



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

“Diseño de control para un motor generador en un vehículo híbrido-serie utilizando el protocolo de comunicación CAN”

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A N:

**Hernández Yáñez David Javier
Herrera Solis Misael**

DIRECTOR DE TESIS: M. I. Germán Carmona Paredes

CIUDAD UNIVERSITARIA FEBRERO, 2014



Por fin termina el ciclo más largo y difícil pero también satisfactorio en toda mi vida hasta ahora y a continuación expreso mis más sinceros agradecimientos.

Gracias a mis padres Javier y Luz por darme la vida y procurar siempre lo mejor para mi y mis hermanos, por guiarme a través del buen camino y ayudarme a conseguir todos mis logros hasta el día de hoy. Por toda la comprensión, paciencia y apoyo mostrado durante el desarrollo de este trabajo. Gracias a ustedes por ayudar a hacer de mi lo que soy ahora.

Gracias a mis hermanos Adriana y Axel por todo el cariño y todos los momentos de alegría que hemos vivido. Porque como hermano mayor tengo la responsabilidad de hacer las cosas bien para darles un buen ejemplo. Sé que cuento con ustedes y de igual forma ustedes cuentan conmigo siempre.

Gracias a Monserrat por ser una parte fundamental en mi vida estos últimos años, por todos los momentos que he pasado a tu lado. Tu amor y apoyo han sido una gran fuente de motivación para mí. A tu lado el camino ha sido más llevadero. Gracias por ser mi compañera de viaje.

Gracias a mis amigos por su amistad y los consejos que me han dado, porque hacen que los malos momentos no sean tan malos y que los buenos sean mejores. Gracias a Adal, Germán, Alejandro, Mariana, Genaro, Ubaldo, Noé, Armando. Sepan que en mi tienen a un amigo para toda la vida.

Gracias a todos los ingenieros que me han ayudado a desarrollar mi carrera profesional hasta ahora. Gracias al ingeniero Elías Bernal y a todos los trabajadores del Sistema de Transporte Colectivo Metro porque ahí fue donde por primera vez utilicé mis conocimientos en beneficio de la sociedad. Gracias al ingeniero Reyes Taboada y a toda la gente de Vehizero por confiar en mí durante el desarrollo del ECCO5. Gracias a mis compañeros de Nissan por toda su ayuda en este nuevo reto. Gracias a Misael por el apoyo mostrado en el desarrollo de este trabajo.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por proveer las herramientas necesarias para hacer de mí un buen ingeniero en pos del beneficio a la sociedad y del desarrollo científico y económico de México.

Me gustaría mencionar a todas las personas que han estado a mi lado a lo largo de todo este tiempo pero es difícil recordar y reconocer a cada una de ellas. A todos ustedes, familiares, amigos, colegas, conocidos; gracias.

“The biggest fish in the river gets that way by never being caught.”
(Fragmento de la película “Big fish” de Tim Burton)

David Javier Hernández Yáñez
Febrero, 2014.

Agradezco infinitamente a mis padres Angelina e Imisael y a mis hermanas Cheli y Viri por todo el amor, comprensión y apoyo que me han brindado para poder ser la persona que soy ahora.

A Karina que me ha dado su amor y que me ha acompañado en este trayecto desde hace mucho tiempo. Me ha enseñado lo valioso de la vida dándome el mejor regalo que pueda recibir, nuestra hija Ximena.

A Gerardo, Alberto, Oscar, Arturo, Jorge y Ray por haber compartido tantos momentos durante nuestra estancia en la facultad, se convirtieron en mis hermanos.

A todos los Shaq's gracias por su amistad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México porque me ha formado profesionalmente y porque en ella he pasado momentos inolvidables y he conocido a personas que ahora son muy importantes en mi vida.

A todos en Vehizero y en especial al ingeniero Reyes Taboada por permitirnos ser parte del desarrollo de tan importante proyecto.

Al M. I. Germán Carmona y a Javier por su colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos los que hicieron posible que terminara con esta etapa tan importante de mi vida.

Misael Herrera Solis

Índice	iv
Introducción	1
Capítulo 1. Problemática actual	4
1.1. Tendencias actuales del transporte.....	5
1.1.1. Transporte por carretera.....	5
1.1.2. Transporte por tren.....	6
1.1.3. Transporte marítimo.....	6
1.1.4. Transporte urbano.....	7
1.2. Insustentabilidad de los sistemas de transporte tradicionales.....	7
1.2.1. Insustentabilidad ambiental.....	8
1.2.1.1. Dependencia de los combustibles fósiles.....	8
1.2.1.2. Impacto ambiental debido al uso de hidrocarburos en el transporte.....	8
1.2.1.3. Cambio climático.....	9
1.2.1.4. Consumo de recursos.....	9
1.2.1.5. Contaminación del agua.....	10
1.2.1.6. Ocupación del suelo.....	10
1.2.2. Insustentabilidad financiera.....	11
1.2.3. Insustentabilidad social.....	11
1.2.3.1. Accidentes.....	11
1.2.3.2. Congestión.....	11
1.3. Principios del transporte sustentable.....	12
1.4. Medidas adoptadas para un transporte sustentable.....	13
1.4.1. Efectos del uso eficiente de la energía.....	14
1.4.2. Medidas políticas.....	15
1.4.3. Iniciativas privadas a escala internacional.....	15
1.4.4. Medidas tecnológicas.....	16
1.5. Implicaciones económicas de un transporte sustentable.....	17
1.5.1. Uso de vehículos eléctricos.....	17
1.6. Situación actual en México.....	17
1.6.1. Líneas de acción.....	19
1.6.2. Vehículos eléctricos en México.....	20
1.6.2.1. Flotillas de taxis y corporativas.....	23
Capítulo 2. Conceptos generales de un automóvil	26
2.1. Historia del automóvil.....	26
2.2. Configuración física del automóvil.....	29
2.2.1. El motor.....	30
2.2.1.1. Sistema de arranque del motor.....	32
2.2.2. Mecanismo de transmisión.....	32
2.2.2.1. Transmisión.....	33
2.2.2.2. Eje de transmisión.....	33
2.2.2.3. Diferencial.....	34
2.2.3. Suspensión.....	34
2.2.4. Frenos.....	35
2.2.5. Sistema de la dirección.....	36

Capítulo 3. Vehículos híbridos	38
3.1. Historia del automóvil eléctrico.....	38
3.2. Configuración física del automóvil eléctrico.....	39
3.2.1. Motor eléctrico.....	39
3.2.1.1. Características del motor eléctrico.....	40
3.2.1.2. Tipos de motor eléctrico.....	42
3.2.1.2.1. Máquinas asíncronas o de inducción.....	42
3.2.1.2.2. Máquinas síncronas.....	44
3.2.1.2.3. Máquinas de reluctancia conmutada.....	45
3.2.1.2.4. Motores de flujo axial.....	45
3.2.1.2.5. Motores de corriente continua sin escobillas.....	45
3.2.2. Baterías.....	46
3.2.2.1. Estado de carga.....	46
3.2.2.2. Densidad de energía.....	47
3.2.2.3. Densidad de potencia.....	47
3.2.2.4. Características de las baterías empleadas en vehículos eléctricos.....	48
3.2.3. Unidad de control.....	50
3.2.3.1. Control de un motor de DC.....	51
3.2.3.2. Control de un motor de AC.....	52
3.2.4. Sistema de recarga.....	53
3.2.4.1. Cargador de voltaje constante.....	54
3.2.4.2. Cargador de corriente constante.....	54
3.2.4.3. Cargador de combinación de corriente/voltaje constante.....	54
3.2.4.4. Cargador de pulsos.....	54
3.3. Vehículos híbridos.....	55
3.3.1. Componentes principales de un vehículo híbrido.....	56
3.3.2. Configuración de los vehículos híbridos eléctricos.....	56
3.3.2.1. Vehículos híbridos serie.....	57
3.3.2.2. Vehículos híbridos paralelo.....	58
 Capítulo 4. Electrónica del automóvil	 60
4.1. Concepto de sistema.....	60
4.1.1. Sistemas analógicos.....	61
4.1.2. Sistemas digitales.....	62
4.2. Instrumentos.....	63
4.2.1. Medición.....	63
4.2.1.1. Precisión.....	64
4.2.1.2. Calibración.....	64
4.2.1.3. Exactitud.....	64
4.2.1.4. Errores.....	64
4.2.1.5. Confiabilidad.....	65
4.3. Sistema básico de medición.....	65
4.3.1. Sensor.....	65
4.3.2. Visualizadores y actuadores.....	66
4.3.3. Procesamiento de señales.....	66
4.3.4. Sistemas de control.....	67
4.3.4.1. Control de ciclo abierto.....	68
4.3.4.2. Control de ciclo cerrado.....	68

4.4.	Empleo de microcontroladores en los sistemas de medición y control del automóvil.....	69
4.4.1.	Estructura de un microcontrolador.....	71
4.4.1.1.	El perro guardián.....	73
4.4.1.2.	Reset.....	74
4.4.2.	Arquitecturas von Neumann y Harvard.....	75
4.4.3.	Los microcontroladores PIC.....	76
4.4.3.1.	Programación en lenguaje ensamblador.....	77
4.4.3.2.	Puertos paralelos.....	80
4.4.3.3.	Temporizadores.....	82
4.4.3.4.	El módulo CCP.....	83
4.4.3.5.	Interrupciones en los PIC.....	84
4.4.3.6.	Adquisición y distribución de señales.....	85
4.4.3.7.	Transmisión de datos en serie.....	87
4.5.	Bus CAN.....	88
4.5.1.	Capa física.....	90
4.5.1.1.	Topología bus.....	90
4.5.1.2.	Nivel de señal.....	90
4.5.1.3.	Codificación de bits.....	92
4.5.1.4.	Temporización y sincronización de un bit.....	93
4.5.1.5.	Tramas.....	94
4.5.2.	Capa de enlace de datos.....	94

Capítulo 5. Desarrollo del control para el moto-generador en el vehículo ECCO

5.	96
5.1.	Descripción del problema.....	96
5.1.1.	Estimación del estado de carga (SOC) del banco de baterías.....	97
5.1.2.	Motor eléctrico del ECCO-5.....	98
5.1.3.	Moto-generador del ECCO-5.....	98
5.1.4.	Banco de baterías del ECCO-5.....	100
5.2.	Descripción del hardware utilizado.....	100
5.2.1.	Voltaje de CAN y Voltaje auxiliar.....	101
5.2.2.	Microcontrolador PIC18f2580.....	101
5.2.3.	Transceptor MCP2551.....	102
5.2.4.	Fuente de alimentación.....	103
5.2.5.	Referencia de voltaje para el módulo ADC.....	103
5.2.6.	Circuito de programación ICSP.....	104
5.2.7.	Medidor de voltaje promedio para la estimación del SOC.....	105
5.2.8.	Medidor de gasolina.....	106
5.2.9.	Medidor de temperatura.....	108
5.2.10.	Contador de RPM.....	109
5.2.11.	Sistema de arranque del moto-generador.....	109
5.2.12.	Esquemático del control.....	111
5.3.	Desarrollo del software para el control.....	113
5.3.1.	Diagrama de flujo.....	114
5.3.1.1.	Programa principal.....	115
5.3.1.2.	Monitoreo de moto-generador.....	116
5.3.1.3.	Encendido de moto-generador.....	116
5.3.1.4.	Falla de moto-generador.....	117
5.3.2.	Rutina de lectura de voltaje de baterías.....	117

5.3.3. Rutina de lectura de nivel de tanque de gasolina.....	122
Capítulo 6. Resultados y conclusiones.....	127
Bibliografía.....	129
Índice de figuras.....	130
Índice de tablas.....	132

Introducción

Según algunos antropólogos, basados en los estudios de restos humanos y reliquias arqueológicas, el ser humano existe sobre la Tierra desde hace unos 100,000 años por lo menos. Por los vestigios dejados por los primitivos se supone que desde hace aproximadamente 10,000 años el hombre llegó a conocer la agricultura y dejó de ser nómada para convertirse al sedentarismo. Sin embargo los estudios antropológicos indican que las antiguas civilizaciones florecieron hace apenas unos 6000 años.

Más tarde, con la invención de la rueda, probablemente en Mesopotamia hace unos 5000 años, se originó la necesidad de construir superficies de rodamiento que permitieran la circulación del entonces creciente flujo vehicular. A través de los siglos se puede observar la evolución que ha tenido el tránsito a medida que también evolucionan, tanto el camino como el vehículo.

Algunos pueden pensar que el automóvil como lo conocemos actualmente no constituye novedad alguna, pero éste ha evolucionado notoriamente desde los primeros intentos por crear un vehículo automotriz hasta nuestros días.

En los últimos años la industria automotriz se ha encargado de desarrollar vehículos que no dependen, parcial o totalmente, de los derivados del petróleo como combustible, para esto se han implementado motores eléctricos, celdas de hidrógeno, biocombustibles, entre otros.

En la actualidad es de suma importancia buscar formas alternativas de energía, pues debido al uso excesivo que la industria ha hecho del petróleo a partir de la revolución industrial es muy probable que en muy poco tiempo dicho recurso natural se encuentre agotado o muy escaso, lo que traerá consigo un gran incremento en su precio y por lo tanto se elevarán los costos de combustibles, lo que afecta directamente a la industria automotriz, ya que el motor de combustión interna es el que predomina hasta el día de hoy.

En este trabajo nos enfocamos en los vehículos híbridos. Un vehículo híbrido es aquel que utiliza diversas fuentes de energía para su propulsión, en este caso un motor de combustión interna y un motor eléctrico, este último obtiene energía de un banco de baterías que se recarga conectándolo a una toma de corriente alterna, la cual primero debe pasar por un circuito rectificador para que esta energía pueda ser almacenada apropiadamente en el banco. En este caso nos referimos a un vehículo híbrido serie pues el motor de combustión interna no provee energía para mover la transmisión del vehículo sino que se encuentra acoplado a un generador eléctrico el cual genera energía eléctrica que se almacena en el banco de baterías el cual suministra la energía necesaria al sistema de transmisión del vehículo.

