



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DUAL CON
DIFERENCIAL ELECTRÓNICO PARA UN VE

T E S I S
Q U E P R E S E N T A
FIDEL ANGEL CANCHÉ RODRÍGUEZ
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO



DIRECTOR DE TESIS: ING. GERMÁN JORGE CARMONA PAREDES

MÉXICO, D.F. A ____ DE _____ DEL 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

*A Ti que me diste la existencia... mi Creador;
A Ti que le diste sentido a mi vida... mi Salvador;
A Ti que me inspiras a ser digno hijo Tuyo... mi
Santificador;
Mi Señor, mi Amigo, mi Maestro... mi TODO.*

AGRADECIMIENTOS

A mi gran amigo, mi papá: Fidi
A mi linda promotora, mi mamá: Mary
A mi hermana mayor: Clau
A mi pequeña confidente, mi hermana menor:
Caro

A mi princesa, fiel compañera, mi hermosa
esposa: Angélica
A mi par de encantos: Yeni e Ir
A mi sorprendente hijo: José Angel

A mis suegros: Ramón y Dora Rita

A mi compadre Rulo, Don Raúl, Doña Blanca
y toda la familia

A mi amigo y director de tesis: Ing. Germán

A mis amigos del II: Alex F., Joaquín y Alex
G.

Í N D I C E G E N E R A L

Introducción (Descripción del Problema)	1
CAPÍTULO I : Anatomía de los Vehículos Eléctricos	4
I.1 Introducción	
I.2 Historia	
I.3 Anatomía	
I.4 Descripción de los Componentes Principales	
CAPÍTULO II: Microcontroladores	16
II.1 Introducción	
II.2 Microcontroladores	
II.3 Tipos de Microcontroladores	
CAPÍTULO III: Desarrollo del Controlador	32
III.1 Diseño del Controlador	
III.2 Implementación y pruebas	
Conclusiones Finales	50
Anexos	51
Bibliografía	61

INDICE DE FIGURAS

Introducción

Figura 1: Primer vehículo de transporte de la UNAM "VE-UNAM"	1
Figura 2: Segundo vehículo de transporte de la UNAM "Electrobus"	1
Figura 3: Volts Wagen Eléctrico de la UNAM	2
Figura 4: Vehículo Eléctrico de Reparto de la UNAM (VER-UNAM)	2
Figura 5: Par de motores eléctricos fijos en la tracción trasera	3

CAPÍTULO I: Anatomía de los VE

Figura I.1 VE típico de las empresas refresqueras	5
Figura I.2: Vehículos eléctricos de la compañía GM	7
Figura I.3: Sistemas que componen un VE	9
Figura I.4: Anatomía de un VE	10
Figura I.5: Volts Wagen II	11
Figura I.6: VER – UNAM	11
Figura I. 7: Baterías de Ácido-Plomo	13
Figura I.8: Controlador de uso comercial	14
Figura I.9: Freno regenerativo	15
Figura I.10: Cargador a bordo	15

CAPÍTULO II: Microcontroladores

Figura II.1: Diversos tipos de microcontroladores y sus accesorios	16
Figura II.2: Arquitectura básica de un microprocesador	18
Figura II.3: Dos esquemas de I/Os	21
Figura II.4: Dos modalidades I/Os para ruta de datos	22
Figura II.5: Diagrama de bloques del microcontrolador Intel MCS-51	23
Figura II.6: Diagrama de bloques del microcontrolador Intel MCS-96	24
Figura II.7: Diagrama de bloques del microcontrolador Motorola M68HC11	26
Figura II.8: Diagrama de bloques del microcontrolador Motorola M68HC16	27
Figura II.9: Diagrama de bloques del microcontrolador Texas Instrument MSP430x14x	30

CAPÍTULO III: Desarrollo del Controlador

Figura III.1: Diagrama de flujo principal del programa del microcontrolador	33
Figura III.2: Rutina de la señal proveniente del acelerador	34
Figura III.3: Rutina de la señal proveniente del voltaje en el banco de baterías	34
Figura III.4: Rutina de la señal proveniente de la corriente en la etapa de potencia	35
Figura III.5: Rutina de la señal proveniente de la temperatura en la etapa de potencia	36
Figura III.6: Rutina de la señal proveniente de la posición angular del volante	37
Figura III.7: Diagrama de bloques del sistema de control	38
Figura III.8: Conexiones reales del sistema de control	39
Figura III.9: Señales PWM del microcontrolador cuando $V_{in} = 0.8 V$	40
Figura III.10: señales PWMs en el drain de los mosfets cuando $V_{in} = 0.9 V$	41
Figura III.11: señales PWM con motores girando a velocidad baja	41
Figura III.12: señales PWM con motores girando a velocidad media	42
Figura III.13: señales PWM con motores girando a velocidad alta	42
Figura III.14: Señal PWM del segundo motor anulada por sobrecorriente	44
Figura III.15: Señal PWM del primer motor anulada por sobrecorriente	44
Figura III.16: señal PWM del primer motor reducida en su ancho de pulso	45
Figura III.17: señal PWM del segundo motor reducida en su ancho de pulso	46
Figura III.18: Señales PWMs mientras se está dando vuelta a la derecha	47
Figura III.19: Señales PWMs mientras se está dando vuelta a la izquierda	47

I N D I C E D E T A B L A S

CAPÍTULO II: Microcontroladores

Tabla II.1: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Intel	25
Tabla II.2: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Motorota	28
Tabla II.3: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Texas Instrument	31

La responsabilidad que tiene el hombre por el cuidado del medio ambiente y la gran necesidad del uso de los medios de transporte, lo ha llevado a buscar caminos viables que disminuyan, y de ser posible eliminen, la emisión de contaminantes. Por esta razón, los vehículos eléctricos (VE) han cobrado vital importancia como parte de la solución a este problema.

La UNAM a través del Instituto de Ingeniería responde a esta preocupación desarrollando un vehículo de transporte público con tracción eléctrica y poniéndolo en marcha bajo un programa de evaluación dentro del circuito de la Ciudad Universitaria, cuyo principal objetivo fue determinar los beneficios que aporta para mejorar la calidad del medio ambiente.



Figura 1: Primer vehículo de transporte de la UNAM “VE-UNAM”



Figura 2: Segundo vehículo de transporte de la UNAM “Electrobus”

Como segundo paso, al transformar y acondicionar vehículos particulares convencionales de combustión interna a vehículos eléctricos, teniendo como principal objetivo observar su desempeño, aprovechar sus ventajas y trabajar sobre las desventajas que presentan.



Figura 3: Volts Wagen Eléctrico de la UNAM

En un tercer paso en el desarrollo de vehículos eléctricos, el Instituto de Ingeniería junto con el Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de Ingeniería, diseñaron y construyeron otro vehículo cuyo principal objetivo es satisfacer la necesidad de reparto de carga ligera evitando la generación de gases contaminantes al medio ambiente. Recientemente se trabaja en las alternativas viables que sustituyan las baterías actuales al mismo tiempo que cumplan con las exigencias de la demanda, ofrezcan ventajas tanto en tecnología como en peso, entre otros.



Figura 4: Vehículo Eléctrico de Reparto de la UNAM (VER-UNAM)

El presente trabajo es una aportación tecnológica en el programa de desarrollo de Vehículos Eléctricos en la UNAM, derivado del proyecto del VER-UNAM cuyas características particulares son que cuenta con un par de motores eléctricos de corriente directa en la parte trasera y, prescinde del diferencial mecánico, mecanismo que comúnmente se utiliza para distribuir adecuadamente la potencia mecánica en cada rueda de tracción del vehículo, particularmente al dar vuelta. Sin embargo en este vehículo se seleccionó la opción de sustituirlo por los dos motores eléctricos, acoplados de manera independiente, uno a cada rueda de tracción.

Este esquema de tracción, abrió la oportunidad des desarrollo de un controlador dual con diferencial electrónico, que es el tema de este trabajo. Hasta ahora este vehículo opera con dos controladores independientes, uno para cada motor.

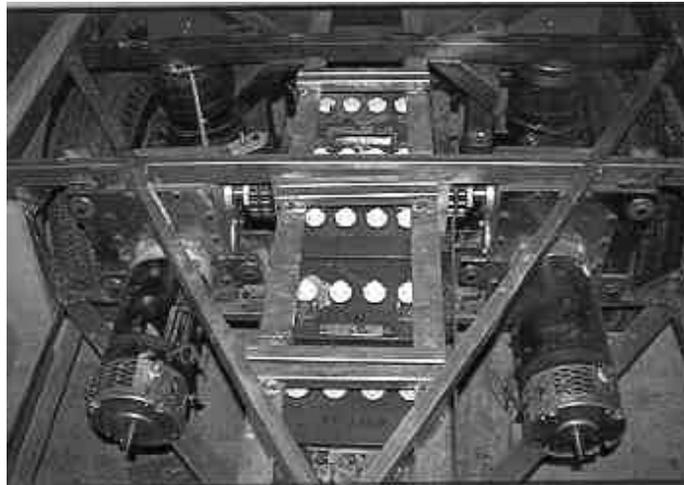


Figura 5: Par de motores eléctricos fijos en la tracción trasera

CAPÍTULO I: ANATOMÍA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

- I.1 Introducción
- I.2 Historia
- I.3 Anatomía
- I.4 Descripción de los Componentes Principales

I.1 Introducción

El Vehículo Eléctrico (VE) se presenta en las últimas décadas como la alternativa de futuro en cuanto a transporte se refiere. Las comparaciones que se realizan con su inmediato competidor, el Vehículo de Combustión Interna (VCI), se inclinan siempre hacia este último por razones económicas, de prestaciones, y referentes a la infraestructura. A pesar de ello, su desarrollo e investigación está más que justificado. Ninguna de las grandes compañías de automóviles quiere perder el tren del futuro, y por ello se sigue trabajando en el VE como alternativa a los problemas derivados de los automóviles actuales.

Estudios realizados en varios países han mostrado que los VEs tienen emisiones indirectas y asociadas de hidrocarburos y monóxido de carbono mucho más bajas que los VCI. Lo que significa disminuir la generación de ozono a nivel del suelo y por tanto contribuye a bajar los niveles de contaminación.

Se ha observado que los VEs son una alternativa más limpia con respecto a los vehículos convencionales en áreas altamente congestionadas y contaminadas, además son más eficientes que los VCI bajo condiciones normales de manejo, ya que a diferencia de los motores de CI los VEs no sufren pérdida de eficiencia por las condiciones de arranque y paro que típicamente caracteriza a las áreas congestionadas.

La ventaja total depende de cómo se genera la energía eléctrica y del grado al cual las emisiones sean controladas en la planta generadora. Los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno pueden ser controlados bastante bien en las plantas generadoras a base de combustible fósil o en los escapes de los vehículos de CI, pero es mucho más barato y más confiable controlar las emisiones en un pequeño número de plantas generadoras que en una gran flota de vehículos.

Con respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono, la comparación depende de las suposiciones de mezcla de combustibles y las formas de manejo. Una comparación basada en la experiencia japonesa indica que: los VEs emiten menos NO_x y CO_2 pero más SO_x que los VCI.

En países con elevada proporción de generación a base de combustibles fósiles y controles de emisiones poco sofisticados, las emisiones de los contaminantes NO_x , CO_2 y SO_x pueden incrementarse con los VEs. En tanto que en países con elevada proporción de generación de energía hidroeléctrica, nuclear y renovable, los VEs pueden reducir las emisiones

marcadamente. Las emisiones de CO₂ para VEs son más bajas que para VCI si la energía eléctrica es generada por gas natural pero son típicamente similares si es producida por carbón. Si la energía eléctrica es generada usando fuentes renovables, como hidroeléctricas, eólicas o solares, las emisiones atmosféricas son cero. Si la energía eléctrica es generada a base de energía nuclear, las emisiones atmosféricas son insignificantes, aunque hay desechos radioactivos que manejar.

EXPERIENCIAS EN MÉXICO

Como una alternativa para disminuir las emisiones contaminantes varias empresas que tienen flota vehicular propia han optado por el uso de VEs como una buena opción, principalmente en lo que se refiere a distribución de sus productos; entre ellas se pueden mencionar las empresas refresqueras, de alimentos, etc.

Los primeros vehículos fueron importados de Estados Unidos, que fueron desarrollados originalmente para ambientes industriales y propósitos recreativos (campos de golf). Estos vehículos fueron adaptados y después armados en México principalmente para un nicho específico del mercado (distribución de mercancía).

Algunas características de estos vehículos son:

- Su velocidad máxima es de 50 km/h.
- Su capacidad de carga de 600 a 1 500 kilogramos.
- Son alimentados por 6, 8 o 12 baterías.
- Tienen una autonomía de 40 a 60 kilómetros.
- Las baterías son de plomo-ácido.

Estas empresas reconocen que los VEs son una buena opción para la reducción de emisiones y en algunas de sus zonas son la forma más eficiente de realizar sus operaciones de distribución, sin embargo estos primeros vehículos adaptados presentaron muchas diferencias mecánicas en la suspensión, dirección y frenos, que abrieron la oportunidad del desarrollo de VEs.



Figura I.1 VE típico de las empresas refresqueras

I.2 Historia

I.2.1 Los Inicios

Alrededor de 1830, la mayoría de los medios de transporte era impulsados sólo a través de máquinas de vapor, debido a que las leyes de Inducción Electromagnética y por consecuencia, los motores y generadores eléctricos, no se habían establecido todavía. Faraday demostró el principio del motor eléctrico a principios de 1820 haciendo circular corriente eléctrica y magnética por un trozo de alambre, pero en 1831 él estableció las leyes de inducción electromagnética lo cual hizo posible desarrollar los motores y generadores eléctricos indispensables para el transporte eléctrico. La historia de los VEs en los inicios hasta principios de los años de 1900 se puede resumir de la siguiente manera:

Antes de 1830 – Medios de transporte impulsados por maquinas de vapor.

- 1831 - La ley de Faraday y de inmediato la invención del motor de CD.
- 1834 - Los VEs usaban baterías no recargables para pequeños trayectos.
- 1851 - Los VEs no recargables alcanzan una velocidad de 12 km/h.
- 1859 - Se desarrollan las baterías recargables.
- 1874 - La electricidad se produce por medio de dínamos.
- 1885 - Se desarrollan la gasolina y los motores de CI.
- 1900 - Se venden 4 200 automóviles:
 - o 40% impulsados por vapor.
 - o 38% impulsados por motores eléctricos.
 - o 22% impulsados por medio de gasolina.

Las especificaciones de algunos VEs se muestran a continuación:

Año	Modelo	Peso	Máxima velocidad	Autonomía
1897	French Krieger	1012 kg	10 km/h	30 km c/carga
1900	French B.G.S.		25 km/h	60 km c/carga
1915	Woods		25 km/h	60 km c/carga
1915	Lansden	1117 kg	40 km/h	55 km c/carga

En los años 20's desaparecen los VEs y los VCI predominan el mercado.

Tres razones de peso por las cuales los VEs desaparecen en un periodo tan corto son:

- La invención de motores de gasolina de fácil arranque en 1911.
- La producción masiva del Henry T (auto impulsado por gasolina) vendido a \$ 260 dólares en 1925, comparado con \$850 dólares en 1909. Los VEs eran mucho más caros.
- El acceso de la electricidad en áreas rurales era limitado para cargar las baterías, en cambio la gasolina podía ser vendida en cualquier parte.

1.2.2 Década de los 60's

Los vehículos eléctricos resurgen, principalmente por cuestiones del cuidado ambiental deteriorado por las emisiones causadas por los VCI. Las empresas de mayor venta de VCI, General Motors (GM) y Ford, se empiezan a involucrar en el desarrollo de VEs. General Motors inicia un programa invirtiendo 15 millones de dólares, el cual culmina con la creación de un par de vehículos llamados Electrovan (1964) y Electrovan (1966). Los componentes y especificaciones de estos vehículos eran:

- * Motor: Trifásico de inducción, 115 hp, 13 000 rpm
- * Baterías: Ag-Zn, 512 V, 310 kg
- * Controlador: Inversor DC - AC a base de rectificadores (SCR)
- * Máxima velocidad: 130 km/h
- * Autonomía: 100 km
- * Aceleración: 0 - 100 km/h en 15.6 s
- * Peso: 1 542 kg



GM Electrovan



Chevy Corvair



GM Electrovan

Figura I.2: Vehículos eléctricos de la compañía GM

El Electrovan utilizaba la carrocería y chasis del Chevy Corvair y la aceleración era comparable con el diseño del Chevy Corvair, un VCI.

La mayor desventaja del vehículo era el banco de baterías pues resultaba demasiado caro y pesado, con un reducido ciclo de vida y extenso tiempo de recarga.

Un factor de peso que logró captar la atención en el desarrollo de los VEs fue la famosa competencia "The Great Electric Car Race" a campo traviesa de 5 310 km llevada a cabo en Agosto de 1968, los participantes fueron un VE del Instituto Tecnológico de California (Caltech) y otro del Instituto Tecnológico de Massachussetts (MIT). La carrera generó gran interés público en los VEs y permitió realizar una extensa cantidad de pruebas para

desarrollar tecnología en ellos. Sin embargo, los logros no fueron suficientes para desarrollar un VE viable para el comercio de entonces.

