía del tiempo en que estuviera activado, en la Figura 26 se muestra los daños ocasionados por este sobrecalentamiento.

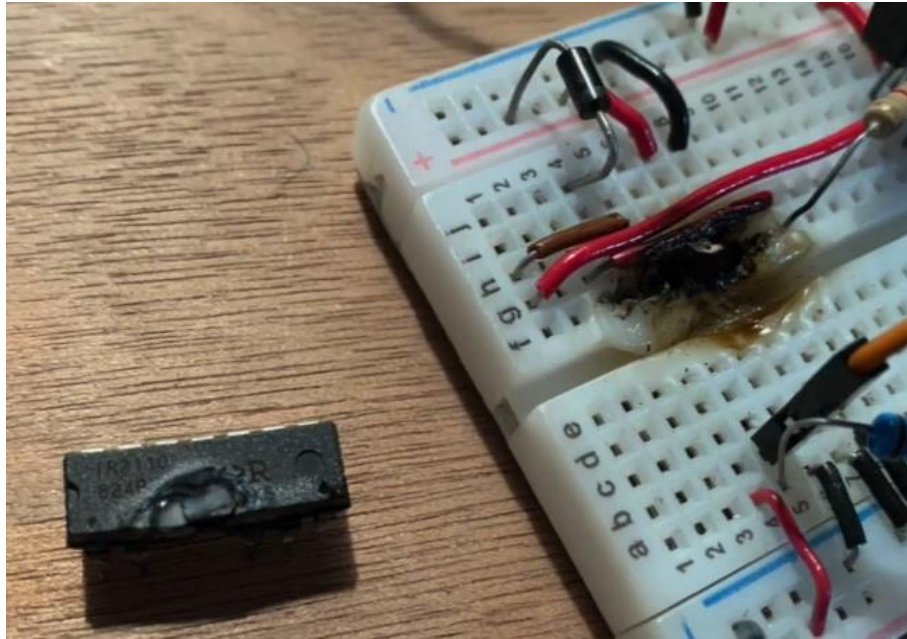


Figura 26. Circuito de prueba IR2110, sobrecalentamiento con motores de mayor potencia.

La solución a este calentamiento se abordó por dos medios, por un lado colocando una resistencia de “drenaje” conectada de la base del IGBT a la carga y por lo tanto subsecuentemente a tierra; y por otro lado la selección del capacitor bootstrap como ya se mencionó anteriormente depende de varios parámetros que en términos simples se requiere alta capacitancia para estas aplicaciones lo que no aclaran las referencias es el tipo de capacitor ya sea polarizado o no polarizado de las pruebas realizadas en esta tesis se pudo obtener la configuración adecuada de capacitores que consiste en un par de capacitores uno polarizado en paralelo a uno no polarizado (de poliéster) esto se discutirá más a detalle en el capítulo de las conclusiones.

La Figura 27 muestra el circuito de prueba más óptimo para el objetivo de esta tesis la construcción de un VFD para un auto eléctrico o híbrido.

3.3 Fabricación de variador de frecuencia

Considerando que la velocidad sincrónica expresa la velocidad de los motores en los autos eléctricos e híbridos, y tomando las referencias como punto de partida se fabricó un variador de frecuencia de acuerdo el circuito de la figura, nuestro circuito utiliza una señal de comando que proviene de un potenciómetro que emula al acelerador del auto esta señal se procesa en el controlador y la electrónica de potencia formada con el conjunto de driver IR2110 e IGBTs, convierte la corriente continua de la batería o fuente en una señal de control trifásica que opera directamente sobre el motor.

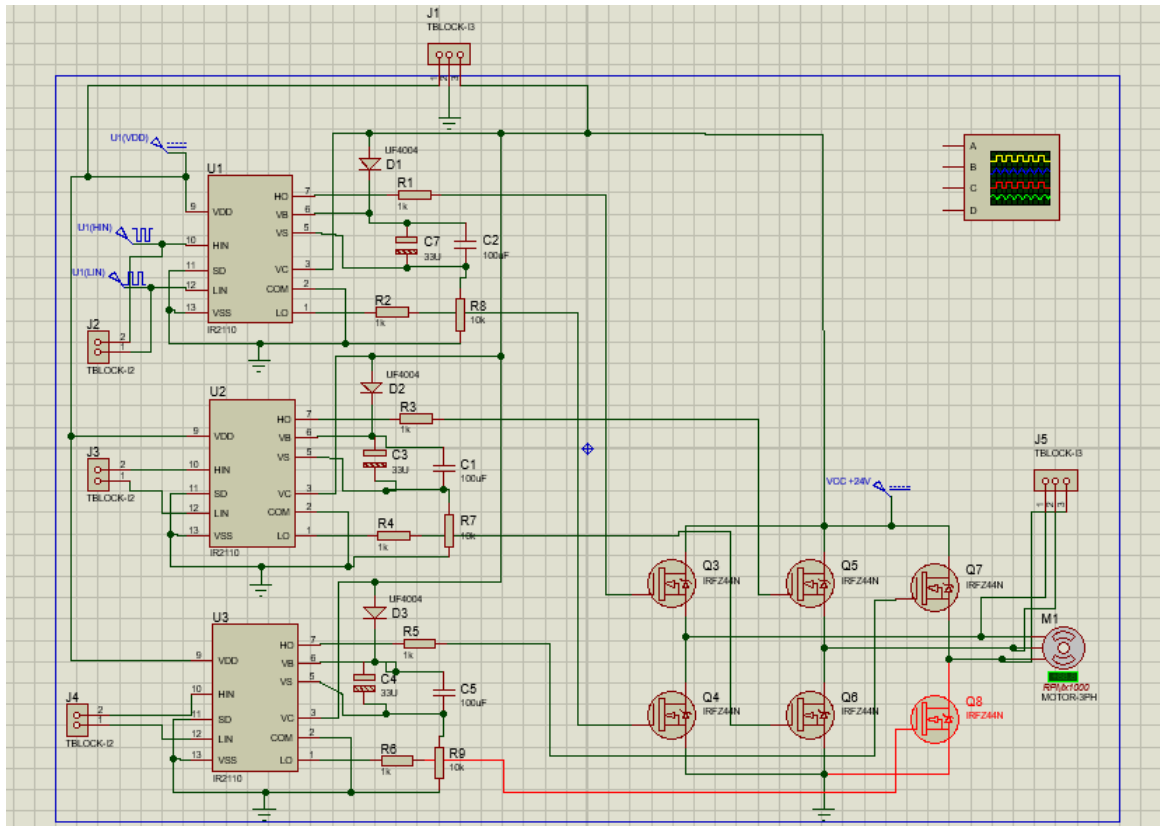


Figura 29. Circuito esquemático del variador de frecuencia diseñado.

Para la realización de la placa utilizamos el software Proteus, donde después de realizar el esquemático del circuito se obtuvo el diseño electrónico donde se ubica cada uno de los componentes de igual forma se trazan las rutas conductoras o caminos que unirán los componentes, el PCB resultante se puede ver en la Figura 30.