Es de gran importancia contar con un sistema eficiente que realice el monitoreo de las variables que intervienen en el encendido o apagado del motor de combustión interna ya que este le brinda mayor autonomía al vehículo. Tales variables son el voltaje en el banco de baterías, la gasolina contenida en un tanque, la temperatura del motor y las RPM del motor cuando éste se encuentra encendido.

Un vehículo debe contar con diversos sistemas electrónicos que realicen tareas determinadas y además estén comunicados entre sí para el correcto funcionamiento del vehículo. Existen diferentes tipos de comunicación para el intercambio de información entre los diferentes sistemas, en este caso nos remitiremos al protocolo CAN (Controller Area Network), el cual además de ser el más utilizado en la industria automotriz tiene ventajas sobre otros protocolos como el I²C o el RS232.

En el país existen desarrollos de diversos prototipos de vehículos híbridos, los cuales requieren de este tipo de sistemas. Actualmente ya existen en el mercado sistemas que se encargan de realizar el monitoreo de variables para controlar un motor generador, pero estos tienen un costo elevado por lo que no son apropiados para el desarrollo de vehículos de bajo costo.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema que efectúe el control del motor generador descrito anteriormente en forma eficiente y a un menor costo que sistemas similares que se encuentran en el mercado; lo cual contribuye al crecimiento de la industria de los vehículos híbridos en México, al tener costos de producción más bajos.

El presente trabajo consta de 6 capítulos los cuales se describen brevemente a continuación:

El capítulo uno aborda la problemática actual en el transporte, su insustentabilidad debido a la dependencia de combustibles fósiles, y el impacto ambiental debido al uso de hidrocarburos como fuente de energía. Se mencionan las medidas políticas, tecnológicas e iniciativas privadas para la transición hacia un transporte sustentable a nivel internacional. También se abordan las líneas de acción para mejorar el sistema de transporte en México así como la introducción de vehículos eléctricos.

El capítulo dos hace un resumen de la evolución del automóvil así como la descripción del funcionamiento básico de los diferentes sistemas de los que está formado.

El capítulo tres describe la configuración básica del automóvil eléctrico, profundizando en los sistemas de motorización, control y alimentación. Se mencionan las ventajas que tienen los vehículos híbridos eléctricos respecto a los vehículos que solo cuentan con motor de combustión interna o motor eléctrico. Así como la descripción de la configuración serie y configuración paralelo de los vehículos híbridos eléctricos.

El capítulo cuatro resalta la importancia que tiene la electrónica en los automóviles actualmente. Ofrece una introducción sobre los microcontroladores PIC y su uso en los diferentes sistemas del vehículo. También se describe el protocolo de comunicación Bus CAN, debido a que este es el más utilizado en la industria automotriz.

El capítulo cinco está dedicado a la descripción del desarrollo del control del motor generador para un vehículo híbrido eléctrico. Se describe el hardware utilizado y el desarrollo del firmware para el microcontrolador.

El capítulo seis ofrece los resultados y conclusiones obtenidos en el desarrollo del control.

Finalmente se presenta la bibliografía consultada para la redacción de este trabajo y en el Apéndice A se incluyen las hojas de especificaciones del microcontrolador utilizado.

1. Problemática actual

Durante siglos el trabajo humano y animal, además del empleo de la madera como combustible, constituyeron las primeras fuentes de energía complementadas por molinos hidráulicos y otros dispositivos movidos por las caídas de agua y la energía del viento.

La Revolución Industrial y el invento de la máquina de vapor dan lugar al uso del carbón como la fuente de energía más común en la mayoría de los sectores productivos. El uso de los hidrocarburos como energéticos se inicia a principio del siglo XX y gradualmente estos van desplazando al carbón hasta convertirse en la fuente de energía primaria más importante.

El consumo de energía por habitante, que había aumentado lentamente durante siglos, crece de manera rápida en las sociedades industrializadas, sobre todo debido a la utilización de la energía concentrada en los combustibles fósiles y a la sustitución de la fuerza muscular del hombre y de los animales por máquinas (máquina de vapor, motores de combustión interna, generadores y motores eléctricos, etc.).

Actualmente una gran parte de la economía globalizada está directamente relacionada con la capacidad de transporte de personas y mercancías en una región determinada o entre distintos puntos geográficos. Asimismo, el crecimiento económico ha favorecido la concentración de una mayoría de la población en las grandes urbes, lo que ha generado considerables problemas sociales, ambientales, económicos, así como de movilidad y accesibilidad en las grandes ciudades.

Recientemente el medio ambiente juega un papel cada vez más importante a la hora de definir estrategias de movilidad y por lo tanto de transporte, de esta forma se han tomado medidas para que el desarrollo económico y de las infraestructuras de transporte se lleve a cabo ordenadamente y procurando respetar el entorno.

Una de las preocupaciones principales en las grandes ciudades es el tráfico y la mejora de la movilidad urbana e interurbana. Una carga de tráfico muy grande se traduce como un efecto negativo sobre la población en la zona afectada, originando congestión y emisiones de CO₂ que reducen la calidad del aire y dan lugar al efecto invernadero. La defensa de la calidad de vida frente al crecimiento del parque automovilístico exige un importante esfuerzo de todos los sectores de la sociedad en conjunto con los diferentes organismos de gobierno.

Tradicionalmente se ha defendido la existencia de una relación compleja y muy estrecha entre el crecimiento económico y el transporte. Esta relación se basa en una retroalimentación mutua en la que el crecimiento en el transporte impulsa el crecimiento económico y viceversa, de esta forma, la economía y el transporte tienen efectos directos e indirectos sobre el desarrollo, la productividad y el crecimiento económico de la población.

En los últimos años se ha tomado consciencia sobre el impacto negativo al medio ambiente que el crecimiento económico trae consigo. Generalmente el modo de

entender el crecimiento económico se basaba en una explotación masiva de recursos naturales y el consumo de energía por encima de las tasas de renovación. Así, el crecimiento económico ha estado acompañado de una progresiva degradación ambiental. En el terreno del transporte sobre todo, como actividad propia de la economía, existe una tendencia a reducir su impacto negativo al ambiente.

La falta de sustentabilidad económica, social y ambiental que generan los modelos tradicionales del transporte, han llevado al desarrollo de distintas respuestas que se han reunido bajo el paraguas del concepto de transporte sustentable. El concepto de transporte sustentable se encuentra dentro del marco del desarrollo sustentable y de la tendencia de desvinculación del crecimiento económico con la degradación ambiental. A grandes rasgos, el transporte sustentable se identifica con la idea de reducir el transporte cuando sea posible, mejorar la movilidad y aumentar la eficiencia.

En esta parte del trabajo se identifican los impactos económicos, sociales y ambientales de los modelos de transporte tradicional y las implicaciones económicas derivadas de la adopción de medidas de transporte sustentable. Para ello se describen las tendencias actuales del transporte y se identifican los principales aspectos de las insustentabilidad de los mismos. A continuación se introducen los principios del transporte sustentable y se presentan algunas iniciativas y medidas aplicadas en este sentido.

1.1. Tendencias actuales del transporte

Para dar una respuesta económica, social y ambientalmente sustentable a los problemas que presentan los sistemas tradicionales de transporte, es necesario conocer como los distintos medios de transporte tienden a cubrir las demandas de desplazamiento de bienes y personas. La identificación de los puntos débiles de los modelos de transporte actual, así como de las necesidades y las tendencias de las estadísticas ayudarán al diseño de sistemas de transporte sustentable que, corrigiendo dichas debilidades, cubran la demanda real.

La tendencia general del transporte sigue una trayectoria de crecimiento ascendente en todos sus sectores. Un caso particular es el del transporte por carretera que constituye la mayor contribución al número de desplazamiento. Según un estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en los países miembros el transporte por carretera en 1990 era el responsable del 82% del consumo de energía final por transporte. En otros muchos países como Pakistán, Argentina, Brasil o México, este porcentaje es incluso más alto que la media de los países de la OCDE. El transporte por vía aérea ocupa el segundo puesto en consumo de energía con un 13%, y su tasa de crecimiento es mayor que para cualquier otra modalidad de transporte.

1.1.1. Transporte por carretera

Entre 1950 y 1990 el número de vehículos motorizados por carretera creció nueve veces, desde 75 millones hasta 675 millones, en su mayor parte vehículos destinados al desplazamiento personal (automóviles y motocicletas), suponiendo

casi el 80% del total en esas cuatro décadas. En este mismo período la población mundial se duplicó y aunque el número de propietarios de un automóvil creció en 450 millones, el número de personas sin automóvil propio se incrementó mucho más, aproximadamente en 2 mil millones.

Según la tendencia actual se estima que en las próximas tres décadas el número de personas con un automóvil propio se incrementará en 800 millones, sin embargo, habrá un incremento en términos absolutos mucho mayor del número de copropietarios. Así, la mayor parte de los desplazamientos cotidianos que se realicen en países en vías de desarrollo se realizarán probablemente a pie o en bicicleta. En general, se espera un mayor crecimiento de la actividad del transporte pesado por carretera que del transporte ligero.

1.1.2. Transporte por tren

A nivel global el volumen de desplazamientos por tren ha seguido una tendencia descendiente generalizada, lo que demuestra un relativo abandono del tren tradicional como modo de transporte.

Por otro lado, el transporte de mercancías, medido en toneladas-kilómetro, también ha descendido de forma generalizada a pesar de que el transporte de mercancías ha aumentado en términos absolutos. Esta tendencia de nuevo marca el abandono del tren como medio regular de transporte.

Sin embargo estas tendencias varían entre distintas regiones, así por ejemplo, el número de personas-kilómetro de desplazamiento por tren en Europa occidental mostró una trayectoria ascendente desde 1970 al año 2000, con un aumento del 50% en este período.

1.1.3. Transporte marítimo

Existen más de dos mil puertos alrededor del mundo incluyendo desde pequeños embarcaderos que manejan unos cientos de toneladas de mercancía al año, hasta grandes infraestructuras multifuncionales que manejan hasta 300 millones de toneladas al año.

El volumen del transporte marítimo sigue una trayectoria ascendente. A escala mundial, el tráfico internacional se incrementó desde los 2566 millones de toneladas en 1970 hasta 5885 millones de toneladas en el 2000. La tasa media de crecimiento para el año 2000 se estimó en un 3.6%. Sin embargo, el crecimiento anual e tráfico marítimo mundial fue desigual geográficamente. Por ejemplo, Estados Unidos, Europa y Japón registraron tasas de crecimiento superiores a la media, entre el 4% y el 5%. En los países desarrollados, las mercancías cargadas y descargadas en el año 2000 fueron del 42.5% y 62.4% respectivamente del volumen total mundial, del que los crudos y los productos del petróleo embarcado supusieron un 6.2% y un 23.4% de las exportaciones mundiales totales. El aumento del comercio internacional es especialmente importante en el sector marítimo y se espera un crecimiento en los indicadores del mismo en los próximos años.

1.1.4. Transporte urbano

La creciente concentración de población en áreas urbanas, especialmente en países en vías de desarrollo, convierte al transporte urbano en una de las preocupaciones centrales en el desarrollo de sistemas sustentables de transporte en las ciudades. Es importante que las soluciones estén basadas en una caracterización rigurosa de dicho transporte.

En los países desarrollados, la alta tasa de posesión de vehículos junto con la elevada expansión de las ciudades, ha provocado que los habitantes dependan casi por completo del transporte privado. Por un lado, el costo elevado del suelo en el centro de las grandes urbes, que es donde normalmente se concentran las principales actividades económicas; así como las ventajas que ofrece un automóvil propio, hacen que el modelo de las ciudades sea muy expansivo, aumentando las distancias de desplazamiento. Por otro lado, las más bajas densidades de población en las áreas metropolitanas no siempre hacen rentable el transporte público, que en estas zonas puede ser deficiente en cuanto a disponibilidad y recorridos, fomentando la dependencia del transporte privado.

En las ciudades de los países en desarrollo, que crecen a ritmos muy acelerados, las tasas de crecimiento del número de vehículos son incluso superiores a las de crecimiento de población. Debido a la deficiencia del transporte público, derivada de la falta de presupuesto, la dependencia del transporte privado es muy alta. En estos países, donde los desplazamientos urbanos pueden ser muy largos debido a las dimensiones de las ciudades, las capas sociales más desfavorecidas, sin posibilidad de adquirir un automóvil propio, están en clara desventaja para acceder a sus lugares de trabajo.

Dado el reconocimiento de la incapacidad del sector público para financiar y proporcionar servicios adecuados de transporte urbano, el sector público está relegando progresivamente los servicios e infraestructuras de transporte colectivo al sector privado. Se estima que aproximadamente el 80% de los servicios de transporte urbano por autobús se gestionan y pertenecen al sector privado.

El ritmo de crecimiento así como el aumento en la distancia de desplazamientos en las ciudades sobrepasa la capacidad de cubrir la demanda de infraestructura creada por el transporte privado individual, de esta forma, cada vez se tienen mejores sistemas de transporte colectivo.

1.2. Insustentabilidad de los sistemas de transporte tradicionales

Los modelos tradicionales de transporte están incurriendo en situaciones tanto económica como ambientalmente insustentables. Por un lado la actividad del transporte tradicional implica patrones de consumo de energía y recursos que comprometen la integridad de los ecosistemas; por otro lado, los modos de tarificación del transporte son señalados como una de las principales causas por las que el modelo tradicional resulta insustentable desde el punto de vista económico.

A continuación se describen más a fondo los diversos tipos de insustentabilidad de los sistemas tradicionales de transporte.