1.2.3 Década de los 70's

El escenario se volvió muy favorable para los VEs debido a que los precios de la gasolina incrementaron de forma dramática gracias a una crisis energética, principalmente del petróleo importado de Arabia, todo lo cual causó una inmensa atención en los VEs. En 1975, se adquirieron 352 vans eléctricas de prueba para el Servicio Postal de Estados Unidos de América. En 1976, el Congreso dictó la ley "The Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act of 1976", la cual autorizaba un programa federal que promovía la investigación y desarrollo de tecnología de vehículos eléctricos e híbridos abriendo grandes posibilidades para su comercialización. El Departamento de Energía (DOE) estandarizó el diseño de los VEs de la siguiente manera:

Categoría	Uso Personal	Uso Comercial
Aceleración de 0 a 50 km/h	< 15 s	< 15 s
Máxima Velocidad	80 km/h	70 km/h
Autonomía	50 km	50 km
Tiempo máximo de recarga	< 10 h	< 10 h

GM estudió con cuidado las estandarizaciones y modificó sus recientes modelos utilizando la carrocería y chasis del Chevy Chevette con las siguientes características y sistemas:

- Motor: CD con excitación separada, 34 hp, 2400 rpm
- Banco de baterías: Ni-Zn, 120 V, 330 kg
- Baterías auxiliares: Ni-Zn, 14 V
- Controlador: Chopper CD usando transistores (BJT)
- Máxima velocidad: 100 km/h
- Autonomía: 100 km
- Aceleración: 0 a 90 km/h en 27 s

Se realizaron múltiples pruebas de campo con este VE de la GM equivalentes a 16 000 km las cuales probaron que era adecuado para lanzarlo al mercado.

1.2.4 Décadas de los 80's y 90's

El desarrollo de la electrónica a la par de los VEs, permitió desarrollar controladores más eficientes, desplazando el uso exagerado de circuitos, sustituidos por un microcontrolador.

Una vez establecidas las leyes de magnetismo, se empezaron a desarrollar diversas maneras de aprovechar todo tipo de energía que anteriormente se desperdiciaba, para recargar el banco de baterías.

I.3 Anatomía

El esquema simplificado de un vehículo eléctrico consta principalmente de los sistemas:

- Sistema de motorización.
- Sistema de control.
- Sistema de alimentación.
- Sistema de transmisión.
- Carrocería y chasis.
- Sistema de elementos auxiliares.

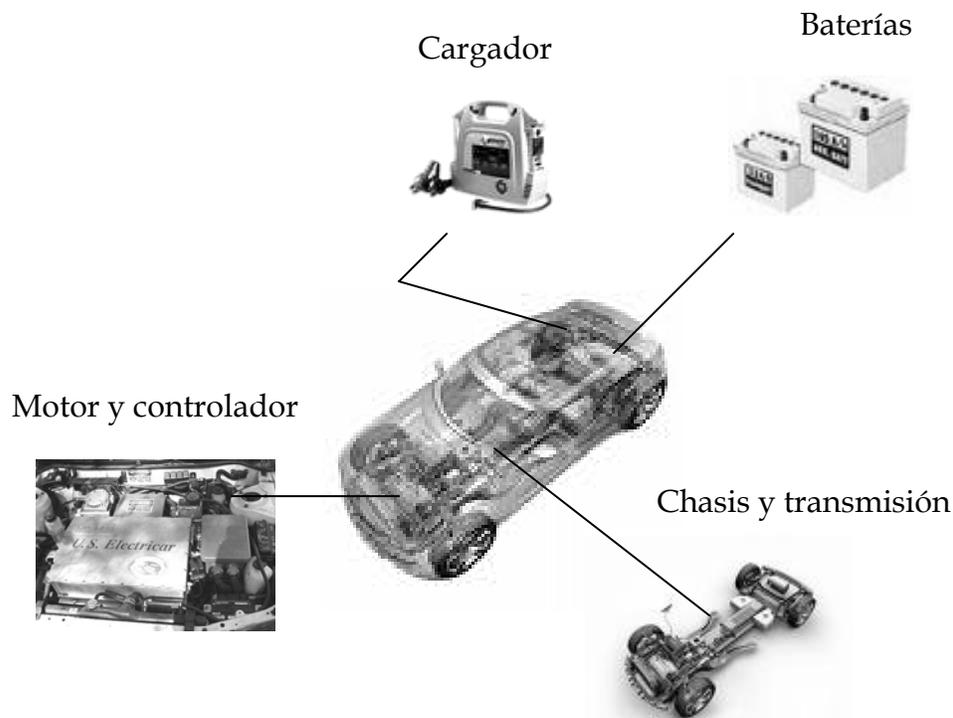


Figura I.3: Sistemas que componen un VE

El sistema de motorización, se compone del motor o los motores que accionan el vehículo. Dependiendo de las características del vehículo y de las prestaciones que se le quieran conferir, se elegirán entre los diferentes tipos de motores.

El sistema de control está íntimamente ligado a la elección del motor o de los motores que se necesiten. Es uno de los sistemas más importantes porque su misión es la de suministrar la energía necesaria al motor y regular su funcionamiento, tanto en velocidad como en potencia y par requeridos según las circunstancias. La unidad de control es la que gobierna

a la(s) etapa(s) de potencia la cual hace llegar la energía al(os) motor(es) para producir el movimiento en las ruedas.

El sistema de alimentación se compone de las baterías de tracción y del cargador. Las baterías son uno de los puntos más decisivos a la hora de realizar el diseño del vehículo, pues dado el estado de desarrollo actual de las baterías, es necesario, conocer la energía que son capaces de ceder, lo que influye en la autonomía del vehículo, la potencia capaz de desarrollar, lo que influye en las prestaciones del mismo y del peso y volumen de éstas, pues hoy en día son bastante pesadas, ocupan un volumen elevado y poseen un ciclo de vida poco considerable. El cargador, debe ser flexible y puede ser incorporado al vehículo o no. En caso de estar incorporado, no es necesario instalaciones especiales y basta con una toma de corriente doméstica, y en caso contrario, depende del cargador que se utilice siendo lo más común la necesidad de una toma de corriente bifásica o trifásica para acelerar el proceso de carga.

El sistema de transmisión, puede ser como el de un vehículo convencional, aunque dependiendo de como se realice el control del motor, es posible eliminar una serie de componentes. Por ejemplo, no es indispensable incorporar una caja de cambios mecánicos y según el número de motores eléctricos utilizados, es posible eliminar el diferencial. La marcha atrás es posible también eliminarla, ya que a un motor eléctrico se le puede hacer girar en ambos sentidos. Normalmente los componentes son la dirección, transmisión, caja de cambios y diferencial, ejes propulsores, ejes arrastrados, suspensión, frenos mecánicos y ruedas.

La carrocería y/o bastidor, puede ser de una sola pieza (carrocería autoportante), como en los automóviles actuales, o mediante un bastidor al cual se le incorpora un cerramiento de materiales ligeros. Dada la necesidad de ahorrar peso y costes de producción, se suele optar por esta última, consiguiéndose sobretodo una reducción en los costos y un aligeramiento del peso total.

Los sistemas auxiliares están formados por, la iluminación y señalización, circuitos de seguridad, interior y acabado, sistemas de refrigeración y calefacción, sistemas de navegación y baterías auxiliares.



Figura I.4: Anatomía de un VE

Hoy en día podemos establecer una segunda división entre el esquema principal que se pueden dar en la construcción de los automóviles eléctricos:

- a) Automóviles dotados de un solo motor que necesitan de una transmisión mecánica (reductor-diferencial).

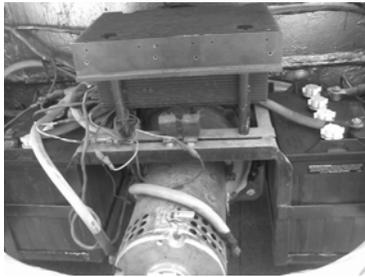


Figura I.5: Volts Wagen II

- b) Automóviles con motores integrados en las ruedas traseras con la opción de adaptar un diferencial electrónico.

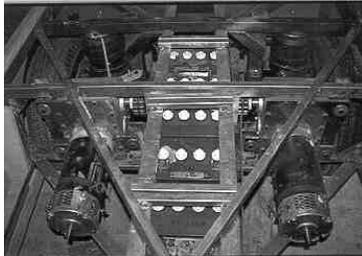


Figura I.6: VER - UNAM

I. 4 Descripción de los Componentes Principales.

I.4.1 Motores Eléctricos

I.4.1.1 Motor Eléctrico de Corriente Directa

El uso predominante de los motores de corriente directa se debe a las amplias ventajas que lo caracterizan como son los grandes pares de arranque, y el margen de regulación de su velocidad que lo hacen ideal para la propulsión de VEs. Además de esto, tanto la alimentación, como la regulación de su velocidad son procedimientos muy sencillos y económicos.

Motores de imanes permanentes. Estos motores están siendo universalmente empleados en pequeños VEs con potencias hasta los 20 kW. Son motores muy eficientes y de muy fácil control, no están adecuados para potencia constante, aunque sí para alta velocidad debido a que su campo no puede ser controlado, además su capacidad de sobrecarga está limitada ya que los imanes permanentes son sensibles a altas temperaturas y corrientes.

Motor serie. Son los motores de tracción tradicionales y todavía favoritos. Son motores simples y robustos que ofrecen un par elevado a una baja velocidad. Permanecen siendo uno de los motores más populares para los VEs debido a su libertad y facilidad de control y sobre todo a su elevado rendimiento. Su principal desventaja es que implementar el frenado regenerativo resulta muy complicado.

Motor de excitación independiente. Estos motores, donde el campo y la corriente están controlados de manera independiente, han llegado a ser muy populares desde la llegada de los controladores electrónicos. Requieren un circuito de control electrónico para que la operación sea eficiente y estable. Con este tipo de motor el frenado regenerativo puede ser implementado muy fácilmente. Su principal desventaja es el reducido par a baja velocidad lo cual implica demandar demasiada corriente para el arranque.

I.4.1.2 Motor de corriente alterna

Motor asíncrono. Los motores asíncronos de corriente alterna, es decir los motores de inducción, se utilizan en VEs gracias en parte al avance en la electrónica de potencia. Las ventajas que presentan éstos sobre los de corriente directa son por ejemplo un menor tamaño para la misma potencia así como menor peso, el mantenimiento es prácticamente nulo y poseen un rendimiento mucho mayor, pueden alcanzar altas velocidades y entregan una elevada potencia específica.

Su principio de funcionamiento se basa en la creación de un campo magnético giratorio al que intenta seguir el rotor del motor, por ello se denomina asíncrono, ya que no alcanza la velocidad de sincronismo del campo. Se observa que el motor ofrece un par proporcional a

la diferencia de velocidad. La velocidad de estos motores es directamente proporcional a la frecuencia de alimentación.

En cuanto al freno regenerativo, este motor es apto, pues al bajar el suministro del motor, debido a la inercia que lleva, el rotor circulará más rápido que el campo, lo que implica un deslizamiento negativo, que hará cambiar el signo de la corriente así como el flujo. Existe además la posibilidad de introducir los motores síncronos, que desarrollan grandes prestaciones en comparación con los anteriores, pero el problema en éstos es la necesidad de tener controlado en todo momento la velocidad del rotor.

Motor síncrono. Los motores síncronos para VEs son principalmente de tipo imanes permanentes. El circuito electrónico asociado con estos motores es tan complejo como el utilizado en motores asíncronos, además presentan las mismas desventajas que los motores de corriente directa de imanes permanentes: pérdida del control del campo y limitada capacidad de sobrecarga.

Motor de reluctancia variable. Este es el menos conocido de los motores, combina las ventajas de los motores asíncronos en el arranque y del síncrono en operación de velocidad constante. Es tan robusto como el motor asíncrono y puede tener una densidad de potencia superior, sin embargo puede ser más ruidoso.

I.4.2 Baterías

Es la forma de almacenamiento de energía en los automóviles eléctricos. El principio básico de funcionamiento se basa en la producción de energía eléctrica por medio de reacciones químicas de oxidación-reducción que se dan en su interior. Existen muchos tipos de baterías en función del tipo de par electroquímico utilizado, las más conocidas son las baterías de ácido-plomo, que constan de una serie de acumuladores convencionales que es donde se produce la corriente, puestos en serie para dar la tensión necesaria.



Figura I. 7: Baterías de Ácido-Plomo

Los acumuladores convencionales están compuestos por dos electrodos inmersos en un baño electrolítico, donde se producen las reacciones. Las baterías que actualmente están implantadas en el mercado son las ácido sulfúrico-plomo aunque no son las más idóneas por sus características para su uso en automóviles eléctricos, son las más utilizadas por su producción masiva que hace que se abaraten los costos en gran medida. Dentro del gran abanico de diversos pares electroquímicos que existen en la actualidad destacan por sus propiedades las de Ni-Cd, Ni-HM y Li-ION.

1.4.3 Unidad de Control y Etapa de Potencia

La misión primordial de la unidad de control es la regulación de la velocidad así como la administración de los recursos disponibles. La unidad de control tiene por misión analizar las señales que le llegan de los diferentes sensores y mandos del automóvil y decide en función de éstas, las órdenes que debe suministrar al motor para obtener la respuesta requerida. La unidad de control es bastante compleja y suele estar formada por una serie de componentes electrónicos destinados a tal fin cuando ésta es de tipo analógica, sin embargo, actualmente se prefiere el control digital debido a que un microcontrolador sustituye la necesidad de tantos componentes electrónicos y éste requiere ser programado para cumplir con las funciones que se desean.

En la etapa de potencia se realiza la conversión de las señales generadas en la unidad de control, en señales ajustadas a través de transistores de potencia que están a su vez alimentados por la batería.



Figura I.8: Controlador de uso comercial

La complejidad de la unidad de control, tanto analógico como digital, va a depender de las funciones que se le atribuyan y del tipo de motorización utilizado, así podemos realizar una primera subdivisión entre el control para motores de corriente directa y el control para motores de corriente alterna.

1.4.4 Sistema de Frenado

El factor crítico en un automóvil es el aprovechamiento de la energía disponible, ya que este tipo de automóviles tiene limitada su autonomía precisamente por la cantidad de energía capaz de transportar. Es por ello que la energía cinética sobrante que se produce durante el movimiento, en vez de perderse en forma de energía disipada en los frenos del vehículo podría ser recuperada si se incluye en el conjunto un sistema de freno regenerativo.

Este tipo de frenado se basa en la reversibilidad de cualquier máquina eléctrica, pudiéndose utilizar como generador para recargar las baterías. Ello supone el aumento de la autonomía del vehículo y de la vida de las baterías, pudiéndose llegar hasta ahorros del 40% en el consumo al recargar las baterías, dependiendo por supuesto del trayecto o tipo de conducción efectuada.



Figura I.9: Freno regenerativo

Aún con todo, no se puede eliminar el frenado mecánico, puesto que el frenado regenerativo tiene algunas limitaciones, ya que al ser el par de frenado proporcional a la velocidad de giro, para pequeñas velocidades el par es insuficiente y no es capaz de detener el vehículo hasta conseguir el paro total.

1.4.5 Sistema de Alimentación

La alimentación o recarga de un automóvil eléctrico se realiza a través de los cargadores, los cuales toman la energía de la red disponible y la transmiten a la batería. Para ello es necesario rectificar la corriente alterna.

Los tipos de cargadores son actualmente tres: el cargador a bordo, que está dispuesto dentro del vehículo y sólo es necesario el cable y una toma de corriente doméstica; el cargador externo, que está dispuesto fuera del vehículo, por lo que es necesario contar con las instalaciones adecuadas que dispongan de este servicio; y el cargador de inducción, en donde parte del cargador está dentro del vehículo y otra parte está fuera. De estos el más ligero de todos es el segundo, puesto que toda la instalación necesaria se encuentra exterior

al vehículo y el más pesado es el primero, aunque éste también es el único que no necesita de instalaciones especiales para realizar la recarga.



Figura I.10: Cargador a bordo

CAPÍTULO II: MICROCONTROLADORES

- II.1 Introducción
- II.2 Microcontroladores
- II.3 Tipos de Microcontroladores

II.1 Introducción.

Existen dos tecnologías para desarrollar un sistema de control: analógica y digital.

Hasta los 90's la mayoría de los sistemas de control empleados eran analógicos pero resultaban voluminosos, complejos y demasiado laboriosos para su diseño y mantenimiento.

Actualmente los sistemas de control son desarrollados con tecnología digital debido a que su diseño resulta más sencillo y económico. Además la mayoría de los diseños de control recientes son desarrollados con el uso de microcontroladores debido a la gran versatilidad en las posibilidades de control a través de la programación de distintos algoritmos.

En el presente trabajo se tomó la decisión de considerar un microcontrolador aprovechando dicha ventaja mencionada en el párrafo anterior, es decir, una vez desarrollado el algoritmo sencillo del diferencial electrónico, dejar abierta la posibilidad de programar un algoritmo que cumpla con las leyes de viraje para obtener la eficiencia deseada.