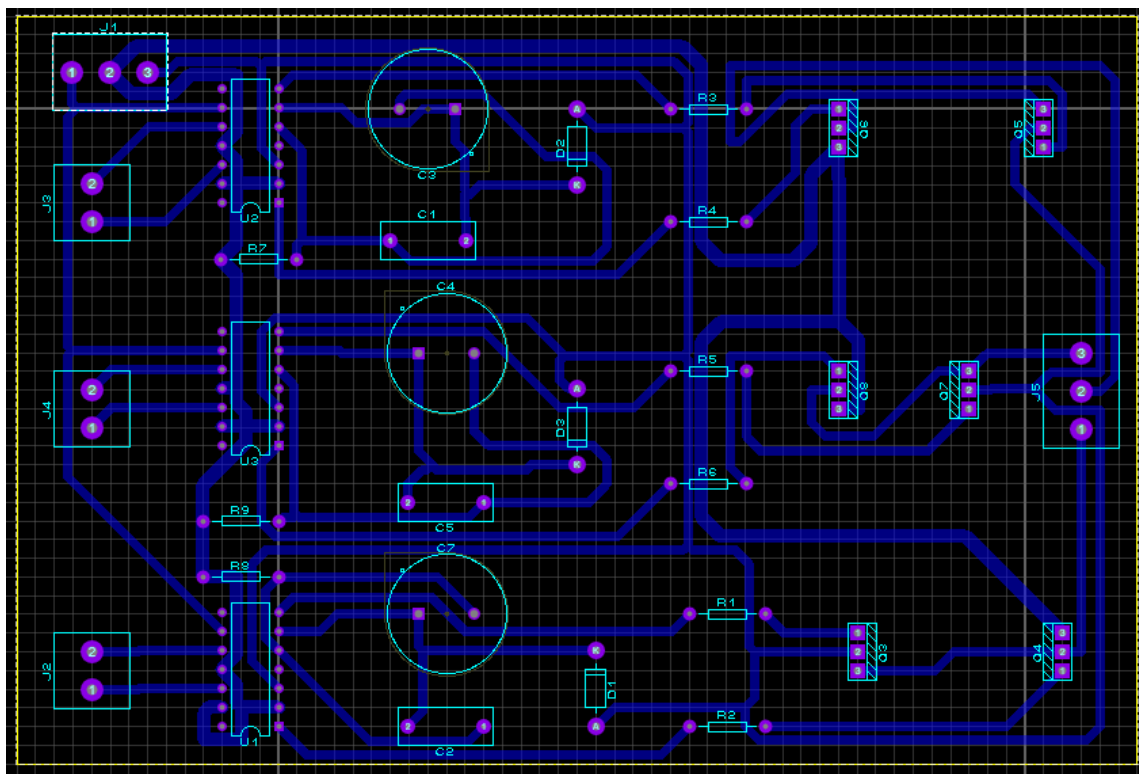


Figura 30. PCB del circuito final

De igual forma este software es capaz de mostrar una vista 3D simulada de como se vería la placa terminada, Figura 31.

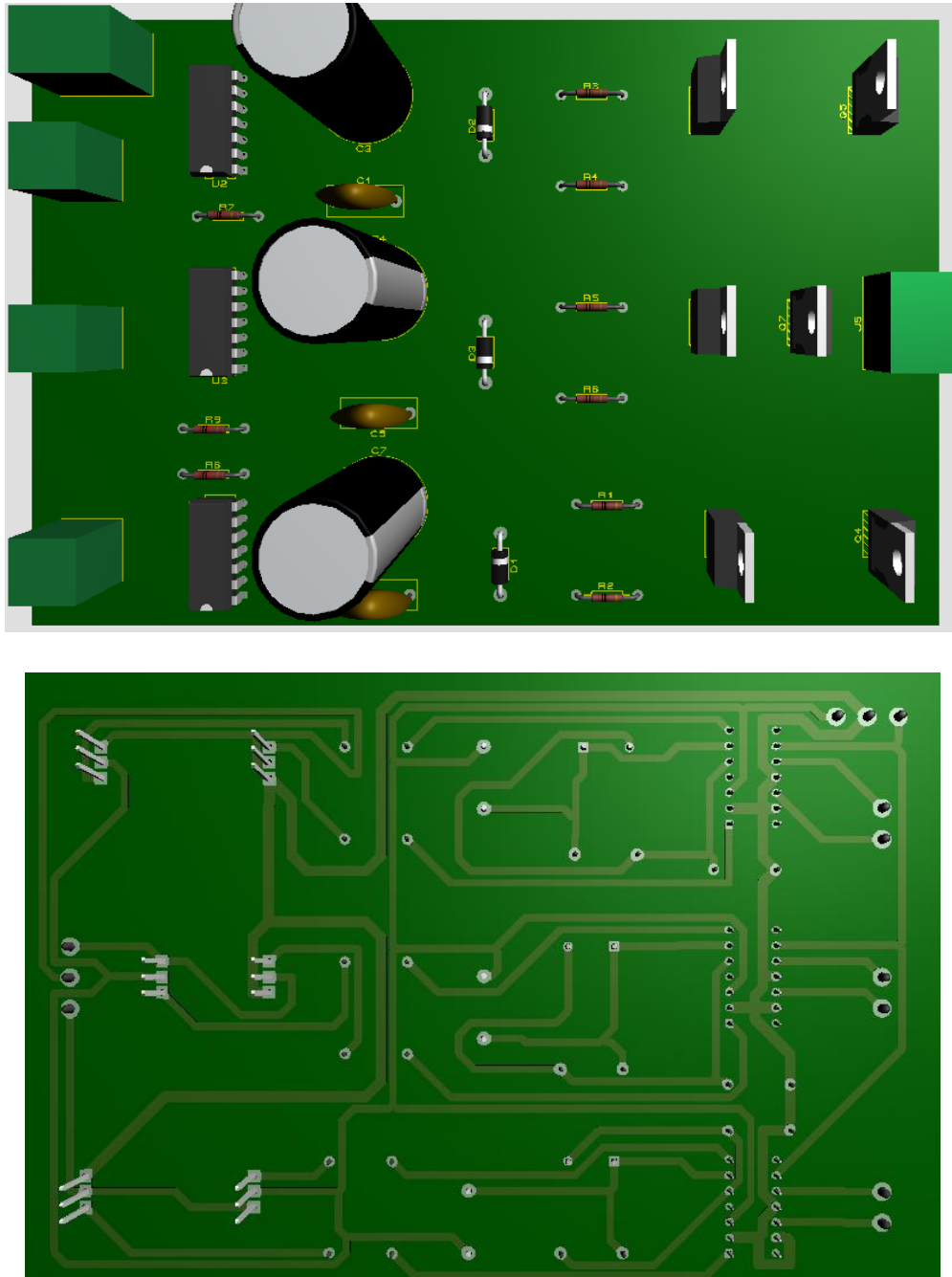


Figura 31. Modelo simulado de la placa final.

Ya una vez terminado el diseño en el software el siguiente paso fue exportar un archivo PDF únicamente de la capa inferior impreso en negativo que fue nuestra placa conductora de cobre, Figura 32.

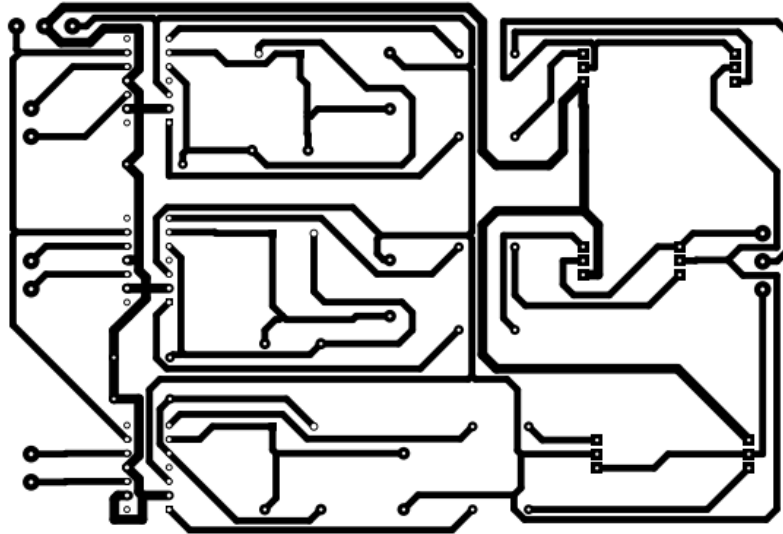


Figura 32. Pista de cobre de nuestro circuito variador de frecuencia.

Posteriormente se utilizó el método de litografía de transferencia, donde el circuito se imprimió en papel de transferencia térmica que mediante calor sobre la superficie de este papel promueve que la tinta se quede impregnada en la placa de cobre. Como se puede ver en la Figura 33.