1.2.1. Insustentabilidad ambiental

1.2.1.1. Dependencia de los combustibles fósiles

El consumo de energía por parte de los sistemas de transporte mundial procede en un 99% (96% según el World Business Council for Sustainable Development-WBCSD por sus siglas en inglés- Mobility Project) de los combustibles derivados del petróleo. A su vez el 50% del consumo total de energía corre a cargo del transporte. Después de la caída del consumo en los 80, el uso del petróleo ha vuelto a aumentar, en gran parte debido a la industrialización de países no miembros de la OCDE y al aumento de la necesidad de desplazamiento en todo el mundo.

En los países miembros de la OCDE los esfuerzos por reducir el consumo de petróleo en usos distintos al transporte se han visto afectados por el aumento de este consumo en un 2% en dicho sector, teniendo como resultado una tasa decrecimiento del 1% en el consumo de petróleo. Este aumento global es incluso tres o cuatro veces mayor en los países menos desarrollados. Esto se traduce en que los esfuerzos de sustitución de combustibles derivados del petróleo en otros sectores se ven contrarrestados por el consumo energético en el transporte.

Dado que el petróleo es una fuente de energía no renovable que se está explotando a una tasa mayor a su capacidad de recuperación, según los yacimientos conocidos y la estructura actual de costes de extracción, el uso actual de este recurso en el transporte es insostenible en términos de empleo de recursos. Las discusiones en este campo giran en torno a los horizontes de agotamiento de los recursos en función de las tasas de explotación y de descubrimiento de nuevos yacimientos disponibles.

1.2.1.2. Impacto ambiental debido al uso de hidrocarburos en el transporte.

El uso de combustibles de origen fósil en la industria del transporte trae consigo la emisión de partículas nocivas para el ambiente, principalmente monóxido de carbono (CO), componentes orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno.

Las emisiones de CO se deben a la combustión incompleta del carburante (gasolina o diesel) por falta de suficiente oxígeno.

Los componentes orgánicos volátiles tienen su origen en la evaporación de la gasolina, ya sea en el depósito del vehículo o en la cámara de combustión.

Los óxidos de nitrógeno se producen por la oxidación del nitrógeno del aire durante la combustión. Sus efectos directos, a los niveles actuales, no son importantes pero sus efectos secundarios contribuyen a la producción de ozono y de smog fotoquímico en presencia de luz solar y de componentes orgánicos volátiles.

1.2.1.3. Cambio climático

Si bien este es un tema un tanto controversial debido a la polémica que se ha generado alrededor en los últimos años, es bien sabido que el consumo de combustibles fósiles como fuente de energía en el transporte supone la emisión de diversas sustancias a la atmósfera, aumentando los niveles de contaminación y acelerando el cambio climático. La causa del calentamiento global obedece al aumento del contenido de gases en la atmósfera que contribuyen a intensificar el efecto invernadero y, especialmente, el incremento de la cantidad de dióxido de carbono.

El mayor impacto global derivado del transporte se debe a la emisión de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y clorofluorcarbonados a la atmósfera. Los esfuerzos dedicados a mejorar la eficiencia energética en el sector industrial se han visto descompensados por el aumento en el número de kilómetros de desplazamiento en los transportes. En muchos países las mejoras tecnológicas en la eficiencia energética de nada han servido frente al aumento de tamaño y potencia de los vehículos. Entre 1973 y 1988, las emisiones de CO₂ derivadas del transporte crecieron un 30% a escala mundial hasta 773 millones de toneladas, mientras que las derivadas de otras actividades humanas disminuyeron en un 2% hasta 1969 millones de toneladas a pesar de que la población mundial creció en esos mismos 15 años en un 35%.

Se estima que el aumento en el consumo de combustibles fósiles entre 1994 y 2010 fue de 35% en los países miembros de la OCDE, dicho incremento se traduce en el aumento de las emisiones de CO₂ a pesar de que las advertencias del Panel Intergubernamental de Cambio Climático establecen que sería necesaria una reducción en un 50-70% para estabilizar la concentración de CO₂ a niveles aceptables.

Las respuestas a esta situación apuntan hacia una mejora radical de la eficiencia del uso de combustibles fósiles, un cambio del tipo de combustible empleado y una importante reducción de la actividad de transporte.

Además de las emisiones de CO₂ como gas invernadero, la actividad del transporte genera otro tipo de contaminantes, entre ellos figuran los óxidos de nitrógeno que se generan durante la combustión de carburantes en la aviación a elevadas altitudes; estos óxidos, debido a la conversión fotoquímica se convierten en ozono, que a la altura de crucero de los aviones actuales, ejerce como gas de efecto invernadero.

1.2.1.4. Consumo de recursos

Además del consumo de combustibles fósiles, el transporte supone el consumo de otros recursos y la generación de residuos.

Por ejemplo, considerando toda la cadena de producción de un vehículo utilitario, desde la minería hasta el producto terminado, se necesitan de 25 a 30 toneladas de diversos materiales para su fabricación. Además de que durante la fase de

fabricación se producen unos 800 kg de materiales residuales por vehículo fabricado, aunque mucho de ello puede ser reciclado.

Por otro lado, el uso de plásticos y componentes electrónicos hace a los vehículos más difíciles de reciclar. Sin embargo, se está avanzando mucho en la imposición a productores e importadores de la responsabilidad de tratamiento de los residuos finales de sus productos. Esta responsabilidad de los fabricantes asegura que la fabricación de nuevos vehículos se desarrolle con materiales totalmente reciclables.

1.2.1.5. Contaminación del agua

El impacto de la actividad del transporte sobre la calidad del agua es más bien indirecto. Durante el normal funcionamiento de los vehículos se producen emisiones de productos químicos peligrosos y este riesgo es especialmente alto en caso de accidentes. Además, la eliminación indebida de aceites lubricantes es una fuente muy grande de contaminación del agua superficial así como de los mantos freáticos.

Las obras de infraestructura directamente relacionadas con el transporte, como carreteras y estacionamientos, suponen extensas áreas impermeabilizadas que interrumpen la absorción y filtración del agua de lluvia, aumentando el riesgo de inundaciones y con ello el arrastre de contaminantes a los cursos de agua.

El transporte marítimo tiene muchos más efectos directos en la calidad de agua debido a las fugas, hundimientos y otras operaciones de los buques. Como ejemplo podemos mencionar el hundimiento de buques petroleros como el Exxon-Valdez en 1989, el Erika en 1999 o el Prestige en 2003. Estos accidentes tienen repercusión a largo plazo y afectan a la economía de regiones pesqueras enteras y al modo de vida de miles de familias que dependen de la actividad pesquera así como de otras actividades económicas tales como el turismo, del cual también depende gran parte de la economía en zonas costeras.

1.2.1.6. Ocupación del suelo

El transporte representa grandes demandas de ocupación del suelo, no solo en las redes de carreteras sino también en otras obras de infraestructura auxiliares como estacionamientos, aeropuertos o instalaciones de fabricación y mantenimiento.

En zonas rurales, las obras relacionadas con el transporte causan la fragmentación y/o destrucción de hábitats naturales alterando el equilibrio ecológico. En áreas urbanas el porcentaje es mucho mayor, normalmente el porcentaje de la superficie dedicada a calles en una ciudad moderna es de entre 25% y 35%, mientras que en ciudades más antiguas, diseñadas antes del desarrollo del transporte motorizado, este porcentaje apenas alcanza un 10%. Estos datos no incluyen a las áreas dedicadas a las obras de infraestructura auxiliares, como estacionamientos y lugares de servicio. Esto se refleja en una alteración considerable sobre las tasas de reflexión o absorción de las radiaciones de un lugar específico, lo que trae como consecuencia un cambio en el microclima de dichos lugares.

Por otro lado, la expansión urbana de las ciudades con la creación de grandes áreas metropolitanas es posible gracias al desarrollo del transporte y, recíprocamente,

dicha expansión demanda la creación de infraestructura y servicios. De esta forma podemos concluir que las medidas gubernamentales relacionadas con el uso y distribución del suelo no siguen patrones de sustentabilidad en cuanto a transporte se refiere.

1.2.2. Insustentabilidad financiera

La insustentabilidad financiera de los modelos tradicionales de transporte reside en el hecho de que el usuario no cubre todo el costo generado por la actividad del transporte. Además existen factores externos, como el social y el ambiental, que no quedan reflejados en el precio del transporte.

Es difícil calcular el costo neto del transporte, sobre todo si se incluyen los costos intergeneracionales, es decir, el impacto que el transporte ha tenido sobre la economía, el ambiente y la sociedad de una región determinada a lo largo de los años. Diversos estudios han estimado el costo de los daños derivados del cambio climático, del deterioro en la capa de ozono, de la formación de ozono a nivel troposférico, de la emisión de sustancias particuladas, así como de la vibración, del ruido, del cambio de los usos del suelo, o del consumo de recursos sobre la salud y sobre los ecosistemas por pérdida de diversidad biológica.

Por estas razones el transporte aún resulta insustentable financieramente hablando, por esto deben crearse políticas que incluyan a los factores externos previamente señalados dentro del transporte, de esa forma el usuario estaría absorbiendo una parte del costo indirecto, lo cual en principio es más viable para la industria.

1.2.3. Insustentabilidad social

A continuación se describen los dos principales factores sociales que hacen insustentables a los sistemas de transporte actuales.

1.2.3.1. Accidentes

Los costos relacionados con los accidentes derivados del transporte resultan significativos y normalmente no solo afectan a los usuarios del transporte. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2000, hubo 1.2 millones de muertes relacionadas con accidentes viales, lo que representa un 2.3% del total de defunciones anuales. Más del 90% de estas muertes ocurren en países de medio y bajo ingreso donde las tasas de fallecimiento casi doblan a las de los países ricos. Según datos del Banco Mundial el costo de los accidentes asciende a unos 500 mil millones de dólares de la economía mundial.

1.2.3.2. Congestión

El principal efecto negativo reflejado en el transporte, debido a la congestión, es que los vehículos transitan con una velocidad poco adecuada para su funcionamiento, por lo que el consumo de combustible es mayor y por lo tanto se incrementa el porcentaje de sustancias emitidas a la atmósfera. El encarecimiento de los transportes por la congestión, así como la reducción de la productividad humana causada por la enorme cantidad de tiempo invertida en el transporte, ya sea para

trasladarse de un lugar a otro o por congestionamientos viales, son muestras claras del impacto económico de los sistemas tradicionales de transporte.

El crecimiento de las ciudades trae consigo una expansión de las redes de carreteras, lo que en principio parecería reducir la congestión vial, sin embargo, dicha expansión resulta contraproducente pues aumenta el volumen vehicular y como consecuencia el impacto ambiental es mayor.

1.3. Principios del transporte sustentable.

Para sentar las bases de un sistema de transporte sustentable primero hay que definir el concepto de desarrollo sustentable el cual refleja una preocupación muy extendida sobre la preservación del medio ambiente y tiene su origen inmediato en la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente, creada en 1988 por la Asamblea General de las Naciones Unidas. Esta comisión presentó su reporte en 1987 en el que se expone el principio del desarrollo sustentable, el cual puede definirse de la siguiente forma:

“El desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”

Una vez expuestas las principales deficiencias de los modelos tradicionales de transporte y conociendo el principio del desarrollo sustentable, es necesario proponer soluciones eficientes que abarquen todos los aspectos previamente referidos, para esto es necesario definir el concepto de transporte sustentable.

En la conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (Río de Janeiro, 1992) los estados aprobaron la Agenda 21, basada en el trabajo previo de la Comisión Brundtland, *Our Common Future*, 1987. En este informe determinan los principios del desarrollo sustentable que afectan a los distintos sectores de la actividad humana. Así, el transporte sustentable es la aplicación de dichos principios en el sector del transporte.

Organismos como la OCDE o el Banco Mundial han elaborado definiciones que intentan caracterizar al transporte sustentable. A continuación se cita una definición cualitativa de la OCDE tomada de un documento publicado en 1996:

“Transporte que no pone en riesgo la salud pública o los ecosistemas y satisface las necesidades de movilidad y que además es consecuente con:

- *El uso de los recursos a una tasa por debajo de su tasa de regeneración.*
- *El uso de recursos no renovables por debajo de la tasa de desarrollo de sustitutos renovables”.*

En el mismo documento se enlista una serie de elementos cuantitativos que definen los objetivos de un transporte sustentable. Contienen los indicadores que reflejan las principales preocupaciones asociadas con la protección de la salud humana y los ecosistemas a largo plazo. Estos criterios se refieren a la reducción en los niveles de:

- Las emisiones de óxidos de nitrógeno.
- Las emisiones de componentes volátiles orgánicos.
- Las emisiones de partículas suspendidas.
- Las emisiones de CO₂ por consumo de combustibles fósiles.
- El uso del suelo por el transporte motorizado en las áreas urbanas.
- El ruido.

Por otro lado, el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD, por sus siglas en inglés) ofrece una definición de transporte sustentable más enfocada en los aspectos sociales:

“...capacidad para satisfacer las necesidades de la sociedad de moverse libremente, acceder, comunicarse, comercializar y establecer relaciones sin sacrificar otros valores humanos o ecológicos básicos actuales o del futuro”.

Diversos autores proponen que para poder definir a los sistemas de transporte como sustentables, deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Equidad intergeneracional como objetivo fundamental del desarrollo sustentable, es decir, que cada generación tome conciencia y se haga responsable por el impacto ambiental producto de sus actividades cotidianas.
- Multidimensional, esto es que contemple las tres dimensiones del desarrollo sustentable: desarrollo económico, social y ambiental.
- Dinamismo, es decir, tomar en cuenta que las necesidades de las sociedades varían en el espacio y el tiempo.
- Continuidad, esto es, procurar que el progreso hacia los sistemas sustentables sea en forma constante y continua.