Examinaremos en este capítulo, algunas familias de microcontroladores diseñadas y producidas por: Intel Corp., Motorola Inc. y Texas Instrument Inc., las cuales son unas de las familias más utilizadas en aplicaciones de control. Sus estructuras y características nos dan un buen panorama de los rasgos y diseños típicos que presentan los microcontroladores disponibles que pueden ser utilizados para el control de los sistemas de electrónica de potencia.



Figura II.1: Diversos tipos de microcontroladores y sus accesorios

II.2 Microcontroladores

Los microprocesadores son dispositivos orientados específicamente para procesar información de manera rápida y eficiente, en cambio los microcontroladores son dispositivos orientados específicamente para controlar diversos sistemas que requieran tareas específicas. Estos dispositivos contienen, típicamente, una unidad central de procesamiento y sus unidades periféricas que se requieren para la operación en tiempo real como son: sistemas de timers programables, convertidores A/D, controlador de interruptores, entradas y salidas (I/O) digitales o con opción a moduladores de ancho de pulso (PWM), etcétera.

A continuación definiremos, de manera general, cada uno de los elementos principales que componen a un microprocesador:

II.2.1 Arquitectura

Un microcontrolador está caracterizado por su arquitectura y su set de instrucciones; la mayoría ellos de uso general, utilizan la arquitectura Von Neumann en la cual la información y las instrucciones están almacenadas en la misma memoria y se desplazan por el mismo bus. Un microprocesador típico de 8-bit contiene: contador de programa (PC), memoria interna en el CPU, registros generales, registrador de instrucciones y una unidad de control como se muestra en la figura 1. Esta arquitectura representa la estructura básica de un CPU convencional.

La arquitectura de los microcontroladores de 16-bit y 32-bit es más compleja y puede contener unidades adicionales para funciones avanzadas, tales como: archivo de registros, memoria caché, controlador de acceso directo de memoria (DMA), por mencionar algunos.

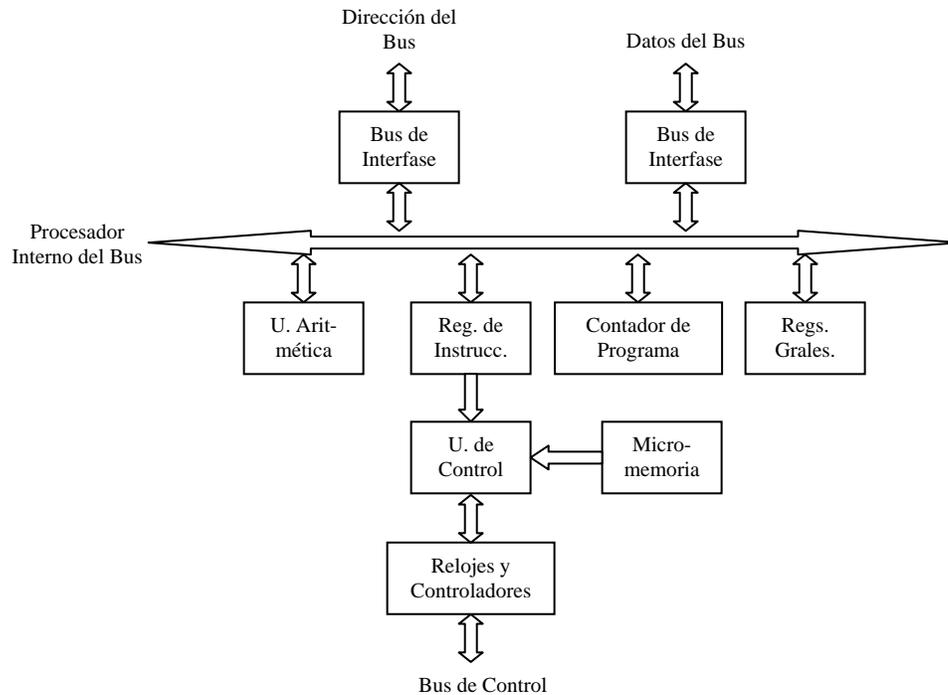


Figura II.2: Arquitectura básica de un microprocesador

II.2.2 Set de Instrucciones

El set de instrucciones de un microcontrolador está relacionado con su arquitectura interna. Existen dos grandes tipos de microcontroladores: los que tienen procesadores de cómputo complejo del set de instrucciones (CISC) y los que tienen procesadores de cómputo reducido del set de instrucciones (RISC).

Los microcontroladores CISC se llaman así por el gran número de instrucciones que pueden ejecutar. El set de instrucciones de un microcontrolador CISC puede manejar operaciones básicas y funciones complejas. Típicamente, las instrucciones son microcodificadas y pueden llevarse muchos ciclos de reloj para completarse.

La arquitectura RISC es utilizada recientemente en microcontroladores de 32-bit y 64-bit. Estos microcontroladores están caracterizados por un largo set de registros y un pequeño set de instrucciones que contienen frecuentemente instrucciones sencillas que pueden ser ejecutadas en un ciclo de reloj. Las operaciones complejas deben ser implementadas en software usando secuencias de instrucciones sencillas.

Un microcontrolador de 8-bit incluye en su set de instrucciones los siguientes grupos básicos de instrucciones:

- Instrucciones de acumulador y memoria (cargas, descargas y transferencias; operaciones aritméticas; multiplicación y división; operaciones lógicas; pruebas de datos y manipulación de bits; cambios y rotaciones).
- Registro de instrucciones stack e indexado.
- Registro de instrucciones de condición de código.
- Instrucciones de control programables (brincos, saltos, llamado de subrutinas y retorno, manejo de interrupciones).
- Miscelania (NOP, STOP, TEST).

Los modos de direccionamiento en un microcontrolador de 8-bit son numerosos e incluyen direccionamiento inmediato, directo, indirecto, registrado, indexado e inherente.

Los sets de instrucciones de los microcontroladores de 16-bit y 32-bit son aún más complejos debido a las sofisticadas operaciones adicionales que pueden manejar. Por ejemplo, los microcontroladores de 16-bit Motorola (familia M68HC16) tienen un cierto número de instrucciones especiales diseñadas específicamente para el procesamiento digital de señales.

II.2.3 Memoria

La tecnología de memoria compacta se ha desarrollado rápidamente en la última década debido al incremento en la demanda y a su desempeño. Existen ahora varios tipos de dispositivos de memoria que se pueden clasificar en dos grandes familias: memorias volátiles y no volátiles. Las memorias volátiles retienen datos sólo cuando están energizados y se pierden cuando la energía se quita. Las memorias no volátiles retienen datos indefinidamente o durante un largo tiempo después de que la energía se quitó.

Las memorias de chip disponibles en la actualidad son usualmente clasificadas siguiendo sus funciones como se detalla en seguida:

- La memoria de búsqueda aleatoria (RAM) es una memoria volátil que es utilizada para almacenar datos variables y temporales. La RAM en chips son memorias de lectura-escritura y se clasifican en RAM estáticas y RAM dinámicas, dependiendo del método utilizado para almacenar.
 - Las memorias RAM estáticas (SRAM) almacenan la información en arreglos de registros contruidos con flip-flops. La memoria SRAM mantiene la información durante el tiempo que el circuito esté alimentado. La densidad de la memoria SRAM es relativamente baja así que la capacidad disponible de los chips es pequeña. Por otra parte, el tiempo de acceso en la memoria SRAM es muy corto. El tiempo de acceso típico de las memorias SRAM es de 8 ns. Las principales aplicaciones de las memorias SRAM son memoria caché y video RAM.
 - Las memorias RAM dinámicas (DRAM) almacenan la información como cargas eléctricas en capacitores por lo que se requiere refrescar

periódicamente para mantener la información válida. La densidad de la memoria DRAM es muy elevada debido al pequeño número de dispositivos por celda de memoria. Los chips con memoria DRAM están disponibles con grandes capacidades (arriba de 16 Mbits). El tiempo de acceso de la memoria DRAM es más grande que el de la memoria SRAM. Los valores típicos están en el rango de 20-100 ns. Las principales aplicaciones de las memorias DRAM son memorias principales de las microcomputadoras.

- Memoria de sólo-lectura (ROM) es programada por los fabricantes de los circuitos por medio de máscaras. Las memorias ROM son utilizadas para almacenar instrucciones de aplicación para programas en una versión definida. También son utilizadas para almacenar información permanente tales como códigos de conversión, tablas de búsqueda y otras.
- Memoria programable de sólo-lectura (PROM) es un tipo de memoria ROM que puede ser programada por el usuario. Una memoria PROM contiene un arreglo de fusibles conectados con compuertas lógicas. La información se escribe al quemar la liga de fusibles seleccionados previamente. La programación de las memorias PROM se realiza con la ayuda de un dispositivo especial.
- Memoria programable de sólo-lectura con opción a borrado (EPROM) es un tipo de memoria ROM que puede ser reprogramada un determinado número de veces. Las memorias EPROM almacenan la información por medio de cargas eléctricas en un arreglo de dispositivos de compuertas flotantes. La información antes programada puede ser borrada al exponer el circuito a luz ultravioleta a través de un vidrio transparente en el empaque. Las memorias EPROM deben ser removidas por el sistema y borradas antes de reprogramarlas. Las memorias EPROM son típicamente utilizadas para programar y almacenar información durante la fase de desarrollo de un microprocesador basado en este sistema.
- Memoria programable de sólo-lectura con opción a borrado rápido (Flash EPROM) es un tipo especial de memoria EPROM con un mecanismo de borrado-rápido. La información antes programada puede ser borrada en línea utilizando cortos pulsos eléctricos. Las memorias Flash EPROM deben ser reprogramadas por bloques. Típicamente son utilizadas como dispositivos de almacenamiento masivo (disco de estado sólido).
- Memoria programable de sólo-lectura con opción a borrado eléctrico (EEPROM) es un tipo de memoria EPROM en el cual cada byte puede ser borrado y reprogramado por medio de pulsos eléctricos. Estas memorias EEPROM pueden ser reprogramadas en línea bajo un software de control que permita la adaptación del software de control.

II.2.4 Entrada-Salida (I/O)

Dependiendo de la arquitectura del procesador y de la aplicación que se requiera, la transferencia de la información entre la microcomputadora y el mundo externo puede realizarse por medio de tres métodos:

1. I/O Programadas. En las I/O programadas, las operaciones de entrada-salida son realizadas por medio de instrucciones especiales usando un espacio direccionado que se encuentra separado del espacio direccionado de la memoria. Se requieren señales de control I/O especiales. Las instrucciones especiales son típicamente salidas y entradas que transfieren información del CPU a los dispositivos I/O y viceversa. La figura 2a muestra un esquema básico de I/O programada.
2. I/O de Memoria-mapeada. En la I/O de memoria-mapeada, los dispositivos de I/O residen en la misma dirección que la memoria y se presenta al CPU como unas localidades de memoria. Las operaciones de entrada-salida son realizadas usando todas las instrucciones relacionadas de memoria. La figura 2b muestra un esquema básico de I/O de memoria-mapeada.

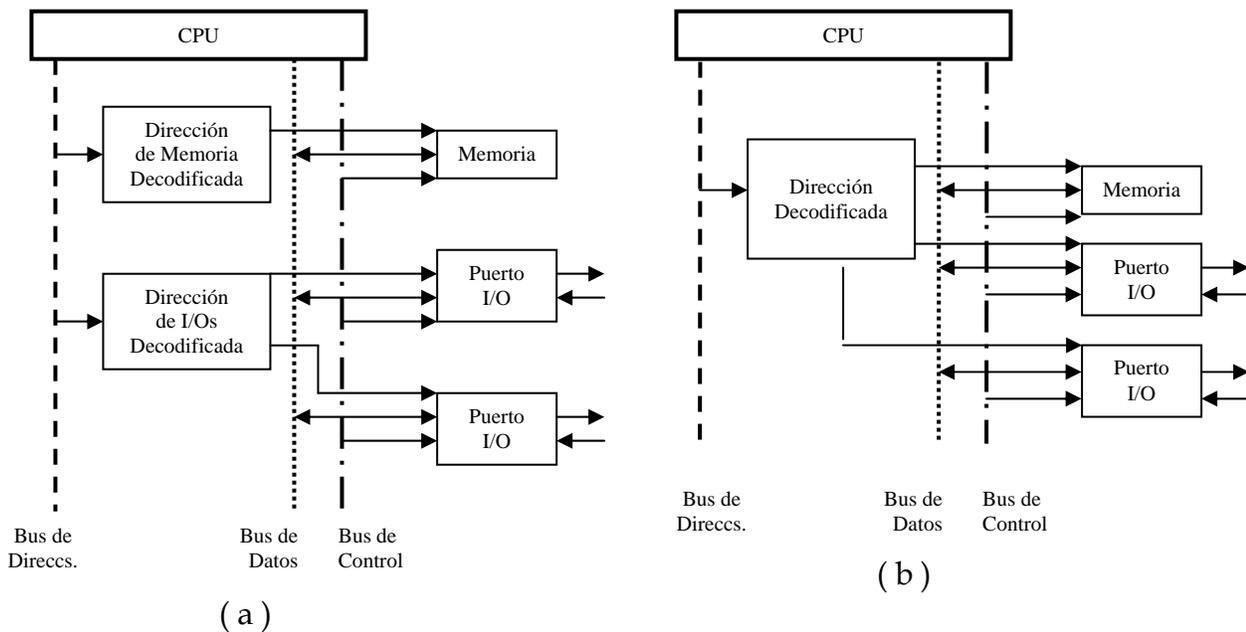


Figura II.3: Dos esquemas de I/Os: (a) Programable; (b) Memoria-Mapeada

3. Acceso directo a memoria (DMA). En operaciones I/O normales, la transferencia de información se efectúa bajo el control del CPU como se ilustra en la figura 3a. Este modo ocupa al CPU durante la transferencia y es requerido para transferir pequeñas cantidades de información. En dado caso que se vaya a transferir una gran cantidad de información, el tiempo de transferencia puede ser reducida al dar acceso a los

dispositivos de memoria I/O de la microcomputadora. Mientras la transferencia se realice directamente entre la memoria y los dispositivos I/O, la capacidad de transferencia puede ser incrementado. Se requiere de un dispositivo especial llamado controlador DMA para el control de la transferencia. Durante la transferencia, el CPU puede ejecutar otras tareas que no requieren acceso a la memoria. El principio de operación de la DMA se ilustra en la figura 3b.

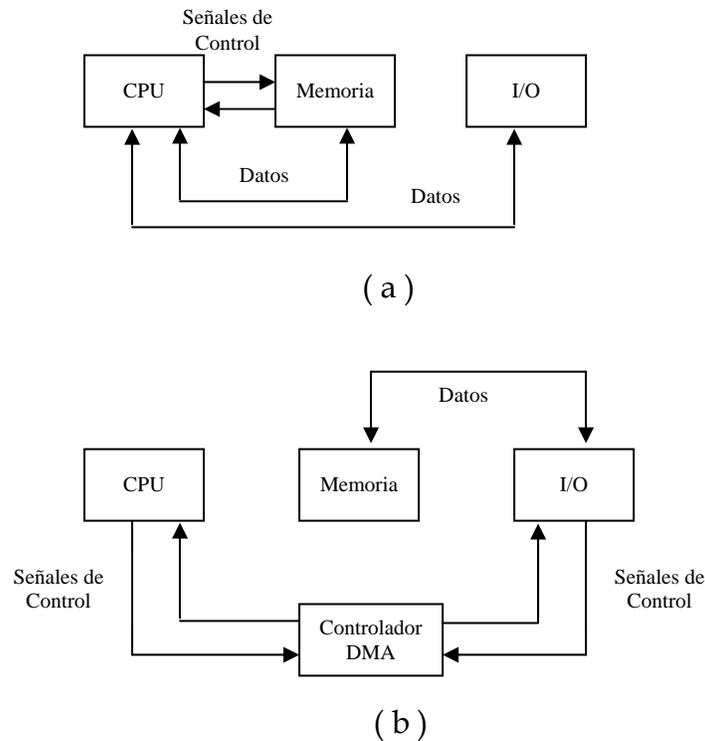


Figura II.4: Dos modalidades I/Os para ruta de datos:(a) transferencia del controlador del CPU; (b) transferencia del DMA

II.3 Tipos de Microcontroladores

III.3.1 Microcontroladores Intel

Los microcontroladores producidos por Intel Corporation para aplicaciones de control están agrupados en tres principales familias: MCS-51, MCS-96 e i960. Cada familia consiste de varios modelos (o versiones) que tienen diferentes dispositivos periféricos internos y se encuentran disponibles en varios formatos de empaques para una mejor protección en aplicaciones específicas.

La familia MCS-51 está basada en un microprocesador CISC de 8-bit. Dentro de los dispositivos periféricos internos incluye: memorias RAM y ROM, puertos seriales (asíncronos) y timers. La figura 4 muestra el diagrama de bloques general de un microcontrolador MCS-51.