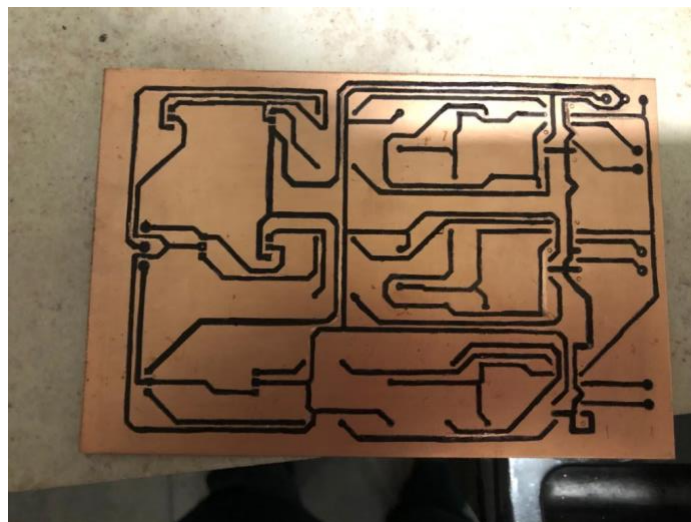


Figura 33. Placa con tinta impregnada

Después se realizó un ataque químico sobre la placa con una solución ácida compuesta de 2/3 de cloruro férrico y 1/3 de agua esta solución actúo como agente corrosivo y disolvió el cobre que no estaba protegido por la tinta, Figura 34.



Figura 34. Placa sumergida en solución ácida.

El proceso final consistió en la soldadura de todos los componentes mediante la técnica de soldadura blanda con cautín usando como metal de aporte la aleación 60Sn-40Pb.

3.4 Programación del microcontrolador

La programación del microcontrolador representó un reto en este proyecto debido a que se necesitaba enviar señales de activación a cada uno de los IGBT en una secuencia específica y de forma análoga para emular una onda senoidal para cada bobina del motor desfasadas 120 grados entre sí.

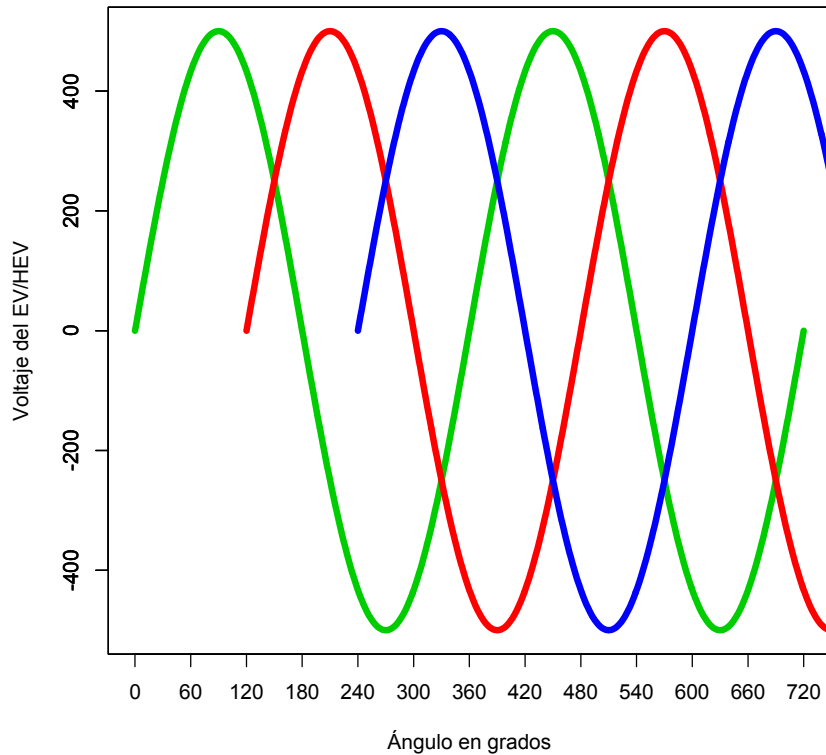


Figura 35. Ondas de voltaje requeridas para activar cualquier motor de un EV/HEV.

Para generar las ondas y poder controlar la frecuencia en este trabajo elaboramos un sistema de control usando un PWM variable en el tiempo, Figura 36, también conocido como SPWM (Sinusoidal pulse width modulation) (18), en este método utilizando pulsos de igual altitud cuyo ancho de pulso aumenta sinusoidalmente generando el efecto neto equivalente a una onda sinusoidal.

En nuestro circuito tenemos 3 IGBT del lado alto y 3 del lado bajo, si tomamos una fase para explicarlo, un IGBT alto y uno bajo de la misma rama como lo muestra la Figura 29, debemos mandar una señal analógica oscilante únicamente positiva a la terminal HN del IR2110 para que active de igual forma el IGBT del lado alto.

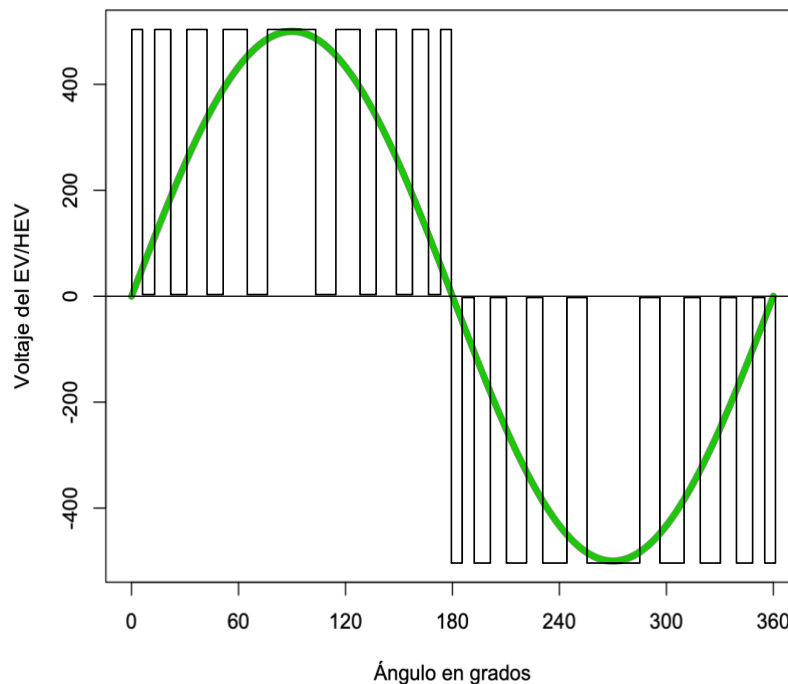


Figura 36. La imagen muestra como se genero en este proyecto la onda senoidal usando un SPWM.

De igual forma se deberá enviar una señal analógica oscilante a la terminal LN del IR2110, ver Figura 29, para que active el lado bajo generando la parte negativa de la onda requerida por el motor.

Como se menciono anteriormente una estrategia para generar una onda senoidal es utilizar un SPWM, en este trabajo desarrollamos un código que genera un PWM (una salida analógica) el cual varía con respecto al tiempo teniendo como valor de su amplitud la función seno re-mapeada a los valores estándar de una salida analógica, Figura 37, usando solo los valores positivos de la onda ya que solo los positivos son los valores que activan las terminales del IR2110, el código se muestra en el apéndice D.

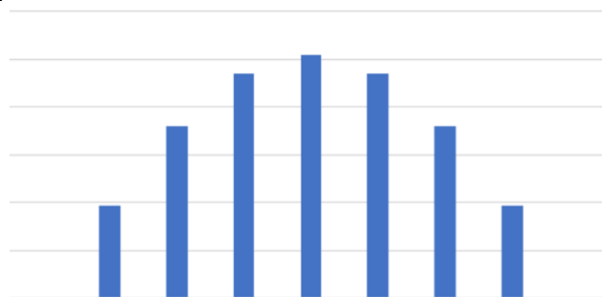


Figura 37. Cada barra representa el nivel de voltaje medio obtenido por el PWM en un determinado intervalo de tiempo que a su vez es incrementado en razón de la onda senoidal.

Al tener 3 fases lo común será pensar que se requieren solo 3 señales como se ve en la Figura 38, pero se requirió 6 señales PWM, ya que hay que recordar que se tiene dos IGBT (ver Figura 29) por cada fase el Alto y el Bajo la parte positiva y la parte negativa de la onda así que nuestro algoritmo genera la onda tal como se muestra en la Figura 39.