En general, las medidas para lograr sistemas de transporte sustentable incluyen las nuevas tecnologías de telecomunicaciones para reducir el número de viajes, políticas eficientes en cuanto a la planeación del uso del suelo, sistemas de desplazamiento personal más limpios como el mayor uso del transporte público o la bicicleta y la promoción de iniciativas para compartir los vehículos particulares.

Es importante destacar la necesidad de involucrar a todos los sectores de la sociedad en la transición hacia un transporte sustentable. La responsabilidad debe recaer en los funcionarios públicos encargados de planificar el uso de suelo y crear políticas enfocadas en el transporte sustentable; así como en los empresarios que invierten en el transporte y los usuarios finales del mismo.

1.4. Medidas adoptadas para un transporte sustentable

Para realizar una selección racional de proyectos encaminados a la implementación de sistemas de transporte sustentable es necesario tomar en cuenta todos los costos internos y externos, incluyendo los costos del impacto ambiental y no solo el local sino también a nivel regional y global.

Para cuantificar los costos ambientales pueden aplicarse los siguientes criterios:

- a. El costo del impacto producido en la sociedad, por ejemplo, el costo de atender el daño producido en la salud de la población o el valor de la producción perdida a causa de los efectos ambientales.
- b. El costo de reducir la emisión de partículas hacia el ambiente a niveles tales que el daño sea mínimo de acuerdo con las normas vigentes y garantizar que la sociedad sea capaz de cubrir este costo.

Para desarrollar un sistema sustentable, en general, es necesario aplicar las siguientes acciones:

- Planear la distribución demográfica para estabilizar la población humana en función de los recursos disponibles en una región determinada.
- Limitar los desechos al medio ambiente al nivel de la capacidad de asimilación de ese medio.
- Explotar los recursos renovables a un ritmo que permita su reproducción.
- Explotar los recursos no renovables de tal forma que la disminución de las reservas quede compensada por los progresos técnicos del proceso de sustitución por recursos renovables.
- Aplicar el principio de que el contaminador debe asumir los costos asociados a la contaminación, de manera que haya un estímulo económico para reducir los impactos ambientales.

1.4.1. Efectos del uso eficiente de la energía

Es evidente que cualquier aumento de la eficiencia en la conversión y utilización de energía contribuirá a disminuir el impacto ambiental, ya que se requiere una cantidad menor de energía para producir determinada cantidad de trabajo útil.

Por otra parte, se ha comprobado en numerosos países que se puede mantener un desarrollo económico satisfactorio con un consumo de energía considerablemente menor por unidad de producto producido que en el pasado.

De acuerdo con una definición propuesta por la Conferencia Mundial de Energía, el término conservación de energía se emplea para designar todas las acciones enfocadas a lograr el uso más eficaz de los recursos energéticos finitos; estas acciones incluyen la racionalización del uso de la energía mediante la eliminación de los actuales despilfarros y el aumento en la eficiencia en el uso de la energía gracias a la reducción del consumo energético específico, sin sacrificar la calidad de vida y utilizando para ello todas las medidas posibles, incluso la sustitución de una forma de energía por otra. El objetivo de la conservación de energía es optimizar la relación global entre consumo de energía y crecimiento económico.

El interés por la conservación de la energía está relacionado con la rápida elevación de los precios internacionales del petróleo y, en general, de la energía en los años setenta. La disminución de los precios del petróleo en los años ochenta redujo los incentivos económicos para el ahorro de energía; en cambio, la creciente preocupación por los efectos de la contaminación debida a la producción, transformación y utilización de energía constituyó la motivación principal para desarrollar los proyectos de conservación de energía.

Los recursos energéticos pueden utilizarse más eficazmente aplicando medidas que son realizables desde el punto de vista técnico, justificables desde el aspecto económico, especialmente con precios elevados de la energía tal como sucede a principios del siglo XXI; y convenientes desde la perspectiva ambiental.

La conservación de la energía puede lograrse generalmente a tres niveles:

- El primero corresponde a la eliminación de gastos excesivos de energía, que puede lograrse con inversiones mínimas utilizando adecuadamente las instalaciones existentes.
- El segundo nivel consiste en la modificación de las instalaciones existentes para mejorar su eficiencia energética.
- El tercero corresponde al desarrollo de nuevas tecnologías que permitan un consumo de energía menor por unidad de producto producido.

La conservación de energía puede considerarse como una fuente de energía alternativa ya que implementación evita ampliar el consumo de energéticos, sin que esto implique una reducción de la actividad económica o de la calidad de vida.

1.4.2. Medidas políticas

Ante el creciente reconocimiento de la necesidad de un transporte sustentable, distintas organizaciones e instituciones están trabajando con distintos grados de compromiso y diferentes áreas de enfoque hacia el desarrollo de sistemas de transporte sustentable.

La OCDE como organización que engloba a los países más industrializados, comenzó en 1994 un proyecto internacional para definir el camino hacia el Transporte Ambientalmente Sustentable (EST Project). La intención del proyecto es mostrar las estrategias a seguir para el desarrollo de sistemas de transporte sustentable y cual sería el impacto social y económico teniendo en cuenta el impacto ambiental a largo plazo. Está dirigido a funcionarios públicos y actores políticos con el fin de establecer objetivos y estándares mensurables.

La OCDE ha dado prioridad a la dimensión ambiental para dar paso al desarrollo de sistemas de transporte sustentable.

1.4.3. Iniciativas privadas a escala internacional

El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD por sus siglas en inglés) desde el año 2000 desarrolla, junto con las empresas más grandes de la industria automotriz y de energía, un proyecto de movilidad sustentable. Las empresas participantes son: British Petroleum, Daimler-Chrysler, Ford, General Motors, Honda, Michelin, Nissan, Norsk Hydro, Renault, Shell, Toyota y Volkswagen.

El proyecto engloba 10 corrientes de trabajo diferentes:

- **Indicadores de sostenibilidad:** intentan definir la movilidad sustentable y sirven para hacer el seguimiento de las otras corrientes de trabajo hacia los objetivos del proyecto.

- **Diseño de vehículos y tecnología:** determina como la tecnología y el diseño afectará a la sustentabilidad del transporte.
- **Combustibles:** establece el impacto que tendría en los sistemas de transporte tradicionales un cambio en los combustibles empleados.
- **Infraestructura:** determina las exigencias en infraestructura derivadas de los cambios en diseño y tecnología, así como el cambio de combustibles.
- **Demanda personal de movilidad:** estudia como los cambios tecnológicos, el crecimiento de la población y el ingreso, así como la distribución de la urbanización, cambiarán las demandas del transporte individual.
- **Demanda de transporte de bienes y servicios:** analiza como los cambios de estructura, logística, etc., impactarán en la demanda de bienes y servicios.
- **Medidas políticas:** identifica las medidas políticas disponibles para influenciar las demandas de movilidad tanto personal como de bienes y servicios. Identifica barreras institucionales y sugiere como podrían ser superadas.
- **Movilidad urbana:** describe como las demandas de movilidad evolucionarán en los próximos 30 años en las ciudades.
- **Movilidad a larga distancia:** estudia como será la movilidad en las ciudades en un plazo de 30 años.

1.4.4. Medidas tecnológicas

Dadas las presiones sociales, los avances tecnológicos y las ventajas derivadas de la adopción de medidas ambientalmente sustentables, muchas compañías de transporte han optado por incorporar medidas mucho menos agresivas con el medio ambiente. El alcance de estas medidas y el impacto positivo que traen consigo debe ser valorado sumando los esfuerzos globales y creando sinergias

La introducción de sistemas electrónicos de inyección, catalizadores, motores multiválvulas e inyección directa en vehículos diesel ha contribuido sustancialmente al desarrollo de motores de baja emisión en automóviles comerciales.

Sin embargo, la línea de actuación que puede ser más efectiva para la reducción de las emisiones en el transporte es la sustitución de combustibles. En este sentido, ya se están comercializando vehículos con tecnología híbrida que combina combustibles fósiles con celdas de hidrógeno, así como células de combustible y motores eléctricos.

El ruido, causado por los malos hábitos de conducción o sobrecarga de los vehículos, se está tratando de reducir mediante una mejor planeación de la infraestructura en las ciudades y sus alrededores; así como con nuevos diseños de llantas para los automóviles.

Los clorofluorcarbonados están siendo sustituidos progresivamente por hidroclorofluorcarbonados, que aunque son menos perjudiciales, todavía representan un daño para la atmósfera.

1.5. Implicaciones económicas de un transporte sustentable.

Tradicionalmente muchos de los argumentos en contra de la adopción de medidas de transporte sustentable han sido económicos. A pesar del reconocimiento de la insustentabilidad de los modelos de transporte tradicionales, la incertidumbre sobre las consecuencias económicas que el cambio hacía modelos de transporte sustentable traería consigo, representa un freno para la puesta en marcha de iniciativas concretas y la adopción de políticas más amplias e integradoras.

Las implicaciones económicas del cambio de las tendencias actuales del transporte hacia un transporte sustentable social, ambiental y económicamente, son complejas de valorar. Sin embargo, recientemente, los estudios de iniciativas y la aplicación de políticas enfocadas al desarrollo sustentable en distintos países han mostrado que el uso de nuevos modelos de transporte si representa ventajas económicas.

1.5.1. Uso de vehículos eléctricos

El primer efecto favorable del automóvil eléctrico es la baja o nula contaminación directa en su utilización. A diferencia de los automóviles de combustión cuyo movimiento se produce a consecuencia de la quema de combustibles pesados orgánicos que trae como consecuencia la emisión de CO, el automóvil eléctrico no interviene en forma directa en el aumento de la contaminación en las ciudades y por lo tanto en el aumento del efecto invernadero en el planeta.

Sin embargo para que la comparación de emisiones contaminantes entre los dos tipos de vehículos sea válida se debe comparar el ciclo completo de emisiones, es decir, desde la producción de la energía requerida hasta la utilización directa por el vehículo. Así por ejemplo, mientras el automóvil eléctrico no genera contaminación alguna durante el movimiento del vehículo si la genera durante el ciclo de producción de la energía eléctrica necesaria para recargar las baterías del mismo. Cabe señalar que esta contaminación se localiza en un sitio determinado por lo que es más fácil de controlar.

1.6. Situación actual en México

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, en el Distrito Federal habitan 8.8 millones de personas; la principal concentración urbana del país se encuentra en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con alrededor de 20 millones de habitantes, en esta región se generan poco más de 22 millones de viajes al día, 60% de ellos dentro del Distrito Federal. El transporte, en consecuencia, contribuye con casi la mitad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del consumo de combustibles fósiles. El *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2004* señala que los autos particulares representaron en ese año el 94% de las unidades destinadas al transporte de personas. El parque vehicular de autos particulares se duplicó en seis años.

Por lo anterior, la ampliación y la mejora del transporte público, la transformación de la tecnología vehicular para el aprovechamiento de combustibles alternativos y la ampliación de la infraestructura y el cambio en los hábitos de uso de transporte hacia la movilidad no motorizada, constituyen un grupo de acciones y políticas

públicas que se proponen, a la vez, garantizar la movilidad de bienes y personas y reducir las emisiones de GEI a la atmósfera.

En México el 72% de las emisiones de GEI en 2002 (alrededor de 389 millones de toneladas de CO2 equivalente) resultan de actividades asociadas con la producción, transformación, transporte y uso de energía. Más del 75% de la electricidad en nuestro país se genera a partir de combustibles fósiles. En el Distrito Federal cerca del 90% de las emisiones estimadas de GEI en 2007 (37 millones de toneladas de CO2 equivalente) se atribuye directamente al sector de la energía. Las acciones de mitigación de las emisiones de GEI en el Distrito Federal incluyen medidas de ahorro y uso eficiente de la energía, promoción de la utilización de energía solar y, de manera creciente, promoción de la generación de electricidad utilizando fuentes renovables de energía, como la hidráulica y la bioenergía.

Las sociedades urbanas modernas se caracterizan por la gran movilidad de sus pobladores y por la necesidad constante de transporte de los productos y los servicios que se requieren cotidianamente. Esta movilidad implica un creciente consumo de energía en forma de combustibles fósiles los cuales, al transformarse para mover los vehículos, tienen impactos ambientales locales, regionales y globales.

De acuerdo con los datos de la *Tercera Comunicación Nacional presentada por México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, y del *Inventario Nacional de Emisiones 1990-2002*, nuestro país contribuye con cerca del 1.5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, estimándose en poco más de 643 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalentes (tCO₂eq) con lo que se ubica en el lugar 12 entre los países con mayores emisiones a nivel mundial.

Se ha estimado que la Zona Metropolitana del Valle de México aporta el 9% de las emisiones nacionales de GEI, ya que durante 2006 se emitieron 58.9 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente, de las cuales corresponden al Distrito Federal el 61%, 36.2 millones de toneladas. De acuerdo con los inventarios de emisiones de GEI realizados para el Distrito Federal el sector transporte es el principal emisor, con una participación del 43%, seguido por el sector industrial con 22%, por el residencial con 13% y por los residuos sólidos con 11%. (Figura 1.1.)

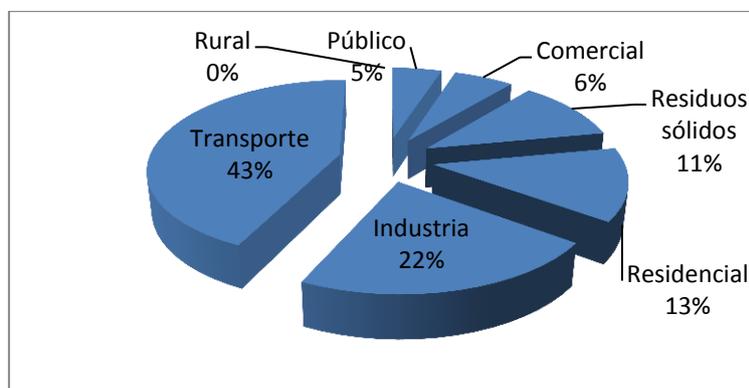


Figura 1.1. Aportación de bióxido de carbono por los diferentes sectores en el Distrito Federal.