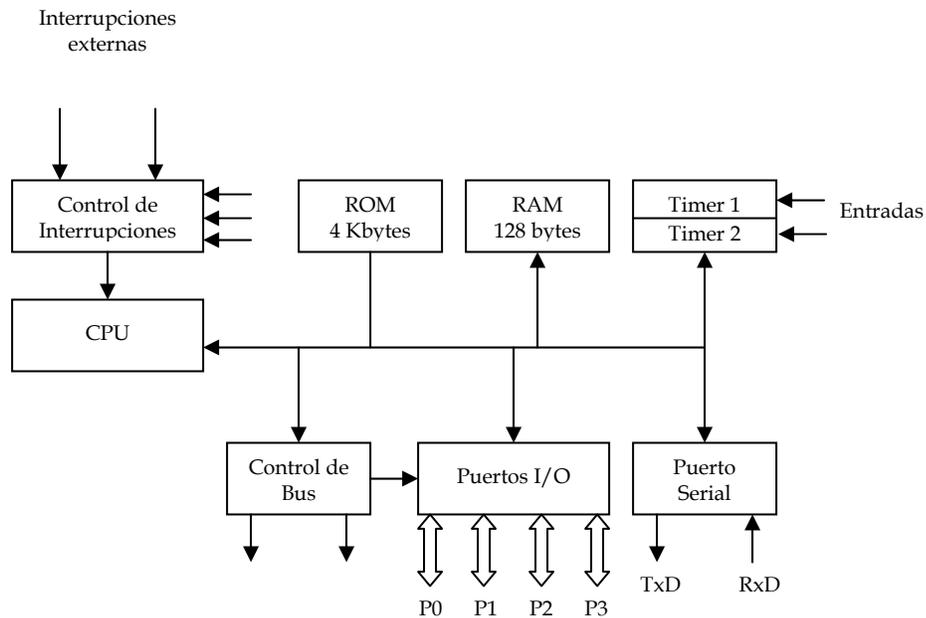


Figura II.5: Diagrama de bloques del microcontrolador Intel MCS-51

La familia MCS-96 está basada en un microcontrolador CISC de 16-bit con un gran archivo de registros para mejorar la velocidad de ejecución. Este microcontrolador contiene varios dispositivos periféricos internos: ROM (o EPROM), puerto serial (UART), alta velocidad en I/O, timers y PWM de 8-bit. La figura 5 muestra el diagrama de bloques general de un microcontrolador MCS-96.

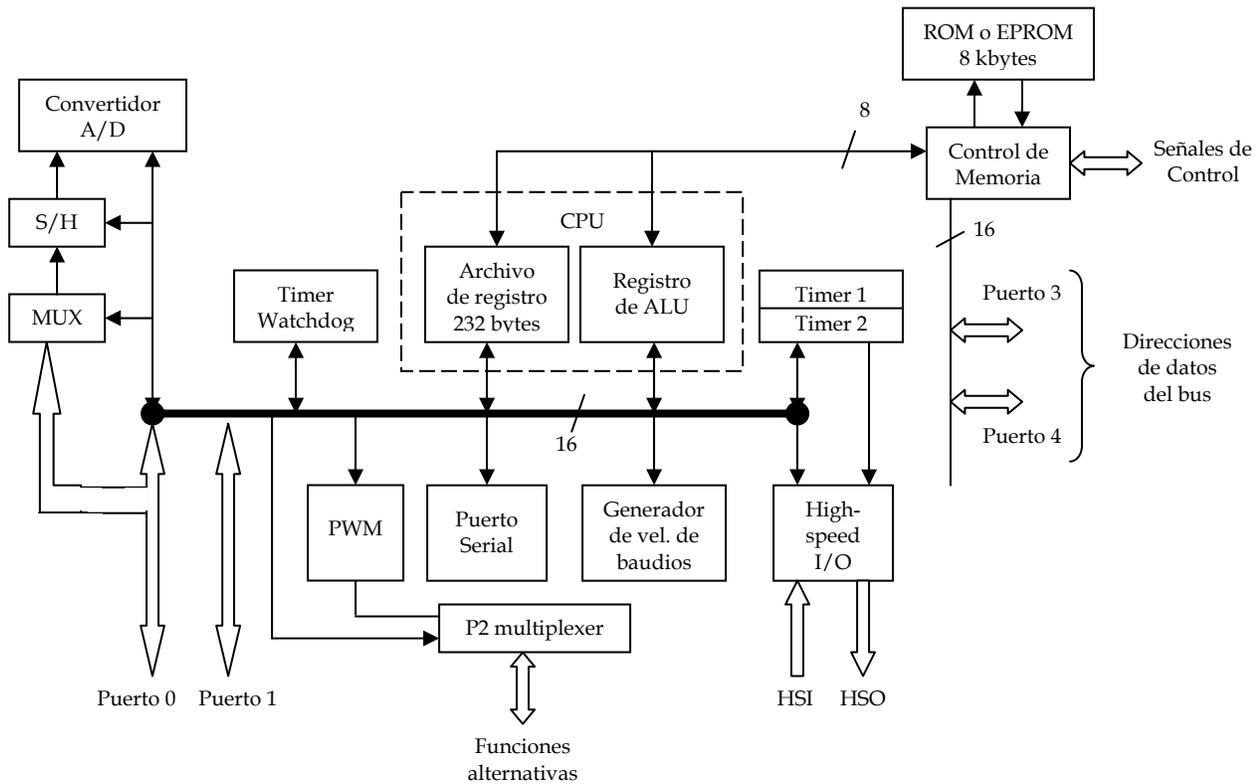


Figura II.6: Diagrama de bloques del microcontrolador Intel MCS-96

La familia i960 implementa una arquitectura RISC de 32-bit con un coprocesador interno de punto flotante. El microprocesador i960 utiliza un núcleo superescalar altamente paralelo con un instructor caché interno para uso frecuente de instrucciones de 4 kbyte e información caché de 1 kbyte para constantes y otros datos de uso frecuente. La tabla II.1 muestra las características clave de cada una de las familias de microcontroladores ofrecidas por Intel Corporation.

Tabla II.1: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Intel

Microprocesador	Familia MCS-51	Familia MCS-96	Familia i960
Arquitectura	CISC	CISC	RISC
Ancho del bus de datos	8 bits	16 bits	32 bits
Espacio direcciones	64 kbytes	64 kbytes	4 Gbytes
Memoria	128-256 bytes RAM 4-16 kbytes ROM 4-16 kbytes EPROM	Arriba de 8 kbytes EPROM	
Registros	26 de uso general	232-byte archivos de registro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 16 globales, 32-bit ▪ 16 locales, 32-bit
Capacidad de punto flotante			<ul style="list-style-type: none"> ▪ IEEE formato 74 ▪ 4 registros 80-bit
Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 6-19 fuentes ▪ 5-11 vectores ▪ 2 niveles de prioridad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 28 fuentes ▪ 16 vectores 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 256 vectores ▪ 32 niveles de prioridad
Velocidad del bus	12 MHz	12 MHz	20 MHz
Timers	2 a 3, timers/contadores de 16-bit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 16-bit ▪ watchdog 16-bit ▪ contador con captura de 16-bit 	
A / D	8 canales, 8-bit A/D	8 canales, 10-bit A/D	
Salidas PWM		1 salida PWM	
Puertos I/O	4-7 bit	5-8 bit	
Puertos seriales	Duplex completo	Duplex completo	

II.3.2 Microcontroladores Motorola

Los microcontroladores producidos por Motorola Incorporation para aplicaciones de control también se dividen en tres principales familias: M68HC11, M68HC16 y M68830. Cada familia consiste de varios modelos (o versiones) que tienen diferentes dispositivos periféricos internos y se encuentran disponibles en varios formatos de empaques que se ajustan a diferentes tipos de aplicaciones.

La familia M68HC11 está basada en un microprocesador CISC de 8-bit. Este microcontrolador contiene una amplia variedad de dispositivos periféricos internos necesarios para el control embebido: RAM, ROM, EPROM, EEPROM, unidad de procesamiento de tiempo, interfaces de comunicación (síncrona y asíncrona) y un sistema de adquisición de datos. La figura 6 muestra el diagrama de bloques general de un microcontrolador M68HC11.

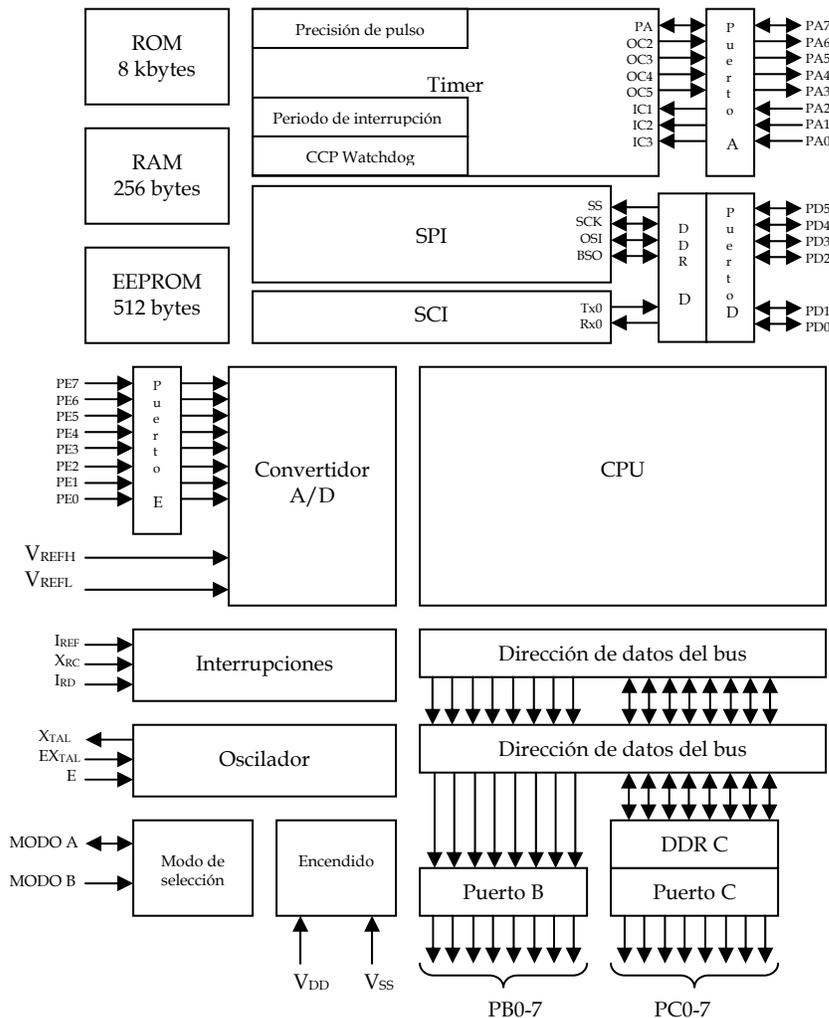


Figura II.7: Diagrama de bloques del microcontrolador Motorola M68HC11

La familia M68HC16 está basada en un microcontrolador CISC de 16-bit con instrucciones DSP. La arquitectura M68HC16 utiliza módulos incluyendo un CPU, memoria RAM, convertidor A/D de 10-bit, timers de propósito general y puertos de I/O. La figura 7 muestra el diagrama de bloques general de un microcontrolador M68HC16.

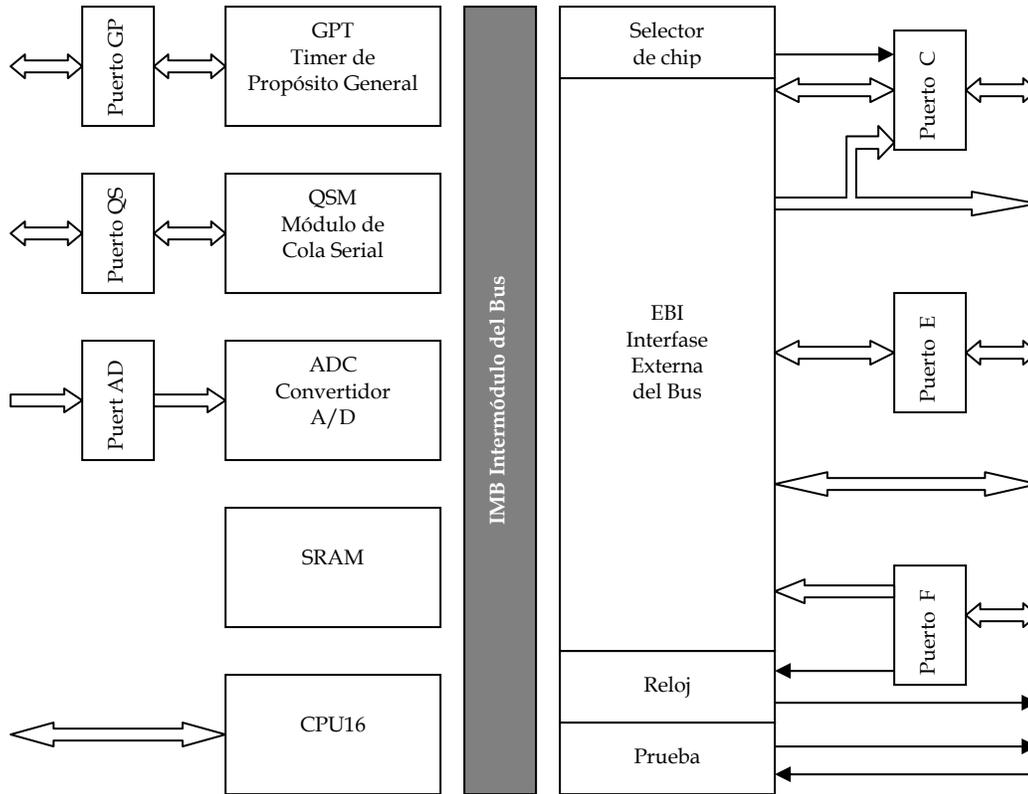


Figura II.8: Diagrama de bloques del microcontrolador Motorola M68HC16

La familia M68830 está basada en un microprocesador MC68000. La tabla II.2 muestra las características clave de cada una de las familias de microcontroladores ofrecidas por Motorola Incorporation.

Tabla II.2: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Motorola

Microprocesador	Familia 68HC11	Familia 68HC16	Familia M68830
Arquitectura	CISC	CISC con capacidad para DSP	CISC
Ancho del bus de datos	8 bits	16 bits	32 bits
Espacio direcciones	64 kbytes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 Mbytes en programación ▪ 1 Mbytes en datos 	16 Mbytes
Memoria	256 kbytes RAM 4-12 kbytes ROM 4 kbytes EPROM 512 kbytes EEPROM	1-2 kbytes SRAM 8-48 kbytes ROM	2-4 kbytes SRAM
Registros			<ul style="list-style-type: none"> ▪ 8 32-bit de datos ▪ 7 32-bit de direcciones
Capacidad de DSP		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Multiplicador-acumulado MAC/RMAC 	
Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 18 fuentes ▪ 20 vectores ▪ 17 niveles de prioridad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 52 vectores predefinidos ▪ 252 vectores definidos por el usuario ▪ 8 niveles de prioridad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 64 vectores predefinidos ▪ 192 vectores definidos por el usuario ▪ 8 niveles de prioridad
Velocidad del bus	2 MHz	16.8 MHz	16.8 MHz
Timers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 16-bit contador ▪ 3-4 capturas de entrada ▪ 4-5 comparadores de salida ▪ watchdog 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 16-bit contadores ▪ 3-4 capturas de entrada ▪ 4-5 comparadores de salida ▪ watchdog 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 16-bit contadores ▪ 3-4 capturas de entrada ▪ 4-5 comparadores de salida ▪ watchdog

A / D	8 canales, 8-bit A/D	8 canales, 10-bit A/D	8 canales, 10-bit A/D
Salidas PWM	Controlado por software	2 salidas PWM	2 salidas PWM
Puertos I/O	5 puertos de 8-bit	46-95 líneas	16-64 líneas
Puertos seriales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interfaz de comunicación ▪ Interfaz síncrona 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interfaz de comunicación ▪ Interfaz de cola 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interfaz de comunicación ▪ Interfaz de cola

III.3.3 Microcontroladores Texas Instrument

Los dispositivos MSP430 constituyen una familia de ultra-baja potencia que consumen menos de 400 μA en modo activo y están basadas en un microprocesador RISC de 16-bits. Su configuración interna está basada en una arquitectura memoria a memoria, un espacio común de direcciones para todos los bloques funcionales y un set de instrucciones reducido aplicable a todos los bloques funcionales como se muestra en la figura 8.