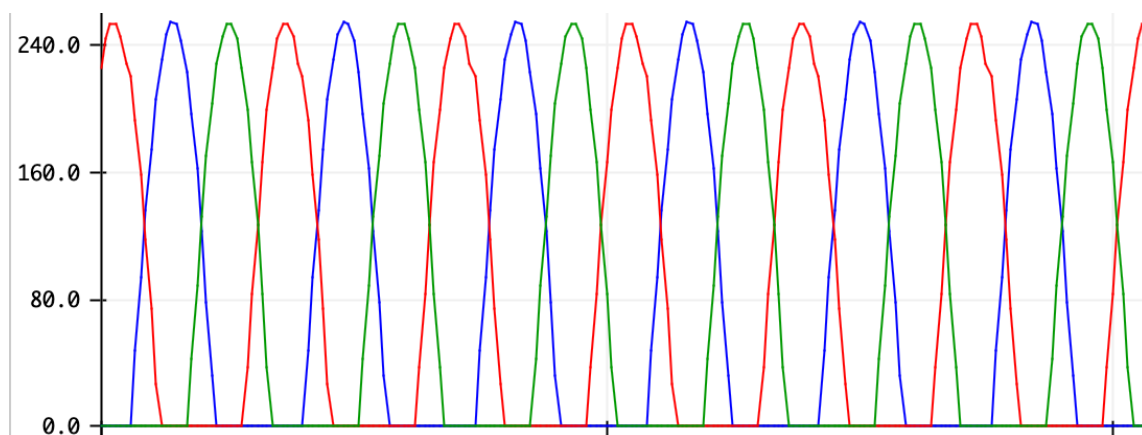


Figura 38. Tres fases (rojo, azul, verde) mostrando solo la parte positiva de la onda senoidal.

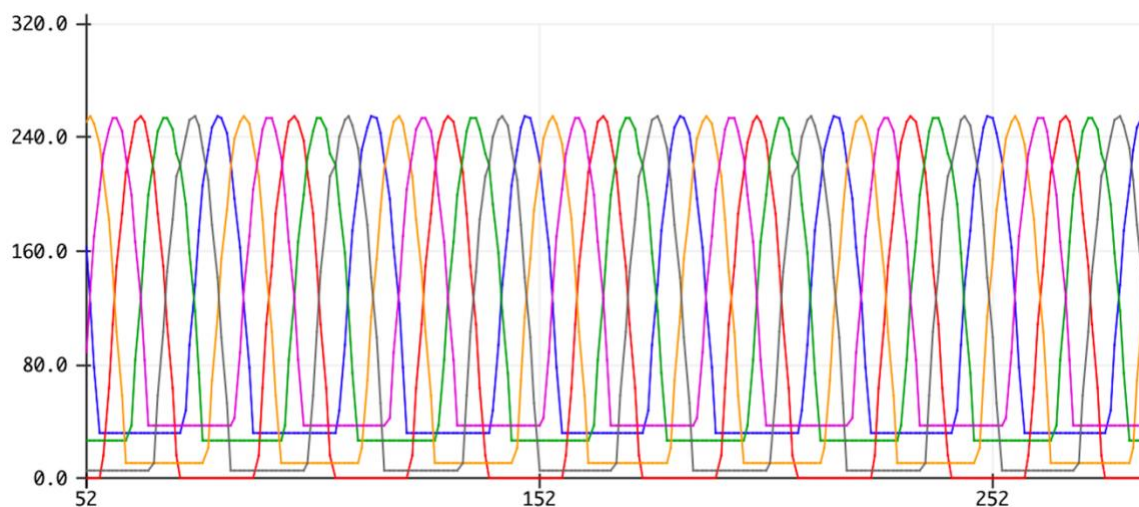


Figura 39. Seis señales positivas generadas por nuestro programa para activar los correspondientes IGBTs de las tres fases.

RESULTADOS

4.1 Prototipo VFD realizado

En la Figura 40 se muestra el prototipo de VFD que fue construido en este proyecto.

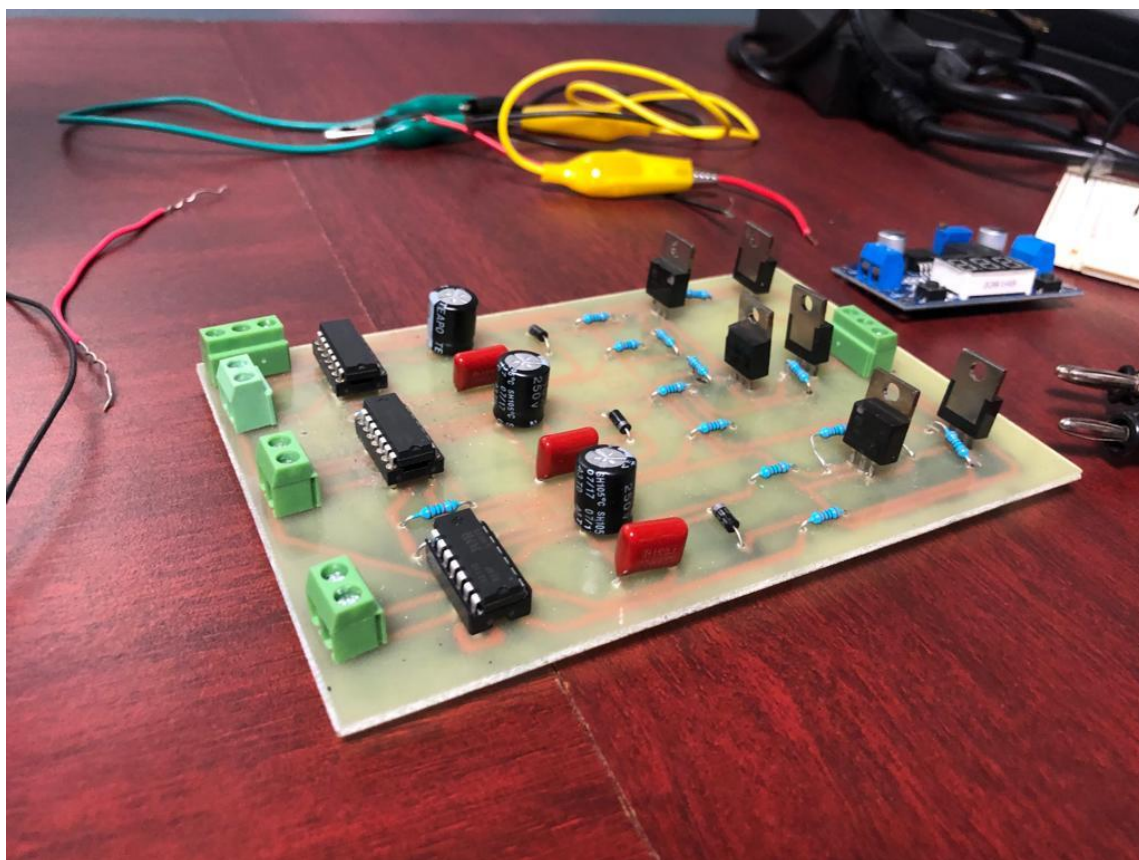


Figura 40. Tarjeta generada por nuestro proyecto.

El dispositivo diseñado e implementado se pone a prueba en el laboratorio de circuitos eléctricos sobre el motor trifásico electrifly modelo Rimfire 0.15, como se muestra en la Figura 41 y Figura 42.