En el Distrito Federal, como en cualquier otro centro urbano, convergen necesidades de movilidad de personas y de carga para un conjunto muy amplio de actividades. La demanda de viajes en el DF es de aproximadamente 12,848,000 al día (INEGI, 2007). Se ha estimado que el 55% de estos viajes se realizan en microbuses y combis; el 17% en vehículos particulares; el 14% se hacen en el metro, 9% en autobús, 5% en taxis y 1% en transporte eléctrico (SETRAVI, 2002). De acuerdo con la *Encuesta Origen Destino 2007*, de los viajes producidos en el DF, el 83% son locales y 17% tienen su destino en el Estado de México. De los viajes originados en el Estado de México, el 24.3% tienen su destino en el DF

El padrón vehicular de la ciudad ascendía a 2,804,275 unidades en 2005, de las cuales 2,592,621 son automóviles particulares, 29,917 corresponden al transporte público colectivo, 106,763 al transporte público individual (taxis) y 74,974 a vehículos de carga.

Los vehículos que transitan por el DF utilizan primordialmente fuentes de energía de origen fósil, con emisiones significativas de GEI. El mayor consumidor de energía en el DF es el transporte. Para el año 2000 el consumo de este sector representó el 49% del total del consumo energético de la ciudad; y su aportación a las emisiones de GEI fue del 37%.

Considerando que el transporte es parte importante de las actividades cotidianas que se realizan en la ciudad, el tema ha sido abordado ampliamente por el gobierno del Distrito Federal para diseñar líneas de acción que ayudarán a la reducción de los GEI emitidos.

1.6.1. Líneas de acción

El gobierno plantea cuatro líneas de acción para el sector transporte:

- **Mejoramiento del sistema de transporte público.** El desarrollo y mejora de alternativas del transporte público comprende acciones relacionadas con el desarrollo de infraestructura, el cambio tecnológico y otras medidas complementarias, con el objetivo de que este tipo de transporte absorba un porcentaje creciente de la movilidad que actualmente se realiza a través de los vehículos individuales.
- **Mejoramiento del sistema de transporte de carga.** Esta línea de acción implica una modernización de la administración de flotillas vehiculares, incluyendo gestión de combustible, mantenimiento, parámetros de compra de vehículos nuevos, logística de desplazamientos y profesionalización de los operadores.
- **Tecnología de vehículos, combustibles y regulación.** Esta línea de acción comprende el uso de tecnología de mayor rendimiento, el uso de combustibles con menores factores de emisión de GEI, así como las regulaciones correspondientes.

- **Movilidad alternativa y desarrollo urbano.** Esta línea de acción comprende acciones de planeación y regulación del uso del suelo para aminorar la necesidad de movimientos en largas distancias dentro de la ciudad, así como la promoción de medios de movilidad alternativa al transporte motorizado.

Además de estas líneas de acción el gobierno propone la realización de proyectos piloto para probar tecnologías limpias y evaluar la mejor para renovar unidades, al igual que privilegiar el transporte colectivo eficiente, no contaminante y de calidad.

Tomando en cuenta las propuestas del gobierno, se describe la posible introducción de vehículos eléctricos en el transporte del país.

1.6.2. Vehículos eléctricos en México

Los vehículos eléctricos tienen una eficiencia energética aproximadamente tres veces mayor por kilómetro que los vehículos a gasolina; sin embargo, su elevado costo de adquisición inicial exige que se conduzcan al menos 195 km por día para tener un ahorro comparativo con vehículos convencionales. Éste kilometraje diario disminuye en la medida que el precio de la gasolina aumenta, y el precio de los vehículos eléctricos se reduce cuando los fabricantes logran acceder a una expansión en su producción.

Como toda transición a una nueva tecnología, ésta implica una serie de retos. Entre las medidas necesarias para poder incorporar exitosamente vehículos eléctricos al transporte en México se encuentran:

- Llevar a cabo programas educativos que documenten el costo y los beneficios sociales
- Permitir que el precio de la gasolina se iguale a los niveles internacionales (incrementar su precio), lo que ocasiona cierta ventaja para los vehículos eléctricos.
- Implementar tarifas eléctricas más bajas por tiempo de uso
- Desarrollar una normatividad en materia de la instalación de estaciones de recarga

En 2011, el número total de vehículos en circulación en México creció en un 11%. La mitad de estos vehículos adicionales fueron vehículos usados importados, los cuales contaminan más que un vehículo nuevo. A este ritmo, el número total de vehículos se duplicará cada siete años, exigiendo más gasolina y generando más emisiones de gases de efecto invernadero, a menos que el gobierno implemente políticas que hagan atractivo el uso de vehículos y transportes masivos que operen de manera más limpia.

Una de las principales razones para una transición a vehículos híbridos es su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo en los últimos años se ha cuestionado dicho potencial, por el hecho de que actualmente el principal método de generación de energía eléctrica es la quema de combustibles fósiles, y por lo tanto la utilización de vehículos eléctricos solo podría cambiar el lugar y tiempo de las emisiones de gases de efecto invernadero, más no disminuir la cantidad.

La energía eléctrica produce 64% más CO₂ por kWh que la energía obtenida por combustión de gasolina. Por cada kWh de energía eléctrica se generan en México 494 g de CO₂, mientras que por cada kWh de energía por combustión de gasolina se generan 300g de CO₂.

Una vez determinadas las emisiones por kWh, es necesario examinar la eficiencia con la que los vehículos utilizan dicha energía y la transforman en movimiento. Comparando la eficiencia energética de un vehículo a base de gasolina y la de un vehículo híbrido, se puede determinar que el vehículo de gasolina consume 0.80 kWh por km recorrido, mientras que el vehículo eléctrico consume 0.22 kWh, menos de una tercera parte. La significativa diferencia de eficiencia se debe a la pérdida de energía que el motor de combustión interna presenta al convertir la energía almacenada en movimiento. Adicionalmente, y a diferencia del motor de gasolina, el motor eléctrico sólo consume energía cuando el vehículo está en movimiento y utiliza la energía de frenado para regenerar su batería, siendo lo anterior especialmente relevante en condiciones de manejo urbano.

El vehículo de gasolina emite 240 g de CO₂ por cada km que recorre, mientras que el vehículo eléctrico emite sólo 111g. Así, cada vehículo eléctrico ahorrará 1 Kg de CO₂ por cada 10 km recorridos en comparación con el de gasolina.

Para los posibles usuarios de vehículos eléctricos es de vital importancia saber si el gasto en energía eléctrica de un vehículo eléctrico es menor que el gasto en combustible de un vehículo con motor de combustión interna.

Como se mencionó anteriormente la energía eléctrica es más cara que la proveniente de combustión fósil, pero es debido a su eficiencia energética que los vehículos eléctricos ahorran un 48% del gasto en energía requerido por los vehículos de gasolina.

El costo por kWh de la energía eléctrica es considerablemente más caro que el de la gasolina. El usuario de un vehículo eléctrico paga un precio mayor por cada kWh en comparación al usuario de un vehículo a base de gasolina, pero la eficiencia del vehículo eléctrico es suficiente para contrarrestar el mayor costo de la energía eléctrica, dando lugar a un ahorro del 48% por parte del vehículo híbrido con relación al costo por km propulsado.

En conclusión, no obstante el mayor costo de la energía eléctrica, el usuario de un vehículo eléctrico ahorrará 4.50 MXN\$ por cada 10 km de recorrido.

Con lo anterior se determina que tanto la emisión de contaminantes como el gasto en combustible de los vehículos eléctricos es significativamente menor que el de sus análogos de gasolina.

La conveniencia económica de adoptar un vehículo eléctrico depende del segmento de mercado al que pertenezca el consumidor, ya que los ahorros en combustible generados por los vehículos eléctricos sólo compensan el elevado precio de compra en el caso de consumidores cuyos trayectos son superiores a los 250 km por día.

Por lo anterior solo tendrá lógica económica adoptar vehículos eléctricos para aquellos consumidores que se encuentren por encima de los 250 km de uso diario.

De acuerdo a datos de uso vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Para el automovilista particular promedio será considerablemente más caro utilizar un vehículo eléctrico, ya que su consumo diario de 19 km está muy por debajo de los 250 km del punto de equilibrio. Por otro lado, el taxista promedio con uso diario de 245 km, es indiferente a la adopción de un vehículo eléctrico, ya que el costo total del vehículo sería muy similar al de gasolina.

El precio del vehículo eléctrico es una variable crítica que varía en los mercados en función a la presencia de incentivos gubernamentales, y en función a la innovación en las tecnologías de almacenamiento eléctrico, y de efectos positivos en el incremento de su producción.

Un incentivo para la adopción de vehículos híbridos y eléctricos en México es que, de acuerdo con la Ley del impuesto sobre tenencia o uso de vehículos, los vehículos híbridos se encuentran exentos del pago de este impuesto. De esta forma se espera que el usuario final vea esta medida como una ventaja sobre los automóviles convencionales. Además, debido a que representan una emisión muy baja de emisiones, también se encuentran exentos

El costo total del vehículo se ve directamente afectado principalmente por dos factores: los kilómetros recorridos diario por el vehículo y el precio de venta del vehículo. Cabe mencionar que otras ventajas de los vehículos eléctricos son el ahorro de combustible y el costo de mantenimiento más bajo en comparación a uno de gasolina.

Los principales factores que influyen en la adopción de un vehículo eléctrico son los costos de combustibles fósiles, de la electricidad y de la batería.

Una variable crucial para la determinación de la sustitución de los vehículos de motor de combustión interna por vehículos eléctricos es el precio de los combustibles fósiles, ya que se mantiene constante la actual política de aumento mensual.

El costo de la electricidad utilizada por los vehículos eléctricos constituye el segundo elemento determinante de la brecha de valor entre una y otra tecnología.

El punto de equilibrio de 250 km diarios se obtuvo considerando la tarifa residencial estipulado por la Comisión Federal de Electricidad. Sin embargo es de utilidad considerar una posible tarifa especial para los vehículos eléctricos, o una tarifa preferencial por demanda de energía eléctrica en horarios nocturnos. Una disminución de 10% en la tarifa eléctrica implicaría una disminución del punto de equilibrio a 237 km. De manera análoga, una disminución de 20% en la tarifa implicaría la existencia de conveniencia económica por migrar a un vehículo eléctrico para todo vehículo que recorra 223 km o más al día. (Figura 1.2.)

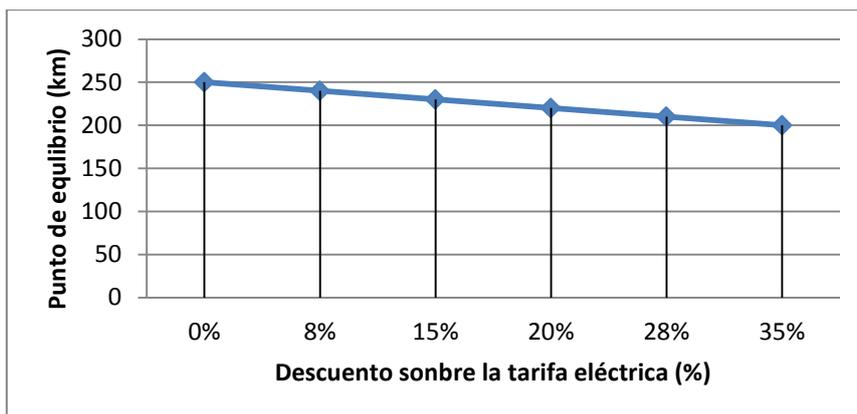


Figura 1.2. Sensibilidad del punto de equilibrio ante descuentos en la tarifa eléctrica.

Como se ha mencionado anteriormente el precio de compra del vehículo eléctrico es la principal barrera para su adopción, ya que representa en la actualidad el 25% del costo de vehículos híbridos y hasta un 40% en vehículos eléctricos puros.

El costo de la batería es uno de los principales factores que influyen en el precio de compra de un vehículo eléctrico así que para que este precio sea menor, se necesita que el precio de las baterías sea menor.

McKinsey & Company realizó una proyección de disminución en el costo de las baterías de iones de litio en julio de 2012. La citada investigación desglosa el costo de la batería en más de 40 componentes y realiza una proyección económica para cada uno de ellos. Asumiendo estos pronósticos se espera un decrecimiento del 25% para el 2015, lo que generaría una disminución en el precio de compra de un vehículo eléctrico de 32,200 MXN\$ para el consumidor mexicano.

1.6.2.1. Flotillas de taxis y corporativas

El segmento de flotillas de taxis y flotillas corporativas merece especial atención para ser sustituidos por vehículos eléctricos. Variables como el alto kilometraje y el punto fijo de estacionamiento hacen de estos segmentos candidatos viables para los proyectos pilotos de introducción de vehículos eléctricos.

En el caso de los vehículos híbridos eléctricos, se podrían recargar una vez por día, en la noche, y de esta forma el vehículo sería propulsado por el motor eléctrico hasta que las baterías se descargaran hasta llegar a cierto voltaje y después se utilizaría el motor de combustión interna.

Sin embargo flotillas de taxis con punto fijo de encuentro y de estacionamiento tienen la posibilidad de recargar los vehículos eléctricos mientras esperan estacionados, inclinándose hacia un mayor uso del motor eléctrico y aprovechando en mayor medida las ventajas del vehículo eléctrico.