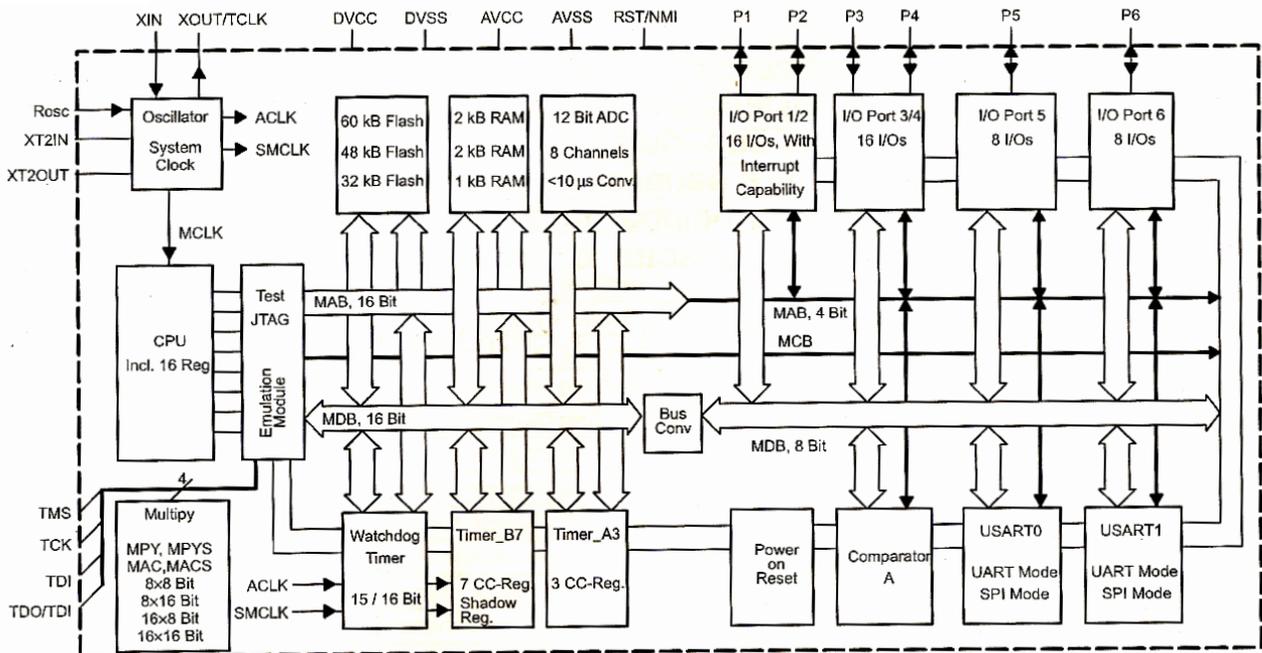


Figura II.9: Diagrama de bloques del microcontrolador Texas Instrument MSP430x14x

Este dispositivo fue el que elegí para desarrollar mi proyecto de tesis debido a dos razones de peso:

- La primera porque cubre las necesidades que requería para diseñar el controlador dual con diferencial electrónico para un vehículo eléctrico (principalmente las múltiples salidas PWM), y por contar con un simple y reducido set de instrucciones.
- Y la segunda debido a que la compañía Texas Instrument, una vez hecha la petición y evaluado el proyecto, donó amablemente al Instituto de Ingeniería el kit completo del microcontrolador, con la única condición que lo mencionara en la tesis.

La tabla II.3 muestra las características clave de cada una de las familias de microcontroladores ofrecidas por Texas Instrument Incorporation.

Tabla II.3: Características Clave de las Familias de Microcontroladores Texas Instrument

Microprocesador	Familia MSP430x1xx
Arquitectura	RISC de Ultra-baja potencia
Ancho del bus de datos	16 bits
Espacio direcciones	64 kbytes
Memoria	2 kbytes RAM 64 kbytes ROM (compartida con opción EPROM, FLASH y otros) 256 bytes Flash
Registros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 12 de propósito general ▪ 4 de propósito específico
Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 16 fuentes ▪ 32 vectores ▪ 15 niveles de prioridad
Velocidad del bus	8 MHz
Timers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 32 de 16-bit ▪ Watchdog
A / D	8 canales, 12-bit A/D
Salidas PWM	10 salidas PWM
Puertos I/O	6 puertos con 8 opciones c/u
Puertos seriales	2 USARTs

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL CONTROLADOR

III.1 Diseño del Controlador

III.2 Implementación y pruebas

III.1 Diseño del Controlador

El objetivo fue diseñar un controlador dual programable con diferencial electrónico, es decir, un dispositivo electrónico capaz de controlar dos motores eléctricos simultáneamente y que permita distribuir la potencia entre los motores de acuerdo a un programa establecido. Por otra parte, el diseño debe contemplar el monitoreo de voltaje del banco de baterías, corriente y temperatura en la etapa de potencia, y posición angular del volante, lo cual a su vez permita tomar decisiones cuando estas variables rebasen los límites permitidos.

Por lo tanto el diseño del controlador debe contemplar las siguientes entradas provenientes de:

- El acelerador.
- El banco de baterías.
- Posición angular del volante.
- La etapa de potencia (corriente y temperatura).

En el caso de la corriente y la temperatura son dobles debido a que se tendrán dos etapas de potencia, una por motor.

A partir del monitoreo de cada una de las señales de entrada, el controlador debe tener programado una subrutina que le permita tomar las decisiones indicadas cuando alguna señal salga de los parámetros establecidos.

En cuanto a la toma de decisiones a continuación las describo:

- Cuando el controlador detecte la señal proveniente del acelerador deberá generar un par de señales PWM proporcionales al nivel de voltaje recibido.
- Cuando el controlador detecte la señal proveniente del voltaje del banco de baterías deberá indicar si éste tiene el nivel mínimo para operar correctamente y en caso contrario, indicarlo e inhibir el sistema.
- Cuando el controlador detecte la señal proveniente de la posición angular del volante, deberá distribuir la potencia en las ruedas, es decir, modificar la señal PWM de cada motor de manera proporcional al viraje. Cabe resaltar que en los alcances de este

trabajo no se contempla programar un algoritmo complejo de control que cumpla alguna ley de viraje sino un algoritmo sencillo que permita ejemplificar y corroborar la función del diferencial electrónico.

- Cuando el controlador detecte las señales de corriente y temperatura de cada etapa de potencia deberá: para las señales de corriente, cuando rebasen el nivel permitido del consumo de corriente deberá indicarlo e impedir de manera inmediata que los motores continúen operando; y para las señales de temperatura, se considerarán tres estados: el estado normal en el cual únicamente debe estar monitoreando; el nivel de temperatura alta, cuando la temperatura incrementa y sobrepasa un nivel medio, deberá indicarlo y accionar un ventilador para enfriar la etapa de potencia; y el nivel de estado crítico, es decir, cuando la temperatura sobrepase el nivel alto deberá indicarlo, activar un ventilador y apagar la motores de inmediato.

Fue necesario hacer un diagrama de flujo (figura 1) para definir de manera clara y sencilla la estructura que el programa debía seguir en el microcontrolador. Dicho diagrama se muestra a continuación:

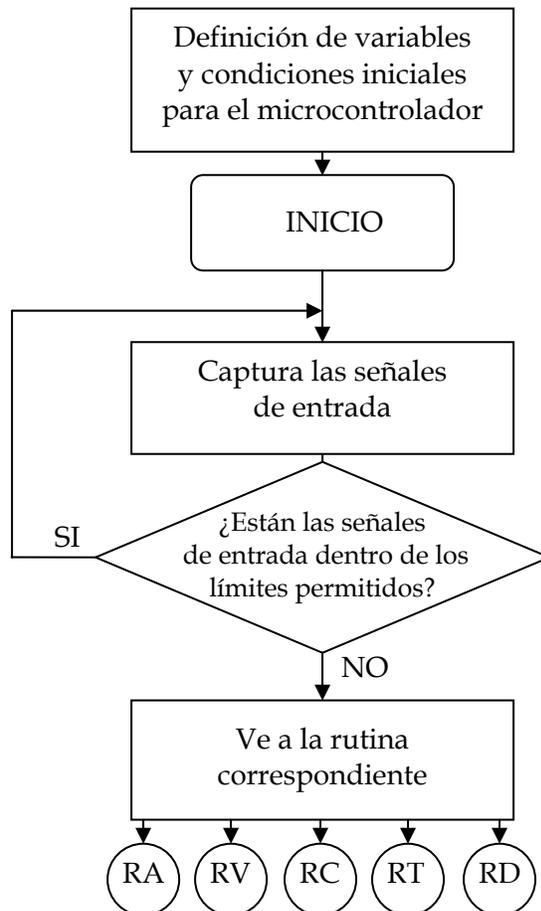


Figura III.1: Diagrama de flujo principal del programa del microcontrolador

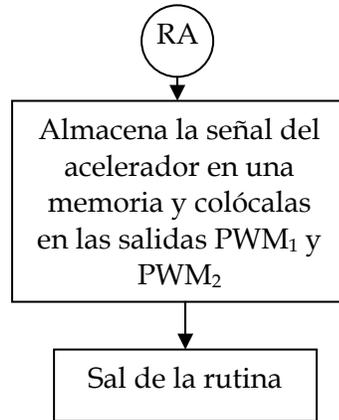


Figura III.2: Rutina de la señal proveniente del acelerador

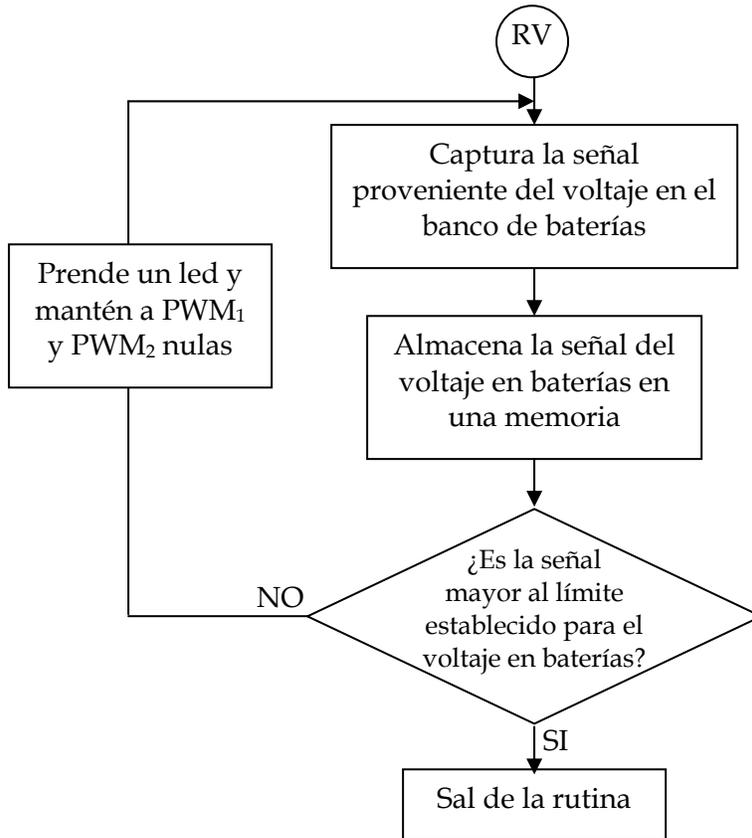


Figura III.3: Rutina de la señal proveniente del voltaje en el banco de baterías

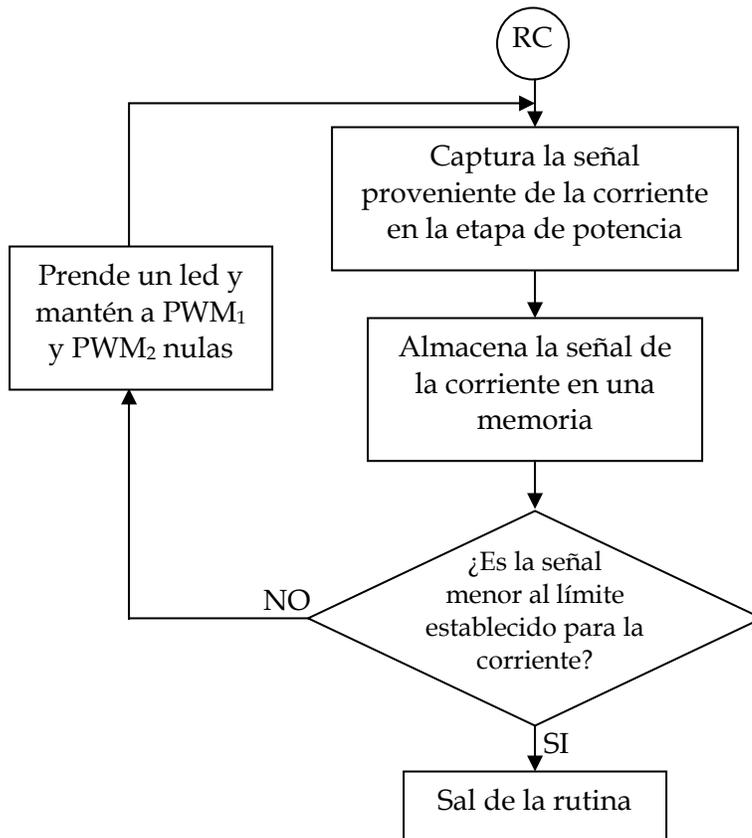


Figura III.4: Rutina de la señal proveniente de la corriente en la etapa de potencia

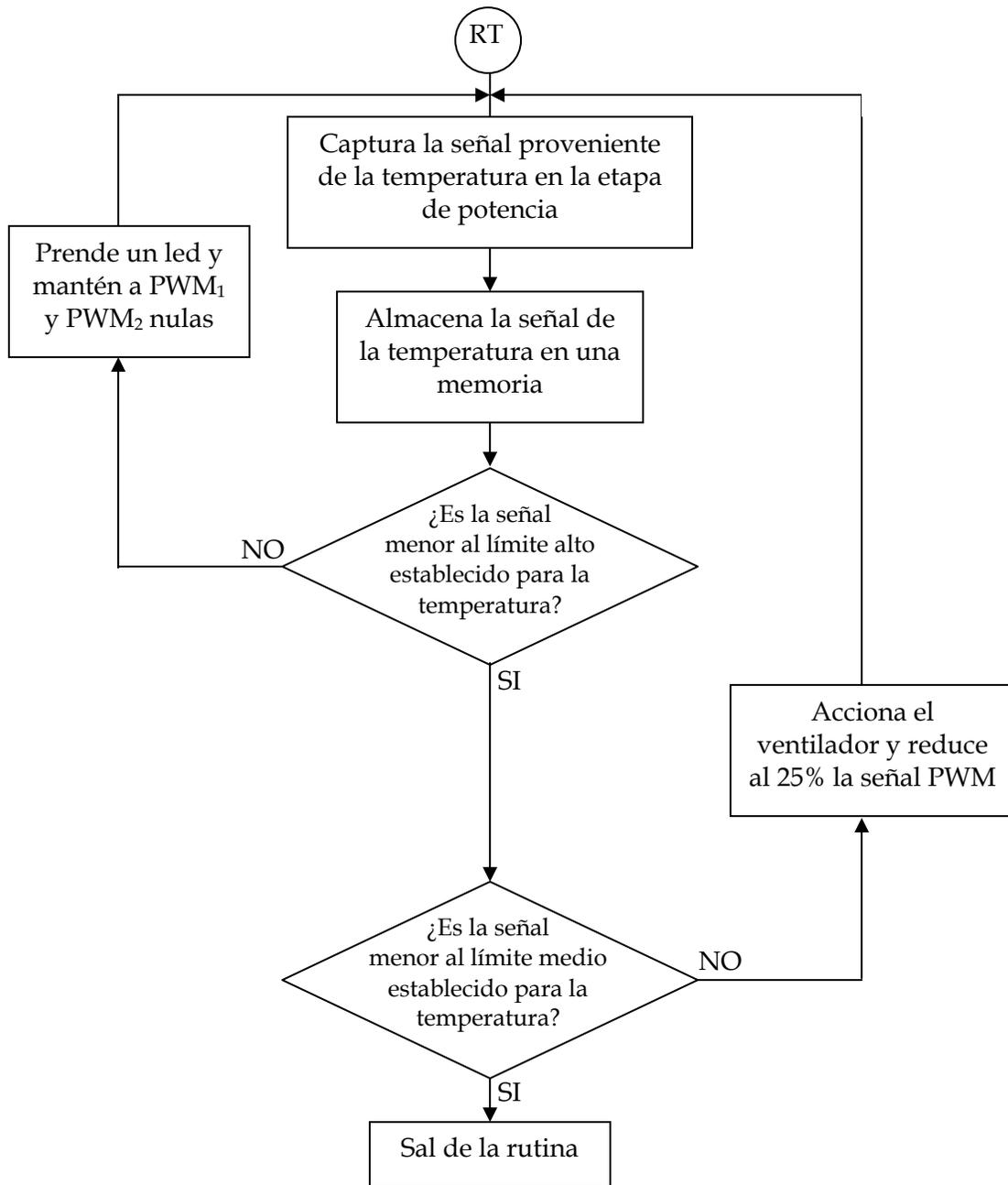


Figura III.5: Rutina de la señal proveniente de la temperatura en la etapa de potencia