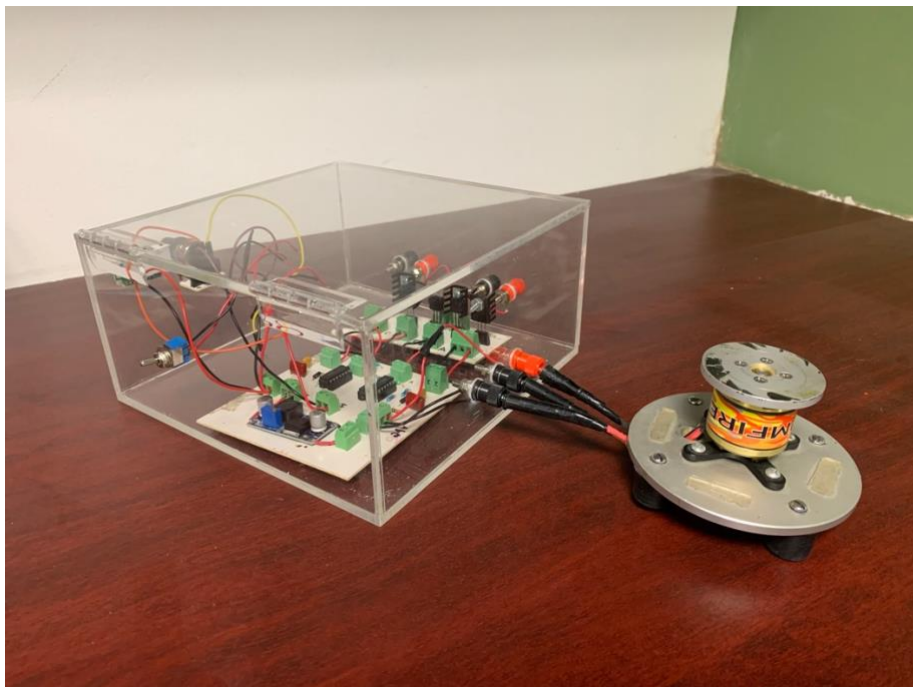


Figura 41. Tarjeta generada por nuestro proyecto conectada al motor trifásico brushless Rimfire 0.15.



Figura 42. Motor trifásico electrifly modelo Rimfire 0.15.

4.2 Comportamiento de señal trifásica obtenida.

Las señales de entrada fueron medidas mediante un osciloscopio, se puede notar las 3 señales senoidales desfasadas un ángulo de 120° cada una estando a 0° onda de color amarillo, a 120° onda de color magenta y a 240° de color azul, Figura 41, tal como se esperaba en la hipótesis y objetivo de esta tesis.

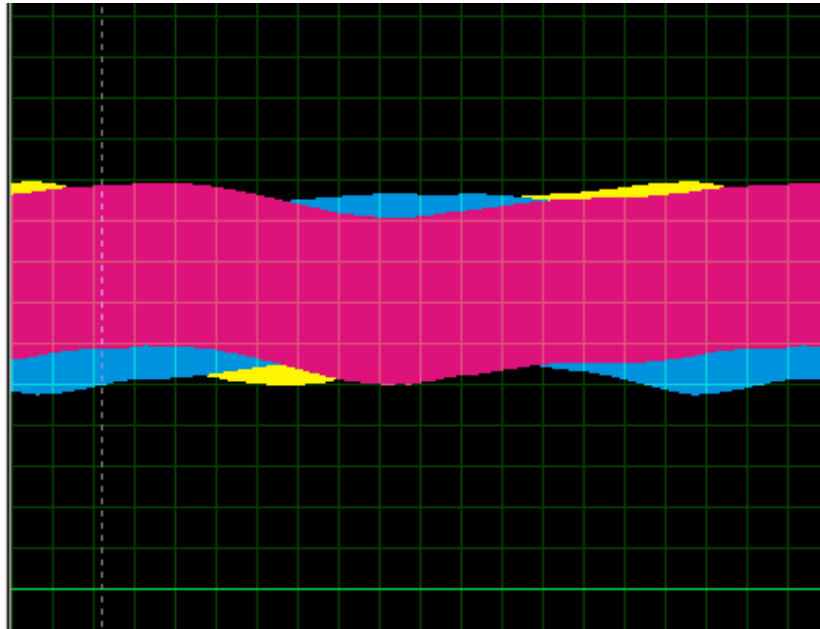


Figura 43. Resultado obtenido tres ondas senoidales a 0° 120° y 240° generadas por nuestro controlador medidos en el osciloscopio.

4.3 Frecuencia contra velocidad

En el control de velocidad de autos eléctricos e híbridos es importante demostrar que se tiene un control preciso de la velocidad, las siguientes figuras demuestran resultados satisfactorios del variador de frecuencia, con las gráficas de la señal generada a diferentes rangos de frecuencia, que por lo tanto, corresponde a su velocidad proporcional sobre el motor trifásico de prueba y se puede observar como nuestro VFD hace girar más rápido al motor conforme variamos la frecuencia suministrada. Se realizaron pruebas en un rango de 0 a 250 Hz, que corresponde a una velocidad desde 0 a 15000 r.p.m. cabe señalar que el motor brushless utilizado corresponde a los motores utilizados en los drones así que si fue posible hacer pruebas hasta estas revoluciones por minuto, pero obviamente si fuera un motor síncrono trifásico no se podría hacer hasta estos límites debido a las limitantes mismas de su construcción.

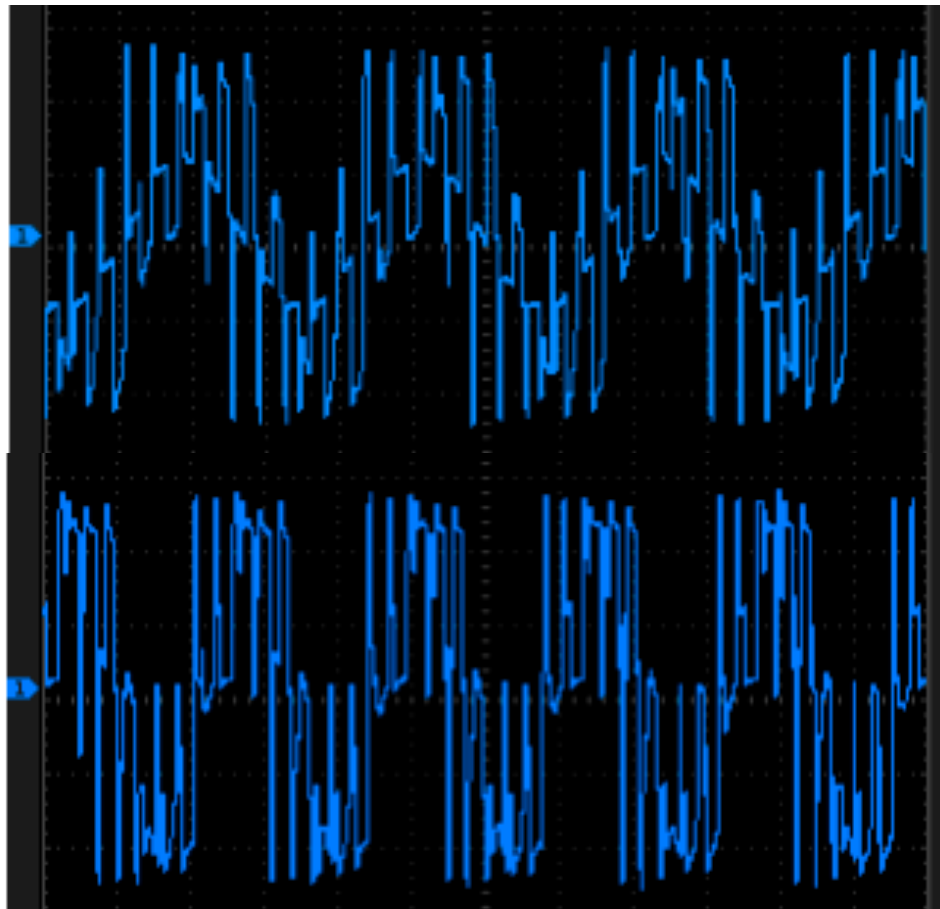


Figura 44. Resultado variación de la frecuencia incrementando la escala horizontal de tiempo de una única fase.

En la Figura 44 se observa una única fase a dos frecuencias diferentes, incrementado la escala de tiempo en el osciloscopio donde se alcanzan a observar los pulsos independientes del SPWM que genera la onda senoidal, en el apéndice D se muestra el código completo cargado a nuestro controlador.

La velocidad del motor trifásico brushless utilizado fue registrada mediante un tacómetro digital que es usado en el aeromodelismo, y la alimentación fue con la fuente descrita en la sección de materiales con un voltaje de prueba de 12 V.