Las flotillas corporativas se podrían manejar de manera análoga a las flotillas de taxis. Sin embargo los valores de los parámetros como kilometraje diario y tiempo disponible de aparcamiento diario son variantes y requerirán de mediciones particulares a cada tipo de flotilla. Por ejemplo, flotillas corporativas para la

prestación de servicios a domicilio son intensivas en kilometraje, presentando niveles de hasta 180 km/día; mientras que flotillas corporativas para transporte de personal presentan niveles que bajan hasta los 100 km diarios.

De los 34 millones de vehículos en operación en México, el 34% forman parte de flotillas comerciales (más de 11.5 millones de vehículos). Se anticipa que los propietarios de flotillas probablemente estarían entre los primeros en adoptar vehículos eléctricos en México.

Considerando que el costo del combustible representa más de dos terceras partes de los costos de operación de la flotilla, el ahorro energético que ofrecen los vehículos eléctricos pudiera ser un factor importante en las decisiones del propietario de la flotilla, una vez que confíe en que los vehículos eléctricos puedan cumplir las necesidades operativas específicas de su empresa en materia de carga, potencia, rango de distancia y durabilidad.

El kilometraje exacto podrá variar enormemente entre una y otra flotilla en función de su uso; no obstante, los vehículos de flotillas tienden a tener una tasa más elevada de utilización y un mejor trazado de ruta que un vehículo de uso particular, tienden a estacionarse en instalaciones centralizadas, y reciben un mejor mantenimiento que los vehículos de particulares.

Además, muchas empresas consideran sus compromisos de responsabilidad social como parte integral de sus decisiones empresariales. Por ejemplo Bimbo, que ha incorporado flotillas de vehículos híbridos.

Existen varios puntos que pueden ser tomados como recomendaciones para que los vehículos eléctricos puedan ser introducidos dentro del transporte en México, entre los cuales destacan:

- **Difusión social**

Se necesita formar un foro que reúna a actores de los sectores público y privado, lo cual abriría una canal de comunicación en materia de desarrollo de infraestructura.

- **Programas piloto**

Establecer programas piloto a nivel municipal, estatal y federal con las propias flotillas, enfocándose a los vehículos que se utilicen con mayor intensidad y en las rutas más transitadas.

- **Precios de combustible**

Permitir que los precios de la gasolina continúen aumentando paulatinamente hasta alcanzar los niveles internacionales de precios. En la medida que aumenta el precio de la gasolina, los vehículos eléctricos se vuelven más atractivos.

- **Suministro eléctrico**

Establecer tarifas diferenciadas por horario de uso con el fin de reducir el costo de recarga de las baterías así como aumentar la generación de energía limpia para mejorar la eficiencia energética de vehículos eléctricos.

La reducción de emisiones de carbono mediante la introducción generalizada de vehículos eléctricos en flotillas comerciales y gubernamentales está en manos de los actuales líderes empresariales y gubernamentales mexicanos. Será necesario que el gobierno, los investigadores, los fabricantes y los operadores de flotillas trabajen en conjunto para alinear los incentivos adecuados, de tal forma que la adquisición de vehículos eléctricos no solo sea una acción responsable, sino que también sea la decisión económica más atinada.

2. Conceptos generales de un automóvil

Para la realización de este trabajo fue necesario conocer el funcionamiento básico de los principales sistemas de un auto (sobre todo del motor) para tener una visión más amplia sobre el problema al que nos enfrentamos; por esta razón en este capítulo se da una descripción general de un automóvil y sus sistemas básicos además de la relación que hay entre la electrónica y tales sistemas.

Por definición un automóvil es un vehículo con ruedas autopropulsado por un motor propio cuyo propósito es el transporte terrestre de personas o mercancías de un lugar a otro.

La palabra automóvil tiene un origen francés ya que en 1875 se utilizaba en Francia la palabra “*voiture automobile*” (vehículo que se mueve por sí mismo) para distinguir a los primeros vehículos que se movían por sí mismos sin necesidad de una guía (una vía férrea por ejemplo).

El vocablo “*automobile*” a su vez derivaba de otro aparecido en 1808, “*locomobile*” que estaba compuesto por dos partículas: una de origen latino. “*locus*” (lugar), y otra de origen latino medieval, “*motivus*” /relativo al movimiento). La traducción más correcta del vocablo “*locomobile*” es la de ser libre de moverse de un lugar a otro y sin necesidad de un soporte fijo en el suelo.

Al añadir el vocablo primitivo, la partícula griega “*autos*” (por sí mismo), apareció el adjetivo “*automobile*”, para designar a los primeros vehículos que funcionaban con motor propio y por lo tanto eran independientes de una fuerza exterior ya fuera animal o humana. El vocablo automóvil apareció hacia 1890 en Francia y poco a poco fue generalizándose a los demás países.

2.1. Historia del automóvil

La historia del automóvil coincide con el desarrollo industrial de los últimos cien años y sería complicado tratar de describirla por completo en este trabajo, sin embargo se trata de hacer un resumen esquemático de la evolución del automóvil que nos da una idea general de las grandes transformaciones que ha sufrido, no solo en su concepto, sino también en la industria y la infraestructura viaria que ha llevado consigo.

Cabe destacar que ha habido una constante dentro de los sistemas que conforman a un automóvil que prácticamente no ha sufrido variación alguna, en su concepto, y si un progresivo perfeccionamiento, nos referimos al “motor alternativo de explosión”.

El automóvil tal cual surgió en la segunda mitad del siglo XIX, pero a lo largo de la historia ya se había intentado prescindir de la dependencia de la fuerza animal o humana como medio de tracción. Siendo muchos los mecanismos probados a partir del siglo XVII el primer motor de tracción mecánica fue el motor de vapor instalado

sobre una plataforma con ruedas por el ingeniero francés Joseph Cugnot. (Figura 2.1.) En el período de 1770-1790 surgieron los primeros vehículos accionados con este tipo de motores.



Figura 2.1. Primer vehículo con motor de vapor de agua. (Carromato de Joseph Cugnot).

A partir del vapor fueron también desarrollados los motores de gas. El primer motor de gas fue patentado en 1833 por el británico Wellman Wright. Estos motores tenían como inconveniente la necesidad de transportar un generador de energía lo cual trajo como consecuencia una relación peso potencia muy alta dejando muy poca capacidad para transportar una carga útil.

En 1876 empezó a funcionar el primer motor de combustión interna fabricado por Nicholas Otto y que utilizaba gasolina en vez de gas (CO). Este motor respecto a los anteriores, simplificaba enormemente la relación peso-potencia y el montaje del mismo.

Hasta principios del siglo XX los automóviles de vapor eran mucho más silenciosos que los de motor de combustión interna, daban un mejor rendimiento en caminos con pendientes y no requerían cambio de velocidad ni reducción fija al diferencial. Sin embargo su autonomía era muy limitada a causa de los repetidos abastecimientos de agua que requería.

Carl Benz fue el primero en fabricar un automóvil de gasolina (Figura 2.2.). La evolución de los primeros automóviles exigió tanto el perfeccionamiento de los sistemas de alimentación del carburante como de los dispositivos para el encendido de la mezcla de aire y del carburante, necesarios para poder construir motores que girarían a un número cada vez mayor de revoluciones pero que a su vez fueran más pequeños y por consecuencia menos pesados.



Figura 2.2. Primer vehículo Daimler-Benz de gasolina.

Gracias a la invención de los carburadores de gasolina pulverizada con cubeta y flotador para el carburante, fue posible pasar a la construcción de motores de combustión interna automovilísticos que desarrollaban potencias motrices de 12 a 16 CV (caballos de vapor) e incluso superiores durante los últimos años del siglo XIX.

En 1900 surgió la obra maestra de Maybach: el motor de cuatro cilindros en línea y verticales que incluía todas las innovaciones técnicas de años precedentes, desarrollando 35 CV con un rendimiento térmico excepcional para dicha época. Al ensamblar este motor en el primer Mercedes fue como comenzó el ocaso de los automóviles propulsados por vapor. De esta manera la técnica relacionada con los motores evolucionó rápidamente hacia el motor policilíndrico vertical en línea en posición delantera en los automóviles.

La evolución termodinámica de los motores de combustión interna, que funcionaba a cuatro tiempos según el ciclo de Beau de Rochas-Otto, se inició solamente cuando se comenzaron a emplear distribuciones de válvula de cabeza sobre los cilindros. Esta adopción llevada a cabo en las primeras décadas del siglo XX permitió reducir la superficie interior y el volumen de las cámaras de combustión, que fueron adquiriendo forma hemisférica y permitieron un aumento progresivo de la relación de compresión y un aumento de los diámetros de las válvulas de distribución, mejorando por consecuencia tanto el barrido como el llenado de los cilindros (rendimiento volumétrico) y por consiguiente el aumento de la capacidad termodinámica del motor.

La evolución de los automóviles dotados con motor diesel ha sido mucho más lenta. La primera patente concedida a Rudolph Diesel se fechó el 4 de febrero de 1892. El primer motor diesel que funcionó con resultados industriales positivos fue uno monocilíndrico y de cuatro tiempos, de enormes dimensiones y que con una presión final de compresión de unas 32 atmósferas, daba 18 CV a unas 154 rpm; sin embargo, todavía pasaron muchos años hasta que los motores diesel pudieran emplearse satisfactoriamente. Fue necesario poner a punto la inyección directa en

vez de neumática, y así se pudo generalizar entre 1920 y 1922 la construcción de motores más ligeros que los primeros.

A partir de este momento se puede decir que el concepto en sí no ha cambiado aunque ha sufrido un continuo perfeccionamiento y evolución hasta conseguir la personalidad que caracteriza a los automóviles actuales. A lo largo de la era del automóvil han sido muchos los intentos por encontrar otro tipo de motores como fuentes de energía, sin embargo, a pesar del reciente auge en el desarrollo de motores eléctricos y el empleo de energías alternativas como fuente de propulsión, los motores de combustión interna de ciclo de Otto y Diesel son todavía los de mayor uso en la industria.

2.2. Configuración física del automóvil

Los primeros automóviles eran carruajes (similares a los tirados por caballos) a los que se les agregó un motor, un mecanismo de transmisión y controles de dirección primitivos. Generalmente estos vehículos contaban con un bastidor de acero que soportaba la carrocería. Las ruedas se conectaban a este bastidor mediante un conjunto de muelles y amortiguadores que permitían viajar sobre los accidentados caminos de ese entonces. Esta misma configuración general se conservó en la mayoría de los automóviles hasta poco tiempo después de la Segunda Guerra Mundial, aunque hubo una evolución en el tamaño, la forma y las características del automóvil según avanzaba la tecnología.

En esta sección se describen los componentes y sistemas básicos de un automóvil con el fin de comprender la importancia de las aplicaciones de la electrónica dentro del automóvil, ya sea en sistemas de control o para sistemas de seguridad y entretenimiento dentro del mismo automóvil.

Una configuración básica del automóvil incluye los siguientes sistemas importantes:

- Motor
- Mecanismo de transmisión (transmisión, diferencial, eje propulsor)
- Suspensión
- Dirección
- Frenos
- Instrumentación sistema eléctrico/electrónico
- Control de movimiento
- Seguridad
- Confort/comodidad
- Entretenimiento/comunicación/navegación

El bastidor o chasis sobre el cual está montada la carrocería está soportado por el sistema de suspensión. Los frenos están conectados al extremo opuesto de los componentes de la suspensión. El sistema de la dirección y otros sistemas mecánicos importantes están montados en uno de estos componentes y unidos, según sea necesario, mediante componentes mecánicos a otros subsistemas.

Esta configuración básica de un automóvil fue empleada desde los primeros automóviles hasta finales de la década de 1960. La creciente importancia de la

eficiencia del combustible y las disposiciones sobre seguridad ordenadas por instituciones gubernamentales condujeron a importantes cambios en el diseño de los vehículos. La carrocería y el bastidor evolucionaron para convertirse en una estructura integrada a la cual estaban unidos el sistema de transmisión, la suspensión, las ruedas y demás componentes del automóvil.

La mayoría de los automóviles, con algunas excepciones, tenían el motor con una configuración frontal y con el eje propulsor en la parte trasera. Existen algunas ventajas al tener el motor en la parte delantera del vehículo (protección en caso de choque y enfriado eficiente del motor, por ejemplo). Hasta hace poco las denominadas ruedas propulsoras a través de las cuales se entrega la potencia a la carretera habían sido las ruedas traseras. Esta configuración se conoce como tracción trasera. Por razones de seguridad y estabilidad, las ruedas traseras se utilizan para dirigir al automóvil.

Esta configuración de propulsión trasera no es óptima desde el punto de vista de la tracción, ya que el peso relativamente grande del motor/transmisión se encuentra principalmente en las ruedas delanteras. A fin de aprovechar el peso del motor para tracción, muchos automóviles actuales combinan en la parte delantera la dirección y la propulsión. Para obtener la tracción delantera se deben hacer ciertas modificaciones respecto a la complejidad y el radio de la dirección. Además, existe la tendencia de que el par de torsión aplicado a las ruedas delanteras afecte negativamente a las ruedas delanteras afecte negativamente a la dirección con el fenómeno conocido como "dirección por par de torsión".

En los automóviles con tracción delantera el motor está montado en forma transversal, es decir, con el eje de rotación perpendicular respecto al eje del vehículo. La transmisión está montada adyacente al motor y orientada con su eje paralelo al eje del motor. La configuración del diferencial y el eje propulsor está montada normalmente en la transmisión.

Todos los sistemas mencionados anteriormente se han visto alterados por la introducción de la electrónica. Las nuevas aplicaciones de la electrónica en cada uno de ellos complementan continuamente a otras que ya están en uso, lo cual da por resultado un ambiente en el que la electrónica representa alrededor del 20% del costo total de un automóvil actual.

A continuación se da una descripción general de los sistemas principales de un automóvil.