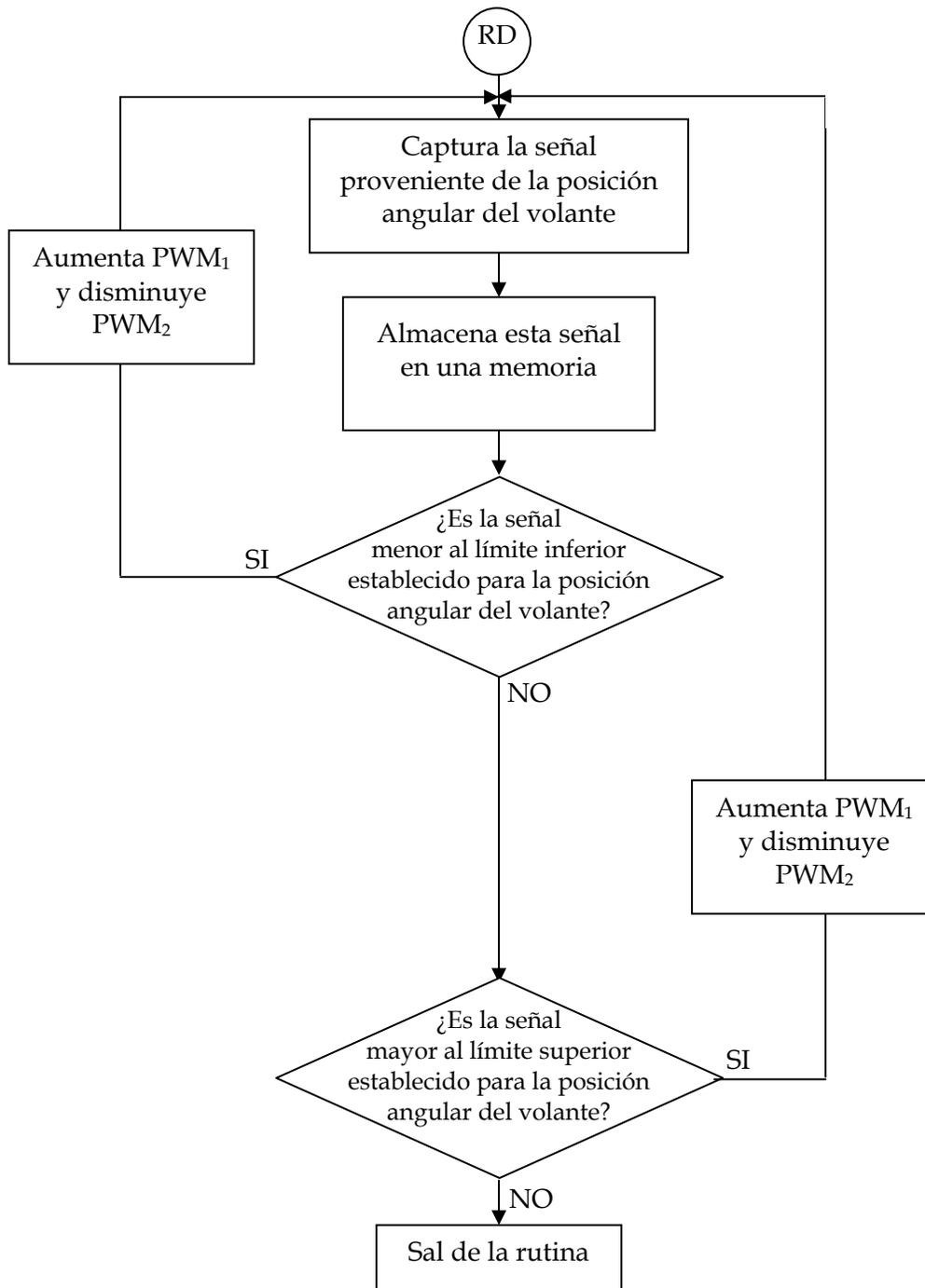


Figura III.6: Rutina de la señal proveniente de la posición angular del volante

Después de múltiples correcciones, modificaciones y precisiones el programa quedó estructurado como se muestra en el anexo A.

2. Implementación y pruebas

Al principio la manera en que verificaba que el microcontrolador realizara las funciones de acuerdo al programa de control era a través de un osciloscopio observando únicamente las señales de entrada/salida del microcontrolador. Después implementé un circuito sencillo de la etapa de potencia para controlar un par de ventiladores pequeños y con fuentes de voltaje externas emulé las señales de las variables de voltaje en baterías, corriente y temperatura en las etapas de potencia y la posición angular del volante para revisar en tiempo real el desempeño de todo el dispositivo, es decir, del microcontrolador y la etapa de potencia.

El diagrama de bloques de la figura 2 muestra de manera gráfica la relación que había entre los dispositivos para lograr lo que describo en el párrafo anterior.

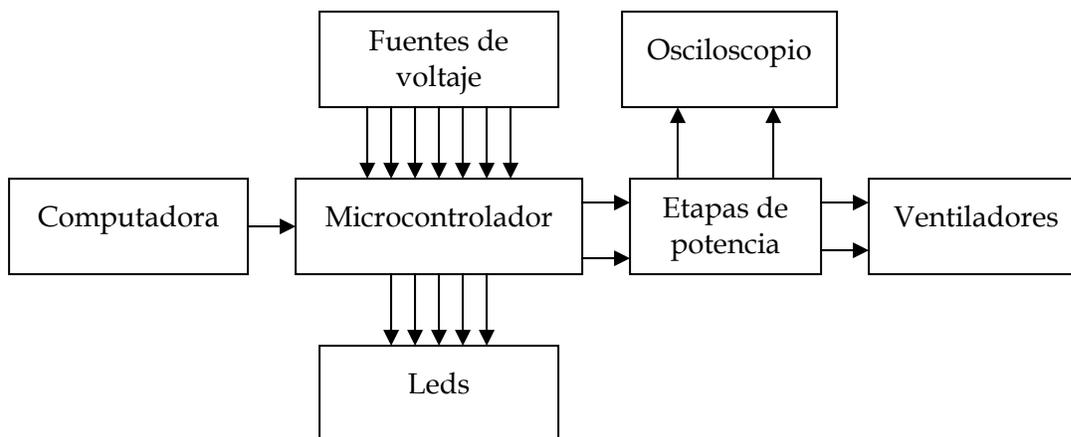


Figura III.7: Diagrama de bloques del sistema de control

La figura 3 es una fotografía que muestra la manera en que implementé los dispositivos para poder adquirir las pruebas necesarias para el desarrollo del controlador.



Figura III.8: Conexiones reales del sistema de control

En el diagrama eléctrico que se muestra en el anexo B, podemos observar como quedaron acoplados el microcontrolador, la etapa de potencia y los motores eléctricos con los valores de los circuitos eléctricos y salidas de los pines auténticos del diseño.

El microcontrolador MSP430F149 cuenta con un convertidor analógico-digital A/D el cual tiene un voltaje interno de referencia de 1.5 V que utilicé como referencia para cada una de las señales de entrada, por lo que cada una de ellas debe estar ajustada a este rango de nivel para su óptimo funcionamiento. La fórmula establecida para el controlador es:

$$N_{ADC} = 4095 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}}$$

Donde N_{ADC} es la palabra que registra el microcontrolador y V_{in} el voltaje de cualquier entrada. Podemos observar que cuando $V_{in} = 0$ el microcontrolador está recibiendo la palabra 000 en sistema hexagesimal y cuando el $V_{in} = 1.5$ V entonces $N_{ADC} = 4095$ que en sistema hexagesimal es FFF.

Una vez armado el controlador realicé una serie de pruebas al circuito, en las cuales monitoreé y capturé, con la ayuda de un osciloscopio digital *Tektronix* THS720A, las señales de entrada mencionadas anteriormente que en seguida describo:

a) Señales PWM

Las señales que se muestran en la figura III.9 provienen de la salida del microcontrolador y como podemos apreciar la amplitud del voltaje es pequeña, aproximadamente de 1.2 V. Para controlar la etapa de potencia es necesario amplificar estas señales y es conveniente aislarlas para protección del microcontrolador lo cual implementé con un optoacoplador y un transistor mostrados en el diagrama eléctrico (anexo B).

La figura III.10 muestra las señales PWMs en el drain de los mosfets con una carga resistiva sin aún estar conectados los motores; se puede observar que el voltaje aproximado de las señales es de 12 V y que su frecuencia promedio es de 12.8 kHz.

* V_{in} : Voltaje de entrada del potenciómetro del acelerador

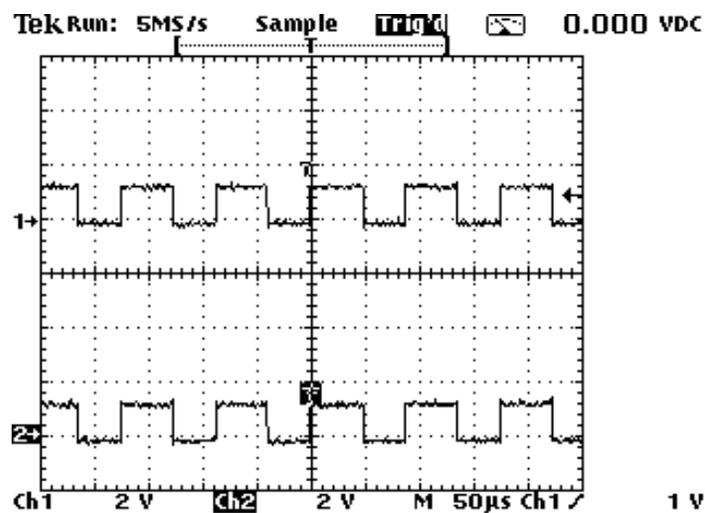


Figura III.9: Señales PWM del microcontrolador cuando $*V_{in} = 0.8 \text{ V}$

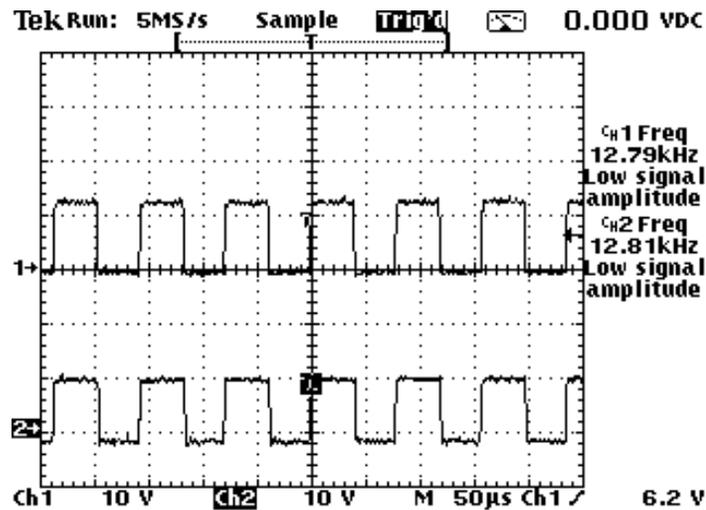


Figura III.10: señales PWMs en el drain de los mosfets cuando $V_{in} = 0.9 \text{ V}$

Las figuras III.11, III.12 y III.13 muestran las señales PWM correspondientes a tres distintas velocidades de giro de los motores, en ellas se pueden observar algunas perturbaciones en el apagado de los MOSFETs lo cual se puede mejorar al incluir un circuito de protección snubber para optimizar la potencia disipada en los MOSFETs. En este trabajo no se consideró implementarlo porque no era objetivo primordial desarrollar la etapa de potencia sino verificar que el controlador realizará las funciones programadas debidamente.

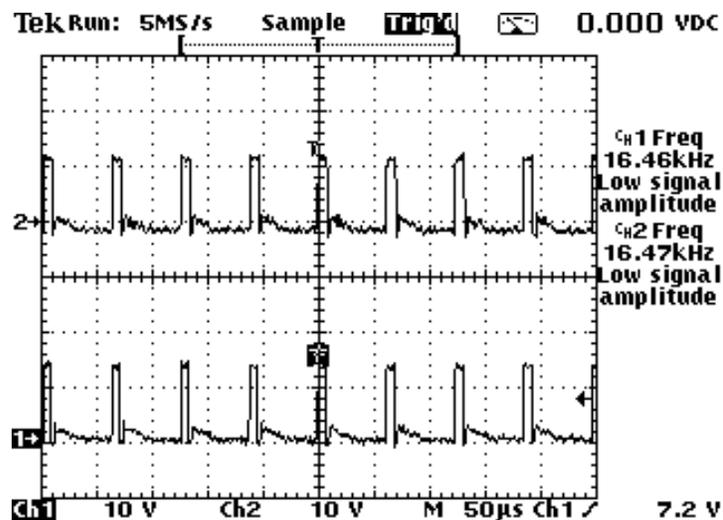


Figura III.11: señales PWM con motores girando a velocidad baja ($V_{in} = 0.2 \text{ V}$)

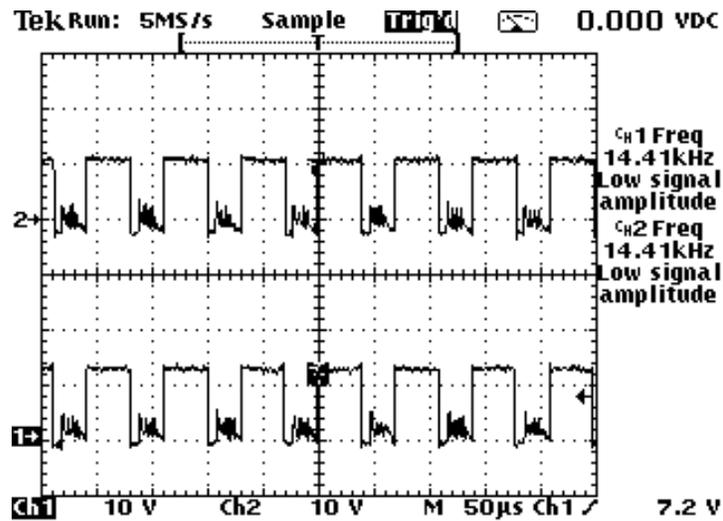


Figura III.12: señales PWM con motores girando a velocidad media ($V_{in} = 0.75 \text{ V}$)

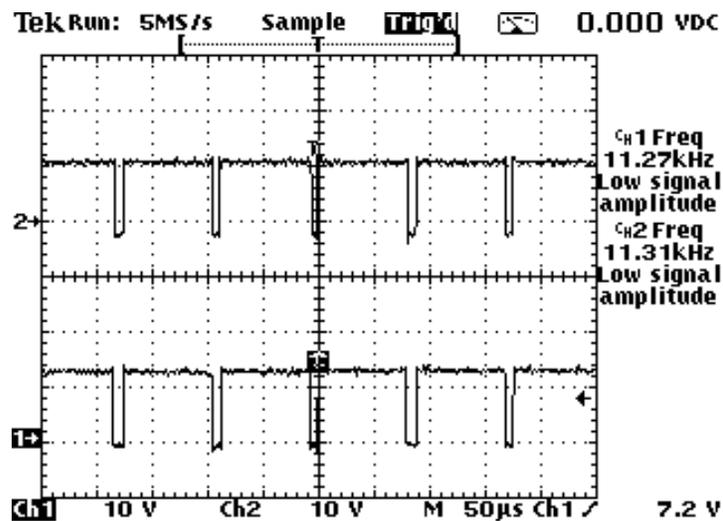


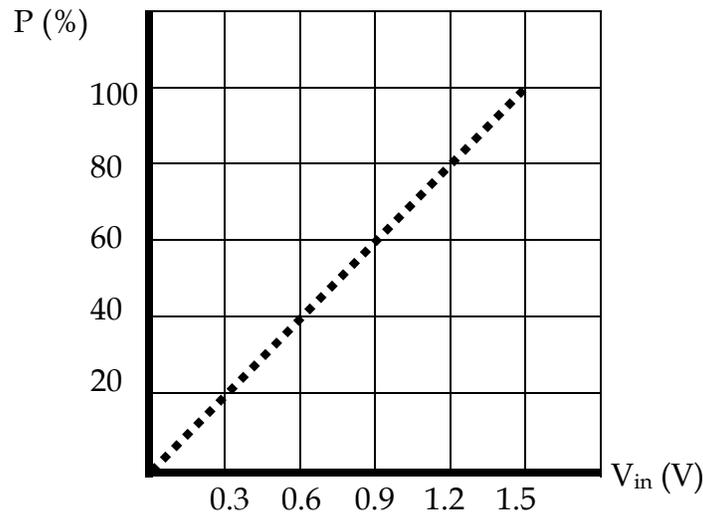
Figura III.13: señales PWM con motores girando a velocidad alta ($V_{in} = 1.3 \text{ V}$)

Podemos establecer una función lineal entre el voltaje de entrada V_{in} y el ancho de pulso (en porcentaje) P de la señal de salida, dicha relación quedaría establecida:

$$P_{1,2} = 100 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}}$$

En la cual la pendiente es el cociente entre el voltaje de entrada y el voltaje de referencia mientras que la variable independiente es el mismo voltaje de entrada, el ancho de pulso es la variable dependiente.

Y su gráfica quedaría definida:



b) Protecciones de corriente

En las figuras III.14 y III.15 se muestra cómo se anula la señal PWM de forma independiente en cada motor lo cual se logra cuando se detecta una sobrecorriente en la etapa de potencia correspondiente; para hacer notar la independencia que existe entre ambas señales de entrada obtenidas en cada una de las etapas de potencia, realicé las pruebas simulando la sobrecorriente primero en un motor y posteriormente en el otro, aunque en el diseño está configurado de manera conjunta.