CONCLUSIONES

Utilizando los procedimientos descritos en esta tesis fue posible obtener de manera sencilla y rápida, un control de velocidad y de acuerdo con la Figura 44 se puede ver que varía la frecuencia de forma satisfactoria, y se cumple el objetivo el cual fue diseñar un variador de frecuencia para poder controlar la velocidad en un motor trifásico tipo brushless con futura aplicación en autos eléctricos e híbridos.

También una conclusión importante de este trabajo fue la configuración de los capacitores adecuados para el buen funcionamiento del driver IR2110 ya que las referencias que existen no aclaraban el tipo de capacitor necesario ya sea polarizado o no polarizado, de las pruebas realizadas en esta tesis se pudo obtener que se requería un par de capacitores uno polarizado en paralelo a uno no polarizado (de poliéster), la razón de esto es que para estas aplicaciones se necesita alta capacitancia como se calculó en el capítulo de procedimientos que solo se encuentra en los capacitores polarizados pero al mismo tiempo se ocupa un capacitor capaz de descargarse en ambas direcciones como lo requiere la electrónica interna del IR2110, el hallazgo en nuestro trabajo fue que al combinar en paralelo un capacitor de electrolítico de 10 μF y un capacitor de poliéster de 0.1 μF , que se obtiene como valor de capacitancia 10.1 μF que combina perfectamente las dos condiciones necesarias para el control de motores grandes y potentes.

Se desarrolló un algoritmo y programa que genera de forma óptima una señal senoidal siendo una variante de los SPWM utilizados generalmente en estas aplicaciones, el código se muestra en el apéndice D.

Se pudo comprobar el funcionamiento en las 3 etapas de un variador de frecuencia las cuales son el control del microcontrolador, el control del IR2110, la etapa de potencia. Distinguiendo las etapas como separadas podemos concluir lo siguiente:

- En la programación del microcontrolador.

Fue posible generar pulsos digitales en forma de onda analógica al IR2110 para poder emular las ondas senoidales cumpliendo el punto más complicado el cual

fue invertir las ondas negativas como positivas, pero en un puerto diferente para que estas sean el pulso negativo de nuestras ondas.

- En el circuito diseñado y basado en el driver IR2110.

Se puede ver que es posible activar los transistores tanto MOSFET como IGBT con dicho controlador y se estableció el circuito más óptimo para conectar dicho driver y pueda funcionar de la forma correcta, cabe mencionar que esta parte puede ser utilizada en diversas aplicaciones diferentes a un variador de frecuencia, el cual servirá a muchos estudiantes tanto de escuelas técnicas como de ingeniería para poder realizar controladores diferentes con dicho circuito base como lo puede ser un puente H, entre demás circuitos.

- En la etapa de potencia.

En potencia se puede ver de manera física como varía la velocidad de un motor trifásico con dicho controlador, de igual forma el controlador funcionó con un motor a 12 volts por fase, aun así, los parámetros seleccionados para los IGBT permiten que la tarjeta pueda controlar motores de 0 hasta 200 volts.

También se puede observar que con esta tecnología es muy fácil comprender, como es que funciona el sistema de control tanto de un auto híbrido como eléctrico y de esta forma se puede aprovechar para poder aplicar en futuras investigaciones al tener un sistema que es posible controlar la velocidad de un motor eléctrico trifásico en cualquiera de sus modalidades y se puede aplicar para estudios como el eficientizar baterías, y a su vez ayudar a abrir más el mercado de estos vehículos. De esta manera la población puede conocer más sobre estas tecnologías para poder dar el salto para en algún momento en el futuro evitar en su totalidad los vehículos de combustibles fósiles y sea más fácil económicamente hablando adquirir autos tantos híbridos como eléctricos y con esto reduciendo la emisión de partículas contaminantes.

REFERENCIAS

1. **Agency, Environmental Protection.** *Environmental Protection Agency.* [Online] <http://www.epa.gov/>.
2. **Energy, U.S. Department of.** *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.* [Online] <https://www.energy.gov/>.
3. **Corporation, Toyota Motor.** *Environmental Report 2019.* s.l. : Ministry of the Environment of Japan Environmental Reporting, 2019.
4. **D. Gohlke, Y. Zhou.** *Impacts of Electrification of Light-Duty Vehicles in the United States, 2010 – 2017.* Lemont, IL USA : Argonne National Laboratory, 2018. ANL/ESD-18/1, 2018.
5. **Zhou, Yan.** Light Duty Electric Drive Vehicles Monthly Sales Updates. [Online] U.S. Department of Energy Office of Science, 2019. <https://www.anl.gov/es/light-duty-electric-drive-vehicles-monthly-sales-updates>.
6. **SRIRAM, N.** *Design optimization of an interior permanent magnet motor.* Wollongong, Australia : University of Wollongong, 1997.
7. **Qi Huang, Jian Li and Yong Chen .** *Control of Electric Vehicle.* P.R.China : University of Electronic Science and Technology of China , 2010.
8. *A Review on Switched Reluctance Machines for Electric Vehicles.* **N. Zabihi, R. Gouws.** Potchefstroom : IEEE, 2016. School of Electrical, Electronic, and Computer Engineering. pp. 799-804.
9. *Speed and Frequency Control of AC Induction Motor Using Variable Frequency Drive.* **Syed Usama Hassan, Hafiz Bilal Akram.** 56, Islamabad, Pakistan : Institute of Space Technology, 2015, Vol. 2.
10. *Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F2431.* **Aganza T. Alejandro, Pérez R. Javier, Beristain J. José Antonio.** 1, Sonora, México : REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, 2006, Vol. 2.
11. **Cai Chi-lan, Wang Xiao-gang, Bai Yue-wei, Xia Yan-chun, Liu Kai.** *Key Technologies of EV Motor Drive System Design.* Shanghai : Shanghai Second Polytechnic University, 2011.
12. **Moreno Recio, Javier.** *Inversor para la regulacion de un coche electrico mediante la tecnica de conmutacion PWM.* Linares : Escuela Politecnica Superior Linares.
13. *HYBRID HORSEPOWER: HYBRID/EV RACING TECHNOLOGY.* **Kelly, John D.** 2013, MotorAge, pp. 1-6.
14. **Al-Sharif, Lutfi.** *Variable Speed Drives in Lift Systems.* London : United Kingdom, 2001.
15. *IGBT or MOSFET: Choose Wisely.* **Carl Blake, Chris Bull.** California : International Rectifier, 2001.