2.2.1. El motor

El motor en un automóvil proporciona toda la potencia para mover al vehículo. Se han producido diversos tipos de motores, aunque el motor que ha tenido mayor impacto es el de combustión interna, de pistones, de un ciclo de cuatro tiempos, accionado por gasolina, con encendido por chispa y enfriado con líquido. En lo subsecuente se hará referencia a este motor como motor de encendido por chispa o motor SI (spark ignited) (Figura 2.3.).

Aun cuando se han logrado rápidos avances tecnológicos en el control del motor SI mediante el empleo de la electrónica, la configuración mecánica se ha mantenido prácticamente sin modificaciones desde que se inventó este tipo de planta de energía. Además la introducción de materiales modernos ha mejorado en buena medida el embalaje, el tamaño y la generación de potencia entregada por este tipo de motores.

Los principales componentes del motor SI son los siguientes:

- Monobloque
- Cilindros
- Cigüeñal
- Pistones
- Bielas
- Árbol de levas
- Culata de cilindros
- Válvulas
- Sistema de control de combustible
- Sistema de encendido
- Sistema de escape
- Sistema de enfriamiento
- Sistema eléctrico

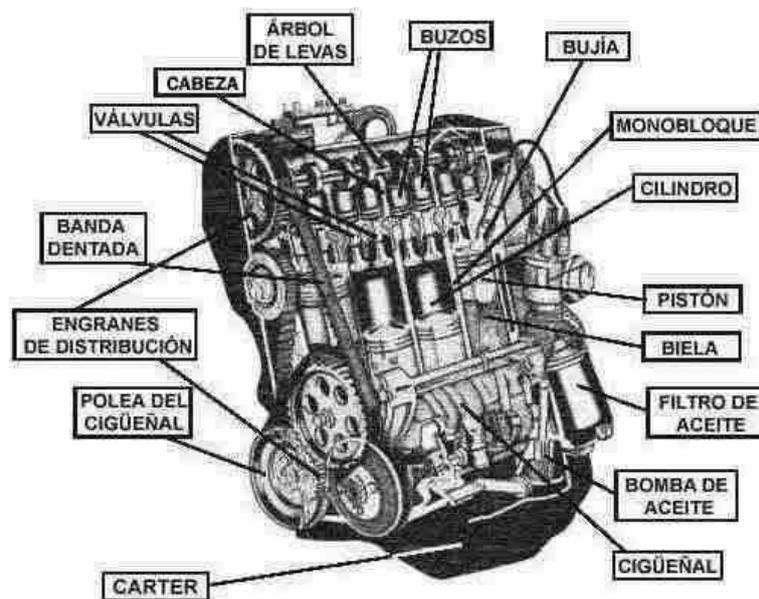


Figura 2.3. Esquema general de un motor de combustión interna.

En este trabajo no se describe a profundidad cada uno de estos componentes del motor ya que no está dentro de los alcances del mismo, solo se describirá más adelante el proceso de encendido de un motor SI ya que la comprensión de este fue una parte fundamental para la realización del proyecto.

La electrónica desempeña un papel directo en todos los aspectos relacionados con el control del motor, incluyendo el control del flujo de aire y combustible, el encendido, los sistemas de escape y emisiones evaporativas, así como las

operaciones diagnósticas, mantenimiento y muchas otras funciones secundarias. Para cumplir con las regulaciones gubernamentales en cuanto a las emisiones de escape y ahorro de combustible, estos sistemas se combinan para optimizar el rendimiento dentro de los requerimientos reglamentarios. En los primeros días de la regulación gubernamental, los controles electrónicos se aplicaron a los diseños existentes del motor, sin embargo, al evolucionar la tecnología electrónica, la configuración mecánica del motor se vio influenciada (al menos indirectamente) por los controles electrónicos que se pretendían aplicar.

2.2.1.1. Sistema de arranque del motor

Para encender un motor de combustión interna es necesario un motor de arranque o motor de partida, el cual es un motor eléctrico alimentado con corriente continua con imanes de tamaño reducido y que se emplea para vencer la resistencia inicial de los componentes mecánicos móviles del motor al arrancar.

El motor de arranque es activado con la electricidad de la batería cuando se gira la llave de puesta en marcha, cerrando el circuito y provocando el giro del motor. El motor de arranque se conecta con el cigüeñal del motor de combustión por medio del bendix, el cual es un tipo de mecanismo de engranaje cuya función es engranar o desengranar un piñón del motor de arranque con el volante del motor automáticamente cuando se activa el sistema de arranque o bien cuando ya ha arrancado el motor, respectivamente.

Por otro lado, los motores necesitan una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. El sistema de ignición consiste en un componente llamado bobina de encendido, que es un auto-transformador de alto voltaje al que está conectado un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca un impulso eléctrico de alto voltaje en el secundario. Dicho impulso está sincronizado con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; el impulso se lleva al cilindro correspondiente (aquel que está comprimido en ese momento) utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía que, fijado en cada cilindro, dispone de dos electrodos separados unos milímetros, entre los cuales el impulso eléctrico produce una chispa, que inflama el combustible.

Otros dispositivos que intervienen en el encendido del motor son la bomba de gasolina cuya función es llevar el combustible desde el tanque de gasolina hasta el motor; y el ahogador que es un dispositivo que mediante diversos mecanismos incrementa la riqueza de la mezcla de combustible para que el motor arranque correctamente y tenga un funcionamiento suave mientras no haya alcanzado la temperatura de trabajo.

2.2.2. Mecanismo de transmisión

El sistema del mecanismo de transmisión del motor del automóvil está compuesto por el motor, la transmisión, el eje de transmisión, el diferencial y las ruedas impulsadas. (Figura 2.4.).

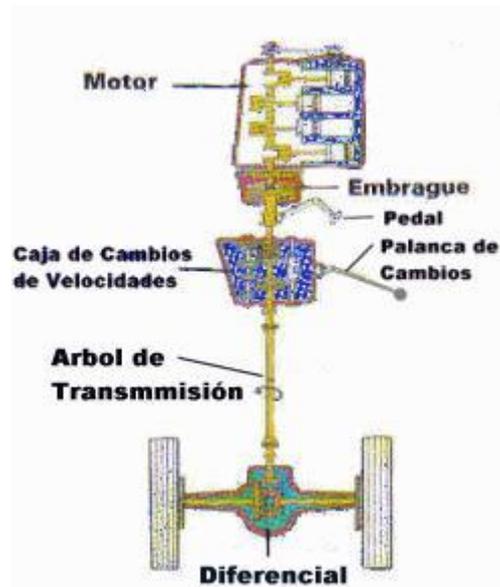


Figura 2.4. Esquema general del sistema de transmisión.

Previamente analizamos la función del motor por lo que a continuación se examina el papel que desempeñan los demás elementos dentro del mecanismo de transmisión.

2.2.2.1. Transmisión

La transmisión es un sistema de engranajes que ajusta la relación de la velocidad del motor y la velocidad de las ruedas. Esencialmente, la transmisión permite al motor operar dentro de su rango de rendimiento óptimo, independientemente de la carga o velocidad del vehículo. Proporciona una relación de engranes entre la velocidad del motor y la velocidad del vehículo, de manera que el motor proporcione la energía adecuada para impulsar al vehículo a cualquier velocidad.

Para lograr esto con una transmisión manual, el conductor selecciona la relación de engranes correcta de un conjunto de relaciones de engranes posibles (generalmente de tres a cinco para automóviles). Una transmisión automática selecciona esta relación de engranes por medio de un sistema de control automático. La configuración de una transmisión automática consta de un mecanismo de acoplamiento por fluido, conocido como convertidor de par y un sistema de grupos de engranes planetarios. Para optimizar y controlar estos cambios es posible emplear dispositivos electrónicos, sin embargo, debido a que el motor y la transmisión funcionan conjuntamente como una unidad en la producción de energía, es mejor controlar ambos componentes mediante un solo controlador electrónico.

2.2.2.2. Eje de transmisión

El eje de transmisión se emplea en los vehículos con motor delantero y tracción trasera para acoplar el eje transmisor de la transmisión con el eje impulsor del diferencial. Los acoplamientos flexibles, denominados juntas universales, permiten que la caja del puente trasero y las ruedas se muevan hacia arriba y hacia abajo mientras que la transmisión se mantiene estacionaria. En los automóviles con

tracción delantera, una par de ejes de transmisión acopla la transmisión con las ruedas impulsoras mediante juntas flexibles conocidas como juntas de velocidad constante.

2.2.2.3. Diferencial

El diferencial sirve a tres propósitos, el principal es la transferencia a ángulo recto del movimiento giratorio del eje de transmisión a las ruedas. El segundo propósito es permitir que cada rueda impulsada gire a una velocidad diferente. Esto es necesario ya que la rueda “exterior” debe girar más rápido que la rueda interior cuando el vehículo está dando una vuelta. El tercer propósito es el incremento del par de torsión proporcionado por la relación de engranes.

2.2.3. Suspensión

Otro subsistema importante del automóvil es la suspensión (Figura 2.5.), que es el conjunto mecánico que conecta cada rueda con la carrocería del automóvil. El principal propósito del sistema de suspensión es aislar la carrocería del automóvil del movimiento vertical de las ruedas al viajar sobre un camino con una superficie áspera.

El conjunto de las ruedas está conectado mediante un conjunto móvil a la carrocería. El peso del automóvil es soportado por resortes. Además hay un dispositivo denominado amortiguador que es un dispositivo de amortiguamiento viscoso. Hay un conjunto similar en cada rueda aunque generalmente existen diferencias en la configuración detallada entre las ruedas delanteras y las traseras.

El desempeño del sistema de suspensión está regulado principalmente por el parámetro de amortiguamiento del amortiguador. En el diseño tradicional de la suspensión este parámetro es fijo y se elige para lograr un equilibrio entre la marcha y el manejo. En los sistemas de suspensión con control electrónico, este amortiguamiento puede variarse dependiendo de las condiciones de manejo y las características de las irregularidades del camino, es decir, el sistema de la suspensión se adapta a las entradas para mantener la mejor marcha posible, sujeta a las restricciones de manejo asociadas con la seguridad.

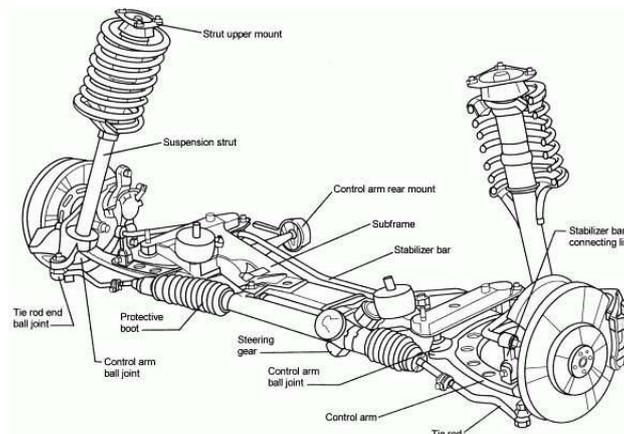


Figura 2.5. Esquema del sistema de suspensión de un automóvil

2.2.4. Frenos

Los frenos son tan importantes para el automóvil como el sistema de transmisión del motor y son responsables de reducir la velocidad y detener al vehículo. La mayor parte de la energía cinética del vehículo es disipada por los frenos durante la desaceleración y la parada (con las otras contribuciones provenientes de la resistencia aerodinámica y la resistencia al rodamiento de los neumáticos).

Existen dos tipos principales de frenos automotrices: frenos de tambor y frenos de disco.

El control electrónico para el frenado es benéfico para la seguridad al mejorar el desempeño de parada en condiciones de frenado malas o marginales. Una de las aplicaciones de la electrónica en esta parte del automóvil es el sistema de frenado antibloqueo (ABS), (Figura 2.6.), el cual auxilia al conductor en la desaceleración del vehículo ante condiciones adversas del terreno (camino mojado o cubierto de hielo, por ejemplo). En tales condiciones el frenado de pánico por parte del conductor (en los automóviles no equipados con ABS) da por resultado una reducción en la eficacia del frenado y, generalmente, una pérdida del control direccional debido a que las ruedas tienden a trabarse.

En los automóviles con ABS se evita que la rueda se trabe mediante un mecanismo que regula automáticamente la fuerza de frenado en un valor óptimo para cualquier condición dada de baja fricción. El sistema ABS está compuesto por, además de los elementos normales de los frenos, incluyendo el pedal de freno, el cilindro maestro, el refuerzo de vacío, los cilindros de las ruedas, calibradores/discos y tuberías de frenos, este sistema cuenta con un conjunto de sensores de velocidad angular en cada rueda, un módulo de control electrónico y un modulador de presión de frenos hidráulicos (regulador).

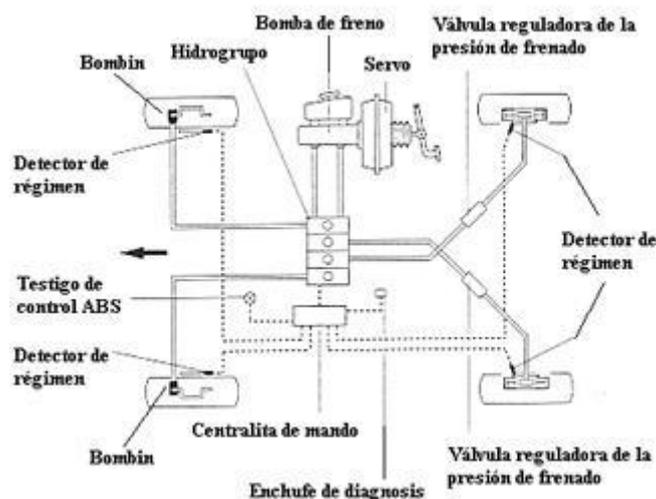


Figura 2.6. Configuración básica del sistema de frenos ABS.