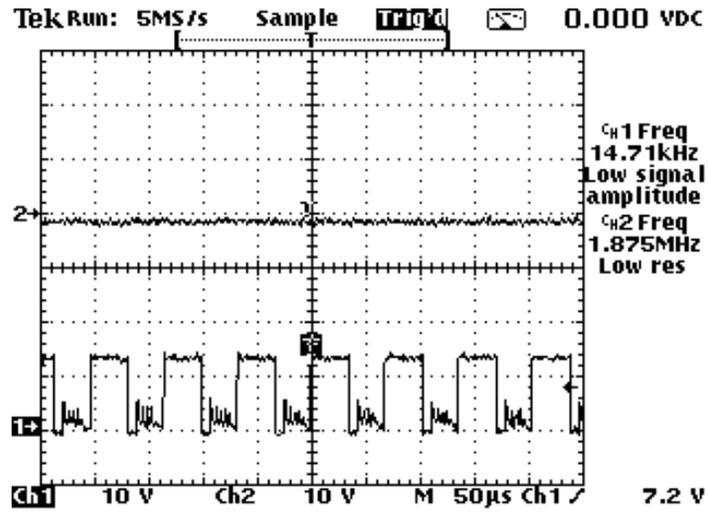


Figura III.14: Señal PWM del segundo motor anulada por sobrecorriente ($*V_I = 1.1$ V)

* V_I : Voltaje de entrada del sensor corriente

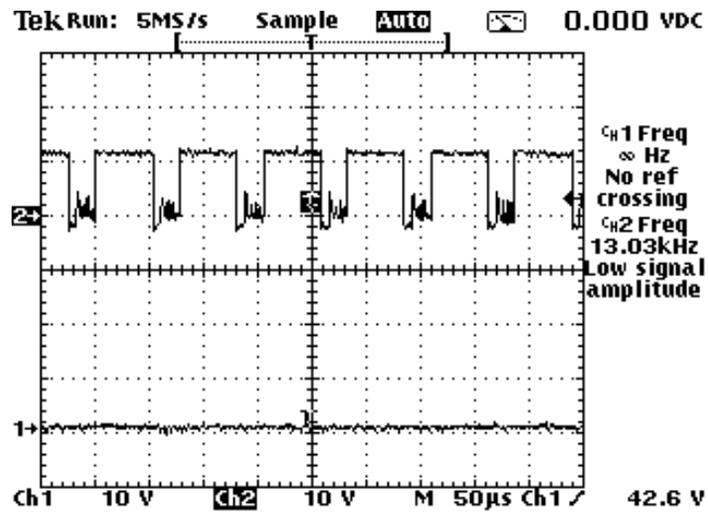


Figura III.15: Señal PWM del primer motor anulada por sobrecorriente ($V_I = 1.1$ V)

El nivel de corriente máxima permitida se estableció, por diseño, con un valor de $V_I = 1 \text{ V}$, que corresponde a un valor correspondiente en la variable a $I_{m1} = AF7$.

Podemos expresar una función condicionante que relaciona el voltaje de entrada, el voltaje de entrada de la corriente y las señales PWM de salida de la siguiente manera:

$$P_{1,2} = \begin{cases} 100 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}} & ; V_I \leq 1 \text{ V} \\ 0 & ; V_I > 1 \text{ V} \end{cases}$$

c) Protecciones de temperatura

Las figuras III.16 y III.17 muestran cómo el controlador reduce el ancho de pulso de la señal PWM cuando el sistema detecta que la temperatura de la etapa de potencia rebasa el nivel medio y, al mismo tiempo, acciona un ventilador lo cual podemos comprobar analizando la rutina de protección de temperatura del programa del anexo A; en el nivel alto, anula las señales PWMs, deja accionado el ventilador y prende un led para indicar que la etapa de potencia se sobrecalentó.

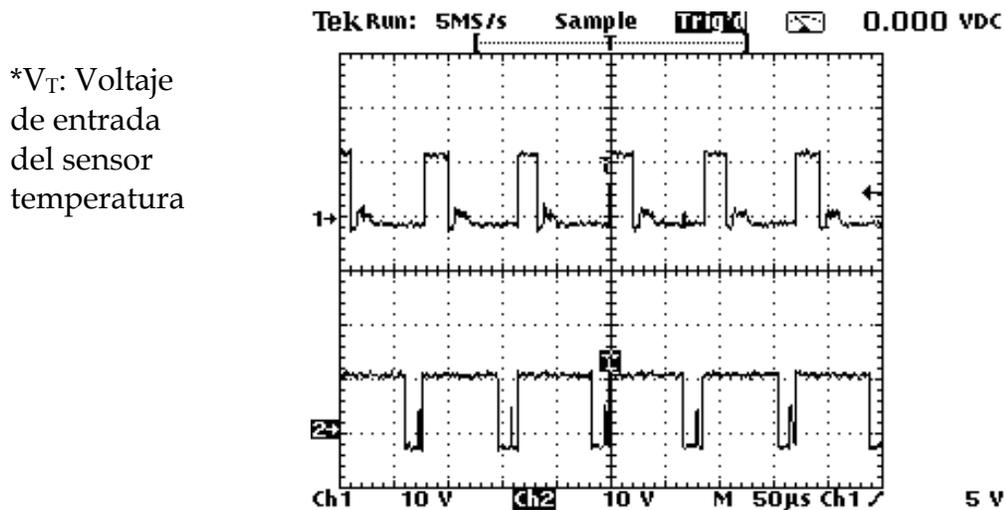


Figura III.16: señal PWM del primer motor reducida en su ancho de pulso ($*V_T = 0.9 \text{ V}$ y $V_{in} = 1.2 \text{ V}$)

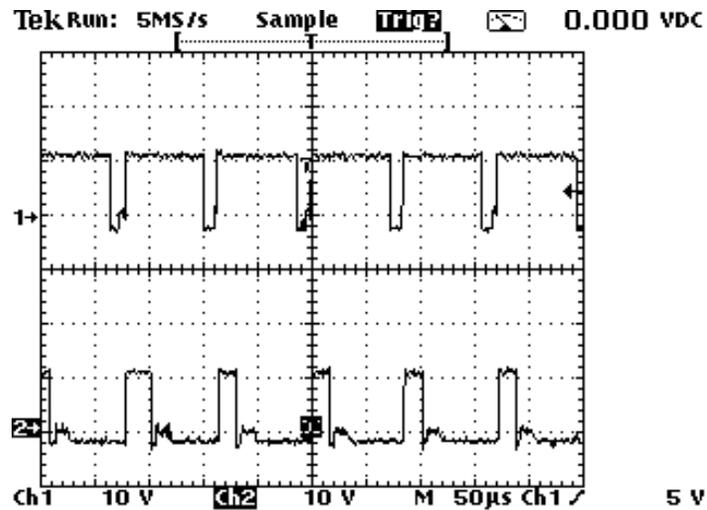


Figura III.17: señal PWM del segundo motor reducida en su ancho de pulso ($V_T = 0.9 \text{ V}$ y $V_{in} = 1.2 \text{ V}$)

Los niveles de temperatura medio y alto se establecieron, por diseño, con un valor de $V_T = 0.8 \text{ V}$ y $V_T = 1.2 \text{ V}$ respectivamente, que corresponden a los valores de las variables correspondientes a $T_{m1} = 8A5$ y $T_{m2} = CD1$ respectivamente, del programa.

Podemos establecer una función condicionante que relaciona el voltaje de entrada, el voltaje de entrada de la temperatura y las señales PWM de salida de la siguiente manera:

$$P_{1,2} = \begin{cases} 100 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}} & ; V_T < 0.8 \text{ V} \\ 25 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}} & ; 0.8 \text{ V} \leq V_T \leq 1.2 \text{ V} \\ 0 & ; V_T > 1.2 \text{ V} \end{cases}$$

d) *Diferencial Electrónico*

Por cuestiones de diseño se determinó que el motor 1 está fijado en la rueda izquierda y el motor 2 en la rueda derecha.

Las figuras III.18 y III.19 muestran el desempeño del controlador cuando se da vuelta en ambos sentidos y como las señales PWM varían proporcionalmente al giro dado. Mientras la rueda de apoyo disminuye su velocidad la otra lo aumenta de manera proporcional.

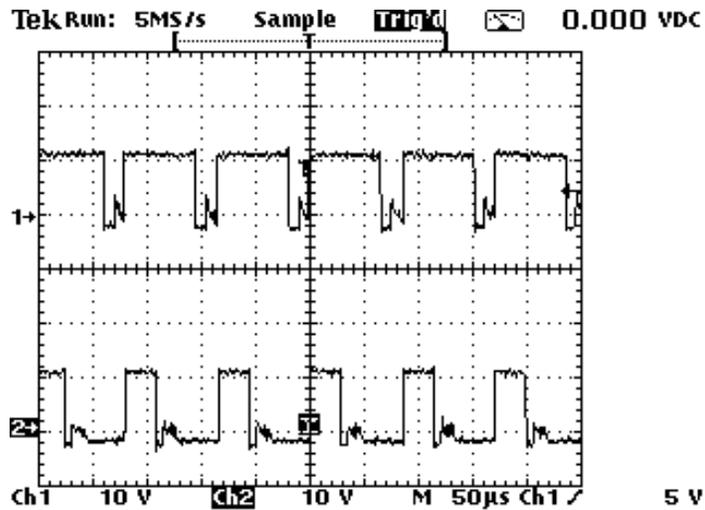


Figura III.18: Señales PWMs mientras se está dando vuelta a la derecha ($V_{in} = 0.8 \text{ V}$ y $*V_{\alpha} = 1.1 \text{ V}$)

* V_{α} : Voltaje de entrada de la posición angular del volante

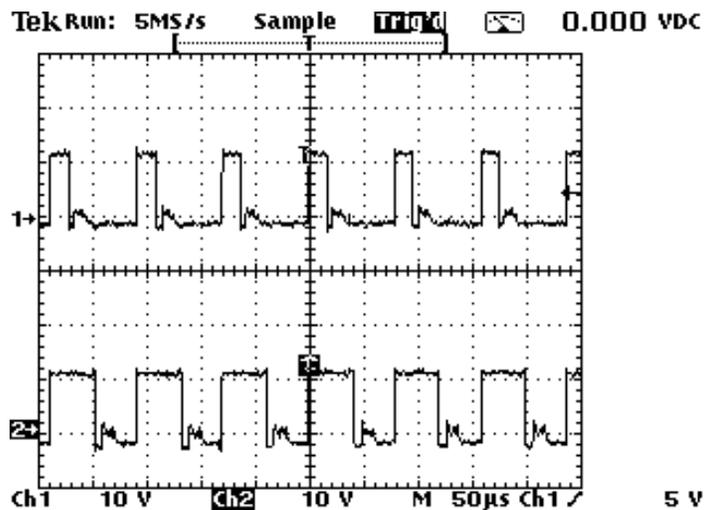
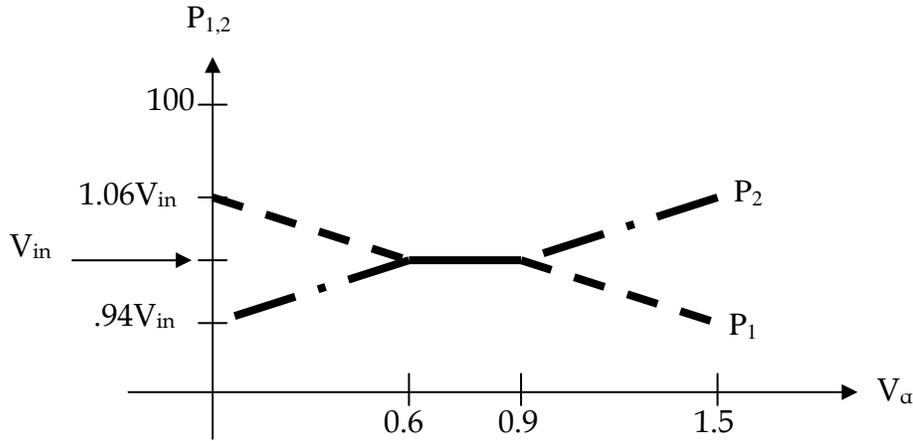


Figura III.19: Señales PWMs mientras se está dando vuelta a la izquierda ($V_{in} = 0.5 \text{ V}$ y $V_{\alpha} = 0.4 \text{ V}$)

En el anexo A se encuentra el programa del microcontrolador y podemos verificar que los límites de las vueltas izquierda y derecha de la posición angular del volante están fijadas como: $DEM_1 = A03$ que corresponde a $V_\alpha = 0.9 \text{ V}$ y $DEM_2 = 692$ correspondiente a $V_\alpha = 0.6 \text{ V}$. Se maneja un margen de $\pm 0.15 \text{ V}$ respecto a la posición angular central entendida a la mitad del voltaje de referencia, es decir, 0.75 V .

La gráfica que muestra la relación entre el voltaje de entrada de la posición angular del volante y los anchos de pulsos es:



$$P_1 = \begin{cases} 100 \times \frac{k_1}{V_{ref}} & ; V_\alpha < 0.6 \text{ V} \\ 100 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}} & ; 0.6 \text{ V} \leq V_\alpha \leq 0.9 \text{ V} \\ 100 \times \frac{k_2}{V_{ref}} & ; V_\alpha > 0.9 \text{ V} \end{cases} \quad P_2 = \begin{cases} 100 \times \frac{k_2}{V_{ref}} & ; V_\alpha < 0.6 \text{ V} \\ 100 \times \frac{V_{in}}{V_{ref}} & ; 0.6 \text{ V} \leq V_\alpha \leq 0.9 \text{ V} \\ 100 \times \frac{k_1}{V_{ref}} & ; V_\alpha > 0.9 \text{ V} \end{cases}$$

En donde $k_1 = V_{in} + \frac{|V_{in} - V_\alpha|}{16}$ y $k_2 = V_{in} - \frac{|V_{in} - V_\alpha|}{16}$ y P_1 y P_2 se refieren a los anchos de pulsos

de las señales PWMs de salida referidas a los motores correspondientes.

CONCLUSIONES FINALES

El objetivo de la tesis se cumplió al programar el microcontrolador MSP430F149 y lograr que controlara el par de motores, al monitorear y tomar decisiones de las variables que intervienen y al cumplir con el diferencial electrónico en el sistema.

Es importante remarcar que el diseño de esta etapa de control queda abierta a adaptarse a cualquier vehículo eléctrico que contemple dirigir un par de motores de corriente directa y que prescindan de un diferencial mecánico. Dicha adaptación debe considerar tres pasos:

1. Desarrollar las etapas de potencia para cada motor o adaptar algunas comerciales las cuales además deberán incluir sensores de corriente, voltaje y temperatura. Cabe mencionar que al momento en que el presente diseño se consideró para el vehículo eléctrico de reparto (VER) de la UNAM, se pensó acoplar un par de módulos IGBT POWEREX de 400 V a 1200 A.
2. Calibrar los niveles ideales para las señales de las variables de voltaje de las baterías, la corriente y la temperatura de las etapas de potencia, señal del acelerador y el sensor del volante.
3. Programar un algoritmo de control que cumpla con las leyes de viraje para establecer las velocidades de giro adecuadas en cada motor de tracción y lograr un sistema de diferencial electrónico eficiente.

```

#include "msp430x14x.h" // Ecuaciones Estándar
;*****
;   Señales PWM generadas a partir de un voltaje de entrada Vin
;   con subrutinas de protección para V, I y T.
;
; Descripción: Este programa genera un par de señales PWM cuyos anchos
;   de pulsos varían de acuerdo al voltaje de entrada único;
;   además cuenta con protecciones de voltaje en baterías,
;   corriente y temperatura, estas últimas dos, de manera
;   independiente; por último, está programado un diferencial
;   electrónico de acuerdo a la posición del volante;
;   la frecuencia de operación aproximada es de 12 kHz.
;
;   MSP430F149
;
;   _____
;   |           P6.0(59) | <-- Vin
;   |           P6.1(60) | <-- I1
;   |           P6.2(61) | <-- T1
;   |           P6.3(2)  | <-- P(DE)
;   |           P6.4(3)  | <-- I2
;   |           P6.5(4)  | <-- T2
;   |           P6.6(5)  | <-- Vb
;   |           |
;   |           P2.0(20) | --> led(I1)
;   |           P2.1(21) | --> led(I2)
;   |           P2.2(22) | --> led(T1)
;   |           P2.3(23) | --> led(T2)
;   |           P2.4(24) | --> led(Vb)
;   |           P2.5(25) | --> ventilador(T1)
;   |           P2.6(26) | --> ventilador(T2)
;   |           P1.2(14) | --> PWM1
;   |           P1.3(15) | --> PWM2
;
; Angel Canché
; Supervisor: Ing. Germán Carmona
; Instituto de Ingeniería, UNAM
; Marzo 2003
;*****
;-----
main      ORG    01100h      ; Inicio del Programa
Vc      EQU    09FAh      ; Límite voltaje
Im1     EQU    0AF7h      ; Límites de corriente
Tm1     EQU    08A5h      ; Estado medio temp
Tm2     EQU    0CD1h      ; Estado crítico temp