16. **Jonatan Duque Lozano, Mauricio Roldán Castro, Henry Felipe Ibáñez Olaya.** *Diseño y construcción de un variador de velocidad aplicado a un motor asíncrono con arranque suave, para formación académica.* Bogotá, Colombia : Red Universitaria Metropolitana de Bogotá, 2016.
17. **Electric, Fuji.** *Datasheet 1MBC 15-060.* s.l. : Collmer, 2019.
18. *Simulation Analysis of SPWM Variable Frequency Speed Based on Simulink.* **DI, Min-Yan.** s.l. : IFSA Publishing, S. L., 2014, Sensors & Transducers, pp. 15-21.
19. **Ruíz, Melissa García.** *PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE VEHICULOS ELECTRICOS.* Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
20. **Martínez, Javier.** *AUTOS HIBRIDOS.* s.l. : Universidad Católica.
21. **Rassõlkin, Anton.** *A Test Bench to Study Propulsion Drives.* Tallinn : Tallinn University of Technology, 2013.
22. **Un-Noor, Fuad.** *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV).* Khulna : Sergio Saponara , 2017.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tesla Model S de 60kWh es un liftback eléctrico con autonomía de 335 km, fuente: EPA (Environmental Protection Agency) (1).	5
Figura 2. Toyota Prius el híbrido más vendido en el mundo es un liftback con un rendimiento de 22.96 km/l, fuente: EPA (1).	6
Figura 3. Ventas acumuladas en USA de EV y PHEV hasta julio de 2018, fuente: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2)	7
Figura 4. Ventas mensuales en USA de autos enchufables eléctricos e híbridos desde diciembre de 2010 hasta junio de 2019, fuente: Argonne National Laboratory, Light Duty Electric Drive Vehicles Monthly Sales Updates website, accesado el 25 de agosto de 2019 (4) (5).	8
Figura 5. Motor eléctrico del Chevrolet Bolt es un motor síncrono de imanes permanentes.	10
Figura 6. Motor jaula de ardilla usado el los vehículos de Tesla Motors.....	11
Figura 7. Conjunto Motor-Generador de dos versiones del HEV Prius.	12
Figura 8. Puente asimétrico para motor de de reluctancia conmutada (8).	13
Figura 9. Motor brushless usado en EV ligeros marca Perm Motors.	13
Figura 10. Esquema general de un VFD que controla un motor AC.	14
Figura 11. PWM utilizado para variar el voltaje y la frecuencia al mismo tiempo, también llamados de arranque suave.	15
Figura 12. Circuito equivalente, conexión en “estrella” sin neutro y “delta”.	16
Figura 13. Circuito de un VFD donde a la derecha se muestran los 6 IGBT.	17
Figura 14. A la izquierda estructura de capas semiconductoras de un IGBT y a la derecha circuito equivalente de IGBT	18
Figura 15. Circuito eléctrico de un medio puente H con MOSFET/IGBT.	18
Figura 16. Circuito eléctrico de un puente H completo con MOSFET/IGBT.	19
Figura 17. A la derecha encapsulado PDIP 14 del driver IR2110 a la izquierda “pinout” disposición de los pines.	19
Figura 18. Diagrama de Bloques del interior del driver de MOSFET el IR2110. .	19
Figura 19. Voltaje límite (threshold) necesario para ser recibido como un “1” lógico de acuerdo al voltaje suministrado en un IGBT.	20
Figura 20. Circuito eléctrico de un medio puente H con MOSFET/IGBT. Con capacitor Bootstrap	21
Figura 21. Sistema de propulsión usado el los vehículos de Tesla Motors	22
Figura 22. Sistema de propulsión usado el los vehículos Renault eléctricos.	23
Figura 23 Sistema combinado de un HEV, Toyota Prius.	24
Figura 24. Circuito de prueba IR2110 como se propone en distintas referencias (10) (16), presenta múltiples fallas sobre motores potentes.	27

Figura 25. Circuito de prueba IR2110 modificación resistencia a tierra.....	28
Figura 26. Circuito de prueba IR2110, sobrecalentamiento con motores de mayor potencia.....	29
Figura 27. Circuito con funcionamiento óptimo.....	30
Figura 28. Prototipo del controlador funcionando de la manera adecuada sobre placa de pruebas.....	30
Figura 29. Circuito esquemático del variador de frecuencia diseñado.	31
Figura 30. PCB del circuito final.....	32
Figura 31. Modelo simulado de la placa final.	33
Figura 32. Pista de cobre de nuestro circuito variador de frecuencia.....	34
Figura 33. Placa con tinta impregnada.....	34
Figura 34. Placa sumergida en solución ácida.	35
Figura 35. Ondas de voltaje requeridas para activar cualquier motor de un EV/HEV.	36
Figura 36. La imagen muestra como se genero en este proyecto la onda senoidal usando un SPWM.....	37
Figura 37. Cada barra representa el nivel de voltaje medio obtenido por el PWM en un determinado intervalo de tiempo que a su vez es incrementado en razón de la onda senoidal.	37
Figura 38. Tres fases (rojo, azul, verde) mostrando solo la parte positiva de la onda senoidal.....	38
Figura 39. Seis señales positivas generadas por nuestro programa para activar los correspondientes IGBTs de las tres fases.	38
Figura 40. Tarjeta generada por nuestro proyecto.	39
Figura 41. Tarjeta generada por nuestro proyecto conectada al motor trifasico brushless Rimfire 0.15.....	40
Figura 42. Motor trifásico electrifly modelo Rimfire 0.15.....	40
Figura 43. Resultado obtenido tres ondas senoidales a 0° 120 y 240° generadas por nuestro controlador medidos en el osciloscopio.	41
Figura 44. Resultado variación de la frecuencia incrementando la escala horizontal de tiempo de una única fase.....	42
Figura 47. Representación de motor AC jaula de ardilla.	50
Figura 48. Bloque de IGBTs de un HEV Prius.	52
Figura 49. Recopilación de autos eléctricos.....	53

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Abreviaciones de componentes y materiales	26
Tabla 2. Valores utilizados para calculo de capacitor bootstrap, (10) (17) (15) ..	27

Apéndice A. Motores trifásicos de corriente alterna

Los motores de corriente alterna asíncronos tanto monofásicos y trifásicos, son los que tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización poco mantenimiento y bajo coste de fabricación. Partes básicas de un motor de corriente alterna:

Carcasa: caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.

Estató: consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado del estató, que es una parte fija y unida a la carcasa.

Rotor: consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado del rotó, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

Los motores de corriente alterna y los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

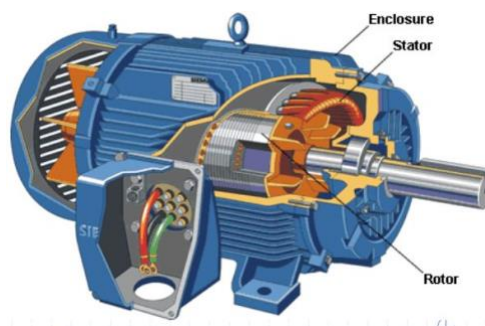


Figura 45. Representación de motor AC jaula de ardilla.

Partiendo del hecho de que cuando pasa corriente por un conductor produce un campo magnético, además si lo ponemos dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse produciendo así la energía mecánica. Dicha energía es comunicada al exterior mediante un dispositivo llamado flecha o eje.

Apéndice B. MOSFETs e IGBTs

En el mundo actual, existen una amplia variedad de transistores de estado sólido, modo conmutado y fuente de alimentación para realizar operaciones de conmutación en sistemas electrónicos de potencia. Todos estos tienen sus propias especificaciones en términos de corriente, voltaje, velocidad de conmutación, carga, circuitos del controlador y temperatura. Cada uno tiene sus limitaciones y ventajas también, pero su uso depende de los requisitos de la aplicación.

En la mayoría de las aplicaciones de conmutación, el transistor de efecto de semiconductor de semiconductor de óxido de metal (MOSFET) y los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) son predominantes que los otros dispositivos de conmutación debido a sus características superiores. Estas aplicaciones incluyen fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), inversores y convertidores solares, varios sistemas de controladores de motor, aplicaciones basadas en la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), fuentes de alimentación de modo de conmutación (SMPS), etc.

MOSFET es un dispositivo de conmutación más utilizado, que es un dispositivo de potencia controlado por voltaje a diferencia del BJT, que es un dispositivo controlado por corriente. MOSFET es un dispositivo de conmutación de baja corriente, bajo voltaje y alta frecuencia. Se compone de tres terminales: puerta, drenaje y fuente. Viene con dos modos diferentes: modos de mejora y agotamiento y los MOSFET pueden ser MOSFET de canal P o N-canal. Los MOSFET varían según el nivel de voltaje del terminal de puerta.

En un modo de agotamiento, la conductancia máxima tiene lugar entre la fuente y el drenaje si no hay voltaje en el terminal de la puerta, mientras que un voltaje positivo o negativo en la puerta disminuye la conductividad. En un modo de mejora, el MOSFET no funciona si no hay voltaje en el terminal de la puerta, y si el voltaje es mayor, se produce la conducción.

IGBT está diseñado combinando las características de MOSFET y BJT en forma monolítica. Como los BJT tienen una alta capacidad de manejo de corriente y el control MOSFET es fácil, se prefieren los IGBT para aplicaciones de potencia media a alta. Es un dispositivo portador de carga minoritario y tiene una alta impedancia de entrada.

Similar al MOSFET, cuando se aplica el sesgo de puerta positivo, permite la inversión de la región de base P debajo de la puerta y crea un canal N. Durante este estado, la resistencia de la capa n se reduce rápidamente cuando los agujeros positivos se inyectan desde la capa p + a la capa n. Esto hace que el IGBT maneje más corrientes que el MOSFET debido a menores pérdidas de conducción. Para apagarlo: la polarización negativa en la puerta o la reducción del voltaje de la puerta a un nivel umbral lo desactiva debido a la falta de inyección de agujeros en la región N.

Las primeras versiones del IGBT también son propensas a engancharse, pero hoy en día, esto está bastante bien eliminado. Otro problema potencial con algunos tipos de IGBT es el coeficiente de temperatura negativa, que podría conducir a fugas térmicas y dificulta el logro efectivo de la conexión en paralelo de dispositivos. Este problema ahora se está abordando en las últimas generaciones de IGBT que se basan en la tecnología "sin perforación" (NPT). Esta tecnología tiene la misma estructura básica de IGBT, pero se basa en silicio difuso en masa, en lugar del material epitaxial que tanto IGBT como MOSFET han usado históricamente.

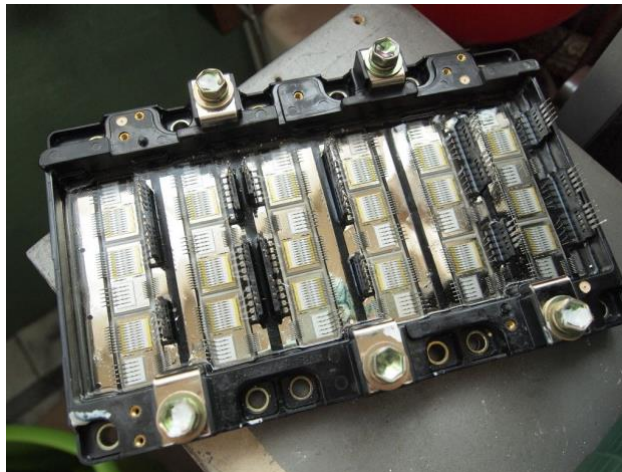


Figura 46. Bloque de IGBTs de un HEV Prius.

Apéndice C. Recopilación de los primeros vehículos eléctricos

La siguiente recopilación fue obtenida de la fuente (19)

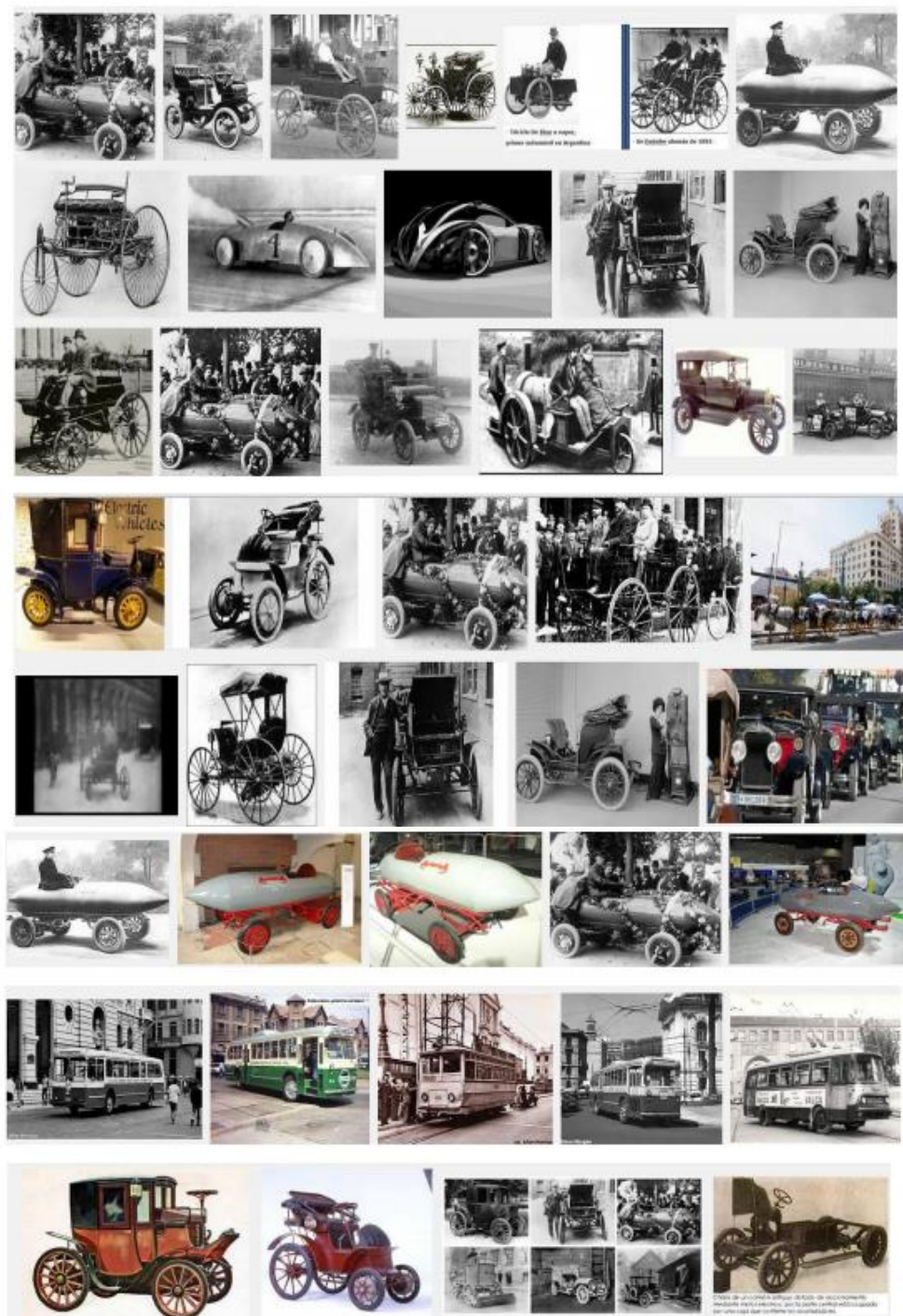


Figura 47. Recopilación de autos eléctricos

Apéndice D. Código desarrollado en este proyecto

En esta sección se muestra el código para producir una onda sinusoidal con el microcontrolador para poder mandar los pulsos al IR2110, en este caso el microcontrolador fue un Arduino Uno.

```

/*
  Dr. Roberto C. Cabriales
  Ing. Hector A. Lozano Flores
*/

float f = 30; //frecuencia default
float pot;
int frec_min = 20; //minima frecuencia se puede modificar
int frec_max = 100; //maxima frecuencia se puede modificar
float T; //periodo de la onda
float pasos; //paso que se calculan para quedar siempre de 1ms
float grados;
int fase_a = 3; //pines analogicos de arduino
int fase_a_2 = 5;
int fase_b = 6;
int fase_b_2 = 9;
int fase_c = 10;
int fase_c_2 = 11;
float var1, var2, var3, port1, port2, port3, port4, port5, port6;

void setup(){
  pinMode(fase_a,OUTPUT); //salidas usadas como PWM
  pinMode(fase_a_2,OUTPUT);
  pinMode(fase_b,OUTPUT);
  pinMode(fase_b_2,OUTPUT);
  pinMode(fase_c,OUTPUT);
  pinMode(fase_c_2,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  pot=analogRead(0);
  pot=map(pot,0,1023,0.1,60);
  f=pot;
  T = 1/f;
  pasos = T/0.001; //Divido el periodo entre 1ms para saber cuantos pasos de 1ms se necesitan para
  cumplir el periodo
  grados = 360/pasos;
  float angulo_a=0;
  float angulo_b=120;
  float angulo_c=240;

  for(int i=0; i<=pasos; i++){
    var1=sin(angulo_a/57.3)*255;
    if(var1>0){port1=var1;}else{port2=abs(var1);}
  }
}

```

```
var2=sin(angulo_b/57.3)*255;
if(var2>0){port3=var2;}else{port4=abs(var2);}
var3=sin(angulo_c/57.3)*255;
if(var3>0){port5=var3;}else{port6=abs(var3);}
//para obtener salidas analogicas
analogWrite(fase_a,port1);
analogWrite(fase_a_2,port2);
analogWrite(fase_b,port3);
analogWrite(fase_b_2,port4);
analogWrite(fase_c,port5);
analogWrite(fase_c_2,port6);
delay(1);
angulo_a = angulo_a + grados;
angulo_b = angulo_b + grados;
angulo_c = angulo_c + grados;
//pasos = pasos - 1;
}
}
```