```

DEm ₁	EQU	0A03h	; Límite der. volante
DEm ₂	EQU	0692h	; Límite izq. volante
DEm ₃	EQU	0020h	; Límite inf diferencial
DEm ₄	EQU	0FFFh	; Límite sup diferencial

RESET	mov.w	#0A00h,SP	; Inicializa'F149 stackpointer
StopWDT	mov.w	#WDTPW+WDTHOLD,&WDTCTL	; Parar WDT
	mov	#0, R11	; R11->0
	mov	#0, R5	; R5->0
SetupCh	bis.b	#07Fh, &P2DIR	; Salida P1.0-6
	bis.b	#07Fh, &P6SEL	; Habilitar canales A/D
SetupADC12	mov	#ADC12ON+MSC+SHT0_2,&ADC12CTL0	; tiempo de muestra
	mov	#SHP+CONSEQ_1, &ADC12CTL1	; Usar tm
	bis.b	#INCH_0,ADC12MCTL0	; A0->MEM0
	bis.b	#INCH_1,ADC12MCTL1	; A1->MEM1
	bis.b	#INCH_2,ADC12MCTL2	; A2->MEM2
	bis.b	#INCH_3,ADC12MCTL3	; A3->MEM3
	bis.b	#INCH_4,ADC12MCTL4	; A4->MEM4
	bis.b	#INCH_5,ADC12MCTL5	; A5->MEM5
	bis.b	#INCH_6+EOS,ADC12MCTL6	; A6->MEM6
	bis	#ENC, &ADC12CTL0	; Habilita conversiones
SetupDCO	bis.b	#0FFh, &DCOCTL	; MOD = 7
	bis.b	#07h, &BCSCTL1	; DCO = 5MHz
SetupTA	mov.w	#TASSEL1+TACLRL,&TACTL	; Limpiar TAR
SetupC0	mov.w	#0FFh, &CCR0	; Periodo de la PWM
SetupC1	mov.w	#OUTMOD_7,&CCTL1	; CCR1 reset/set
SetupC2	mov.w	#OUTMOD_7,&CCTL2	; CCR2 reset/set
SetupP1	bis.b	#00Ch,&P1DIR	; Salidas P1.2 y P1.3
	bis.b	#00Ch,&P1SEL	; Seleccionar TA1/2
	bis.w	#MC0,&TACTL	; Iniciar Timer_A en up mode
Mainloop	bis	#ADC12SC, &ADC12CTL0	; Iniciar conversiones
	call	#V_Prtc	; Protección Vb
	call	#V_Mtr	; Alimentación M1 y M2
	call	#I1_Prtc	; Protección I1
	call	#I2_Prtc	; Protección I2
	call	#T1_Prtc	; Protección T1
	call	#T2_Prtc	; Protección T2
	call	#D_EtnC	; Protección DE

```

mov #0,&P1OUT          ; Apaga leds
mov #0,&P2OUT          ; Apaga ventiladores
mov #0, R9             ; R9->0
jmp Mainloop          ; Regresa a Mainloop

```

```

;-----
V_Mtr;      Rutina de alimentación en motores
;-----

```

```

mov &ADC12MEM0, R5      ; MEM0->R5
rra R5                  ; R5/2
rra R5                  ; R5/2
rra R5                  ; R5/2
call #Delay             ; Ve a la rutina Delay
mov R5, &CCR1           ; R5->CCR1
mov R5, &CCR2           ; R5->CCR2
ret                    ; Sal de la rutina

```

```

;-----
V_Prtc;     Rutina de protección para voltaje en baterías
;-----

```

```

Ite0      mov &ADC12MEM6, R12      ; MEM6->R12
          cmp #Vc,R12             ; ¿Vc<R12?
          jl  Vaux                 ; Sí, ve a Vaux
          ret                      ; Sal de la rutina

```

```

Vaux      mov.b #10h, &P2OUT      ; Prende led
          mov.w #0, &CCR1         ; PWM1 = 0
          mov.w #0, &CCR2         ; PWM2 = 0
          bis  #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Actualizar conversiones
          jmp  Ite0

```

```

;-----
I_Prtc;    Rutina de protección para las corrientes
;-----

```

```

Ite1      mov &ADC12MEM1, R6      ; MEM1->R6
          mov &ADC12MEM4, R7      ; MEM4->R7
          cmp #Im1, R6            ; ¿Im1>=R6?
          cmp R6, R7              ; ¿R6>=R7?
          jhs Iaux1               ; Sí, ve a Iaux1
          cmp #Im1, R6            ; ¿Im1>=R6?
          jhs Iaux2               ; Sí, ve a Iaux2
          cmp #Im1, R7            ; ¿Im1>=R7?
          jhs Iaux3               ; Sí, ve a Iaux3

```

```

ret                                ; Sal de la rutina

Iaux1    mov    #0, &CCR1           ; PWM1 = 0
          mov    #0, &CCR2           ; PWM2 = 0
          mov    #01h,&P2OUT         ; Prende led
          mov    #02h,&P2OUT         ; Prende led
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Actualizar conversiones
          jump   Ite1                ; Regresa a Ite1

Iaux2    mov    #0, &CCR1           ; PWM1 = 0
          mov    #01h,&P2OUT         ; Prende led
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Actualizar conversiones
          jump   Ite1                ; Regresa a Ite1

Iaux2    mov    #0, &CCR2           ; PWM2 = 0
          mov    #02h,&P2OUT         ; Prende led
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Actualizar conversiones
          jump   Ite1                ; Regresa a Ite1

;-----
T1_Prtc;    Rutina de protección para temperatura
;-----
Tte1    mov    &ADC12MEM0, R5        ; MEM0->R5
          rra   R5                    ; R5/2
          rra   R5                    ; R5/2
          rra   R5                    ; R5/2
          cmp   R7,R5                 ; ¿R5=R7?
          jz    pIFG1                 ; Si, ve a pIFG1
          mov   R5,R7                 ; R5->R7
          mov   R5,R4                 ; R5->R4
          rra   R4                    ; R4/2
          rra   R4                    ; R4/4
pIFG1   mov    &ADC12MEM2, R6        ; MEM2->R6
          cmp   #Tm2, R6              ; ¿Tm2>=R6?
          jhs   Taux3                 ; Si, ve a Taux3
          cmp   #Tm1, R6              ; ¿Tm1>=R6?
          jhs   Taux1                 ; Si, ve a Taux1
          ret                          ; Sal de la rutina

Taux1   mov    R4, &CCR1             ; R4->CCR1
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
          mov    #020h,&P2OUT         ; Prende ventilador
          jmp   Tte1                  ; Regresa a Tte1

```

```

Taux3    mov    #0,&CCR1                ; PW = 0
          mov    #04h,&P2OUT            ; Prende led
          mov    #020h,&P2OUT          ; Mantén ventilador prendido
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
          jmp    Tte1                  ; Regresa a Tte1

```

```

;-----
T2_Prtc;   Rutina de protección para temperatura
;-----

```

```

Tte2      mov    &ADC12MEM0, R5        ; MEM0->R5
          rra    R5                    ; R5/2
          rra    R5                    ; R5/2
          rra    R5                    ; R5/2
          cmp   R7,R5                  ; ¿R5=R7?
          jz    pIFG2                  ; Si, ve a pIFG2
          mov   R5,R7                  ; R5->R7
          mov   R5,R4                  ; R5->R4
          rra   R4                    ; R4/2
          rra   R4                    ; R4/4
pIFG2     mov    &ADC12MEM5, R6        ; MEM5->R6
          cmp   #Tm2, R6               ; ¿Tm2 = R6?
          jhs   Taux6                  ; Si R6 >= Tm2 ve a Taux3
          cmp   #Tm1, R6               ; ¿Tm1 = R6?
          jhs   Taux4                  ; Si R6 >= Im1 ve a Taux1
          ret                            ; Sal de la rutina

```

```

Taux4     mov    R4, &CCR2              ; R4->CCR2
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
          mov.b #040h,&P2OUT           ; Prende ventilador
          jmp    Tte2                  ; Regresa a Tte2

```

```

Taux6     mov    #0,&CCR2                ; PW = 0
          mov.b #08h,&P2OUT            ; Prende led
          mov.b #040h,&P2OUT          ; Mantén ventilador prendido
          bis    #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
          jmp    Tte2                  ; Regresa a Tte2

```

```

;-----
D_Etnc;   Rutina del Diferencial Electrónico
;-----

```

```

Ite3      mov    &ADC12MEM0, R5        ; MEM0->R5

```

	rra	R5	; R5/2
	rra	R5	; R5/4
	rra	R5	; R5/8
	mov	R5, R10	; R5->R10
	mov	R5, R6	; R5->R6
Ite4	mov	&ADC12MEM0, R5	; MEM0->R5
	rra	R5	; R5/2
	rra	R5	; R5/4
	rra	R5	; R5/8
	cmp	#DEm5, R5	; ¿R5 < DEm5?
	jl	DEaux6	; Si, ve a DEaux6
	mov	&ADC12MEM3, R7	; MEM3->R7
	mov	R7, R8	; R7->R8
	cmp	#DEm4, R7	; ¿R7>=DEm4?
	jhs	DEaux5	; Si, ve a DEaux5
	cmp	#DEm3, R7	; ¿R7 < DEm3?
	jl	DEaux5	; Si, ve a DEaux5
	cmp	#DEm1, R7	; ¿R7 >= DEm1?
	jhs	DEaux2	; Si, ve a DEaux2
	cmp	#DEm2, R7	; ¿R7 < DEm2?
	jl	DEaux1	; Si, ve a DEaux1
	ret		; Sal de la rutina
DEaux6	ret		; Sal de la rutina
DEaux5	mov	#0, &CCR1	; PW = 0
	mov	#0, &CCR2	; PW = 0
	bis	#ADC12SC, &ADC12CTL0	; Reiniciar conversiones
	mov	#10h, &P2OUT	; Mantén led prendido
	jmp	Ite3	; Regresa a Ite3
DEaux1	mov	#DEm2, R4	; R4->DEm2
	sub.w	R8, R4	; R4 -= R8
	mov	R4, R8	; R4->R8
	rra	R8	; R8/2
	rra	R8	; R8/4
	rra	R8	; R8/8
	rra	R8	; R8/16
	rra	R8	; R8/32
	cmp	R9, R8	; ¿R8 >= R9?
	jhs	DEaux3	; ¿Si?, ve a DEaux3
	dec	R9	; R9-1
	inc	R6	; R5+1

```

dec R10 ; R10-1
mov R10, &CCR1 ; R10->CCR1
mov R6, &CCR2 ; R5->CCR2
bis #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
jmp Ite4 ; Regresa a Ite4

DEaux3 inc R9 ; R9+1
dec R6 ; R5-1
inc R10 ; R10+1
mov R10, &CCR1 ; R10->CCR1
mov R6, &CCR2 ; R5->CCR2
bis #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
jmp Ite4 ; Regresa a Ite4

DEaux2 sub #DEm1, R8 ; R8 -= DEm1
rra R8 ; R8/2
rra R8 ; R8/4
rra R8 ; R8/8
rra R8 ; R8/16
rra R8 ; R8/32
cmp R9,R8 ; ¿R8 >= R9?
jhs DEaux4 ; ¿Si?, ve a DEaux4
dec R9 ; R9-1
dec R6 ; R5-1
inc R10 ; R10+1
mov R10, &CCR1 ; R5->CCR1
mov R6, &CCR2 ; R10->CCR2
bis #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
jmp Ite4 ; Regresa a Ite4

DEaux4 inc R9 ; R9+1
inc R6 ; R5+1
dec R10 ; R10-1
mov R10, &CCR1 ; R5->CCR1
mov R6, &CCR2 ; R10->CCR2
bis #ADC12SC, &ADC12CTL0 ; Reiniciar conversiones
jmp Ite4 ; Regresa a Ite4

;-----
Delay; Software delay
;-----

Ini cmp R11, R5 ; ¿R5 >= R11?
jhs Ini1 ; ¿Si?, ve a Ini1
dec R11 ; R11-1

```

```

mov R11, &CCR1          ; R11->CCR1
mov R11, &CCR2          ; R11->CCR2
ret                      ; Sal de la rutina

Ini1      inc R11                ; R11+1
          call #Dly              ; Ve a la rutina Dly
          mov R11, &CCR1         ; R11->CCR1
          mov R11, &CCR2         ; R11->CCR2
          jmp Ini                ; Regresa a Ini

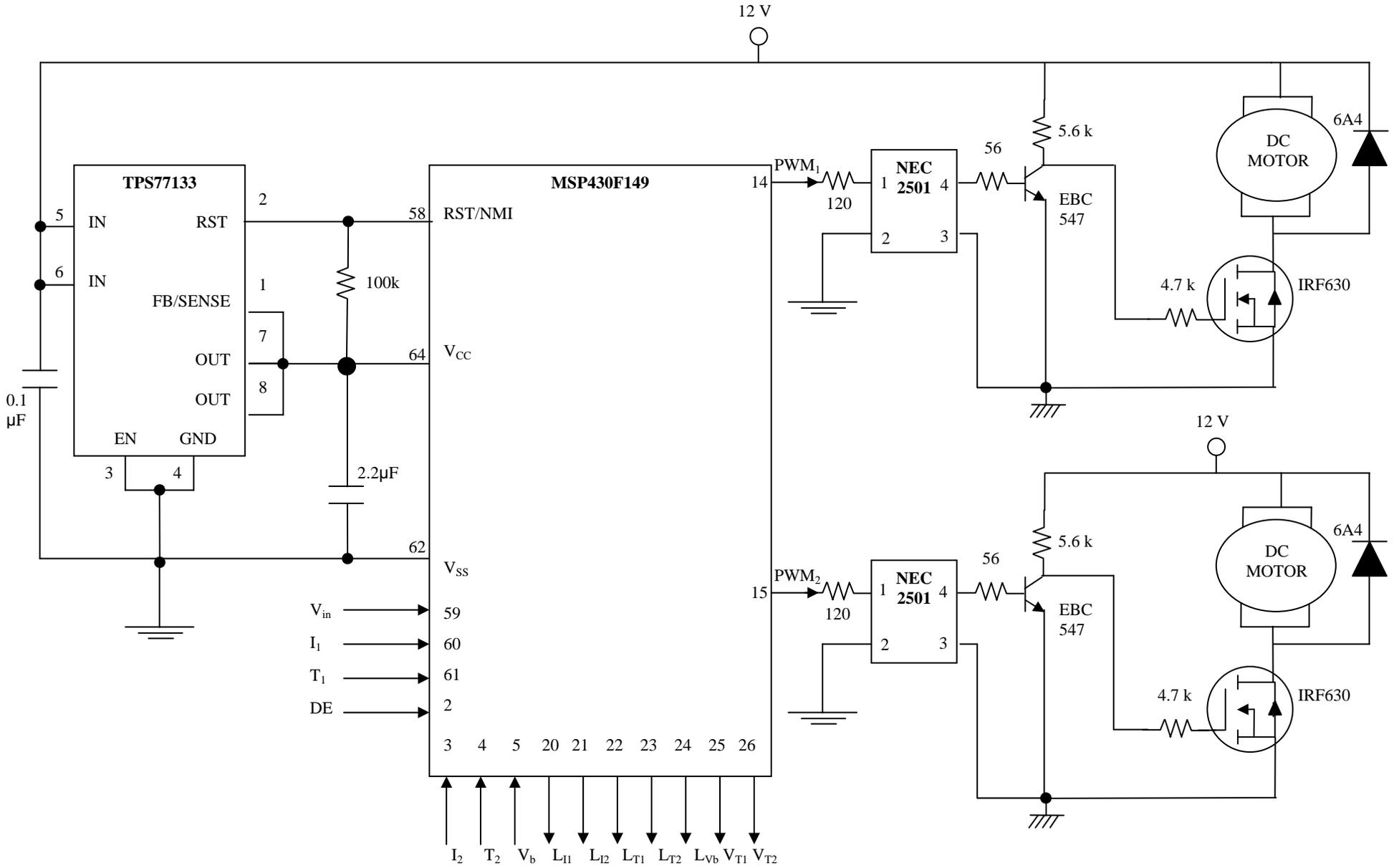
;-----
Dly;      Software delay
;-----

L1        push #006FFh          ; SP->6FF
          dec 0(SP)              ; SP-1
          jnz L1                 ; Si SP>0, ve a L1
          incd SP                 ; SP+2
          ret                    ; Sal de la rutina

;-----
; Vectores de interrupción usados para MSP430x13x/14x
;-----

ORG 0FFFEh          ; Vector 'reset' del MSP430
DW  RESET           ;
END                 ; Fin del programa

```



B I B L I O G R A F Í A

Husain, Iqbal "Electric and Hybrid Vehicles", CRC Press Web, USA 2003

Larrode P., Emilio "Automóviles Eléctricos", INO Reproducciones, Zaragoza 1997.

Bose, Bimal K. "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE Press, USA 1996.

Peatman, John B. "Design with Microcontrollers", Mc. Graw Hill, USA 1998.

Sheperd, W., Hulley, L. N., Liang, D. T. W., "Power Electronics and Motor Control", Cambridge, Great Britain, 1995.