2.2.5. Sistema de la dirección

La dirección constituye uno de los principales sistemas automotrices requeridos para la operación del vehículo ya que proporciona al conductor el control de la ruta del automóvil sobre el terreno (Figura 2.7.). La dirección funciona girando el plano de las ruedas delanteras en la dirección deseada de la vuelta. El ángulo entre el plano de las ruedas delanteras y el eje longitudinal del automóvil se conoce como ángulo de dirección. Este ángulo es proporcional al ángulo de rotación del volante.

Tradicionalmente los sistemas de dirección automotrices han estado compuestos exclusivamente por elementos mecánicos para girar las ruedas en torno a un eje nominalmente vertical en respuesta a la rotación del volante. La inclinación de este eje da lugar a un par de torsión de recuperación que tiende a regresar las ruedas a planos paralelos al eje longitudinal del vehículo, de manera que el automóvil tenderá a viajar en línea recta hacia delante. Este par de torsión de recuperación proporciona una estabilidad de dirección para el automóvil.

Un conductor al frente de un automóvil debe proporcionar suficiente par de torsión para vencer el par de torsión de restablecimiento. Debido a que el par de torsión de recuperación es proporcional al peso del vehículo para un ángulo de dirección dado, en el caso de automóviles grandes se requiere un esfuerzo considerable por parte del conductor, particularmente a bajas velocidades y en maniobras de estacionamiento.

A fin de vencer este esfuerzo en automóviles relativamente grandes, se agrega un sistema de dirección hidráulica, el cual está compuesto por una bomba hidráulica accionada por el motor, un actuador hidráulico y una válvula de control. Siempre que se gira el volante, se abre una válvula de dosificación que activa al actuador por la acción de la presión hidráulica. El fluido hidráulico de elevada presión empuja sobre un lado el pistón, el cual a su vez está conectado a la articulación de la dirección y proporciona un par de torsión mecánico para auxiliar al conductor al dar una vuelta. Esta fuerza hidráulica se denomina refuerzo de la dirección. Generalmente el esfuerzo disponible de la bomba aumenta con la velocidad del motor en tanto que disminuye el esfuerzo requerido. Sería conveniente reducir el refuerzo de la dirección a medida que aumenta la velocidad del vehículo. Tal característica se incorpora en un sistema de dirección hidráulica que cuente con controles electrónicos, dicho sistema ajusta el refuerzo de la dirección de manera adaptable a las condiciones de manejo. , de esta forma el refuerzo disponible se reproduce controlando una válvula de alivio de presión en la bomba de la dirección hidráulica.

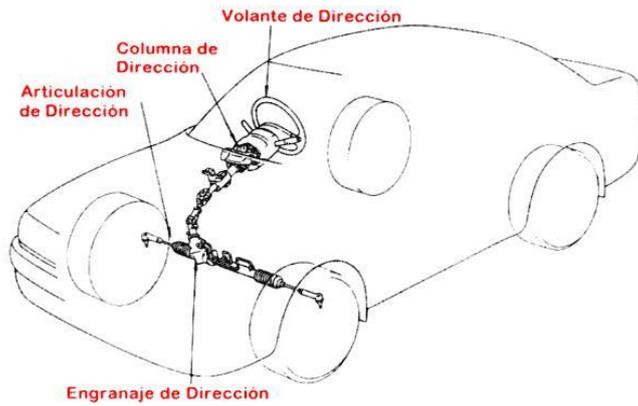


Figura 2.7. Sistema de la dirección de un automóvil.

Además de los sistemas automotrices descritos anteriormente, la electrónica participa en la implementación de los sistemas de control de crucero, los sistemas de calefacción y aire acondicionado, así como los sistemas de entretenimiento y algunos sistemas de seguridad. Además gracias a la electrónica se han introducido sistemas como el de navegación, las telecomunicaciones y sistemas de diagnóstico electrónico para detectar fallas en el funcionamiento del automóvil.

3. Vehículos híbridos

En forma general un vehículo híbrido es aquel que utiliza dos o más fuentes de energía para su propulsión, en este caso un motor eléctrico y un motor de combustión interna. En el capítulo anterior se hizo una descripción general de los automóviles que cuentan con un motor de combustión interna, la cual es actualmente la configuración más común en un vehículo automotor.

Dado que en el capítulo anterior se describe la configuración básica así como los principales sistemas de un automóvil convencional, a continuación se describe al automóvil eléctrico para posteriormente explicar las diferentes configuraciones de un vehículo híbrido así como sus módulos principales.

El automóvil eléctrico se presenta en años recientes como una alternativa en cuanto a transporte urbano se refiere, sin embargo el automóvil con motor de combustión interna presenta mayores ventajas económicas, de desempeño e infraestructura. Sin embargo las grandes compañías automotrices están conscientes de la importancia que van a cobrar los vehículos eléctricos en el futuro inmediato y por esa razón enfocan gran parte de su trabajo de investigación y desarrollo en los autos eléctricos.

El automóvil eléctrico presenta innumerables beneficios en lo que a tráfico en grandes ciudades se refiere, además trae consigo una disminución considerable en el consumo energético y sobre todo trae como consecuencia la disminución de la contaminación en las grandes ciudades. Sin embargo, este tipo de vehículo no ha sido introducido por completo en el mercado ya que además de tener que competir con las ventajas que todavía presenta el automóvil de combustión interna, se genera una especie de círculo vicioso en el cual los posibles compradores desisten debido a la poca oferta que hay en el mercado y los fabricantes no producen vehículos eléctricos porque parece que no hay muchas expectativas de venta.

A continuación se presenta un panorama de la situación actual de los vehículos eléctricos.

3.1. Historia del automóvil eléctrico

Los vehículos eléctricos han existido desde finales del siglo XIX, siendo un automóvil eléctrico el que sobrepasara por primera vez la barrera de los 100km/h (el "*Jamais contente*" construido por el belga Camille Jenatzy en 1899. La mejora de la pila eléctrica, por parte de los franceses Gaston Planté en 1865 y Camille Faure en 1881, marcó el camino para los vehículos eléctricos.

En la Exposición Mundial de 1867 en París, el inventor austriaco Franz Kravogl mostró un ciclo de dos ruedas con motor eléctrico. Francia y Gran Bretaña fueron las primeras naciones que apoyaron el desarrollo generalizado de vehículos eléctricos. En noviembre de 1881 el inventor francés Gustave Trouvé demostró un automóvil de tres ruedas en la Exposición Internacional de la Electricidad de París.

Entre 1900 y 1910 se construyeron 20000 en Estados Unidos de Norteamérica, donde competían en prestaciones con los autos de combustión interna de esa época, con la ventaja de ser más silenciosos y no contaminantes. El desarrollo del Ford T fue el suceso que inclinó la balanza hacia los vehículos térmicos. Durante la Segunda Guerra Mundial la escasez de gasolina trajo nuevamente la idea de los vehículos eléctricos.

A partir de 1960 con la imposición de leyes para la protección del medio ambiente, previsiones pesimistas en cuanto a las reservas de petróleo y con diseños mejorados de acumuladores eléctricos más ligeros y de mayor capacidad, se vuelve a pensar de nuevo en la viabilidad de los automóviles eléctricos. Para 1980 en la lista de World Car Catalog se podían encontrar 48 modelos diferentes de vehículos eléctricos, 11 de los cuales estaban diseñados con la intención de llevarlos a la producción en serie, estimándose que existían alrededor de 120,000 vehículos eléctricos en el mundo; más de la mitad de ellos circulando en el Reino Unido, principalmente en tareas del reparto diario de leche, pan y correo; condiciones de trabajo a las que se adaptaron muy bien.

En la actualidad casi todos los constructores de automóviles presentan en los distintos "Salones del Automóvil" un modelo eléctrico, lo que resulta en una llamada al posible comprador para hacerle notar que están a la vanguardia en tecnología y diseño y por lo tanto preparados para hacer frente a las necesidades automovilísticas impuestas por el tráfico urbano, la contaminación y la escasez de petróleo.

3.2. Configuración física del automóvil eléctrico

La configuración básica de un automóvil eléctrico consta principalmente de los siguientes sistemas:

- Sistema de motorización
- Sistema de control
- Sistema de alimentación
- Sistema de transmisión-traslación
- Sistema de elementos auxiliares

Los sistemas auxiliares se refieren a la iluminación y señalización, circuitos de seguridad, interior y acabados, sistemas de refrigeración y calefacción, sistemas de navegación y baterías auxiliares

El sistema de transmisión-traslación es básicamente el mismo que se utiliza en un vehículo térmico y que se describe en el capítulo anterior, razón por la cual a continuación se describe a los tres primeros.

3.2.1. Motor eléctrico

El motor es uno de los elementos más importantes de un vehículo eléctrico, es aquello que transforma la energía eléctrica en potencia mecánica en las ruedas cuando el conductor lo requiera.

La principal ventaja de los motores eléctricos es que consiguen suministrar la potencia necesaria para mover un vehículo sin emitir ningún tipo de residuo. De ahí que sea considerado como propulsor alternativo a los motores de combustión interna implantados en la mayoría de nuestros vehículos. Sin embargo es de gran importancia considerar que energía se usa y como se transforma para generar la electricidad que el motor necesita.

El motor eléctrico nos brinda la oportunidad de usar energías renovables para la generación de energía que se requiera en el sector transporte y esto puede ser considerado como otra ventaja respecto al motor de combustión interna. Para que el cambio de una tecnología a otra sea energéticamente rentable, hay que tomar en cuenta de donde proviene la energía que va a alimentar los motores de los vehículos.

Considerando que el motor eléctrico es un buen sustituto del motor de combustión interna, es importante considerar que la elección del motor eléctrico está directamente relacionada con los requisitos que se deben cumplir para satisfacer las necesidades de uso que se le van a dar instalado como sistema de propulsión de un vehículo, tomando en cuenta que los fabricantes buscan un vehículo eléctrico con un nivel de prestaciones similar al de un vehículo convencional.

3.2.1.1. Características del motor eléctrico

Considerando un vehículo utilitario, de uso diario o eventual, con las dimensiones a las que estamos acostumbrados, el motor eléctrico debe proporcionar un nivel de potencia suficiente sin que sus dimensiones lo hagan imposible de montar dentro del mismo vehículo.

De la misma forma que se necesitan dimensiones razonables, también debe tener una gran robustez mecánica y térmica para que no sea una fuente constante de averías. Y pensando en las poco deseadas pero inevitables averías, no estaría mal que el motor fuera de fácil mantenimiento y suficientemente accesible. Además de que los niveles de ruido y vibraciones del motor deben ser en general mínimos.

Los motores eléctricos, al ser máquinas reversibles, ofrecen la posibilidad de generar energía eléctrica a partir de energía mecánica; en este caso, la energía que se pierde al frenar, o la que le sobra al vehículo en bajadas, puede ser enviada a la batería nuevamente. Esta característica del motor eléctrico se convierte casi en una exigencia para que el vehículo tenga una mayor autonomía.

La eficiencia es otro factor importante; los motores eléctricos que se utilizan en el sector industrial tienen una eficiencia del 90%, por lo que un motor ideal para la propulsión de vehículos eléctricos debe tener una eficiencia superior al 90% en condiciones nominales. De esta forma se garantiza que más del 90% de la energía que recibe el motor, en forma de electricidad, se va a transformar en energía mecánica en el eje de salida del motor. Este hecho marca un avance sustancial en lo que a manipulación de energía se refiere ya que los motores de combustión tienen una eficiencia mucho menor. No hay que olvidar que los procesos de transformación energética en un motor de combustión y en uno eléctrico no son comparables, ya que uno pasa de energía química a energía mecánica y el otro convierte energía

eléctrica en energía mecánica. Además hay que tomar en cuenta la eficiencia de todos los procesos en la cadena energética total: desde la fuente de energía hasta su utilización.

Es importante que el par entregado por el motor sea constante, es decir, que se pueda garantizar un nivel sin fluctuaciones, ya que estas pueden dar una sensación de poca fiabilidad hacia los usuarios. Otra característica relaciona con la interacción con el motor es que tenga un control sencillo. El motor elegido debe ser gobernable con un sistema de control y potencia que sea robusto y barato.

Siguiendo con lo que se obtiene del motor (par y potencia), el conductor tiene que ser capaz de gestionar la entrega de par según las condiciones de la circulación. En un motor de combustión interna, la relación entre motor y ruedas pasa por una caja de cambios que ayuda a perfilar y adaptar la curva par-velocidad del motor con la que idealmente sería necesaria en una aceleración continua hasta la velocidad deseada.

La curva ideal estaría compuesta por un tramo de par constante y elevado, con lo cual se arrancarían y acelerarían el motor hasta una velocidad a la cual se entregaría la potencia nominal del motor, y a partir de ese momento convendría que la entrega de potencia fuera la nominal.

Observando las curvas de velocidad que se obtienen con un vehículo de combustión interna, a través del cambio de velocidades, y con cada una de ellas, se puede ver que el solapamiento de todas ellas intenta conseguir el perfil ideal.

Curiosamente, la curva característica de un motor eléctrico casi coincide con la curva considerada ideal para un vehículo, por lo que garantizando el funcionamiento del motor a una amplia gama de velocidades, el comportamiento de éste será muy próximo al ideal, ahorrando el complicado sistema de transmisión con cambio de velocidades.

Otro aspecto del motor eléctrico que supone una ventaja comparativa respecto al motor de combustión interna es la capacidad de sobrecarga. Los motores de combustión están dimensionados para que la potencia máxima que puedan entregar sea su potencia nominal. En cambio, un motor eléctrico admite entregar picos de potencia de hasta el doble de su potencia nominal durante periodos de tiempo cortos. Es decir, que a pesar de equipar el vehículo con un motor relativamente pequeño, un coche eléctrico va a poder disponer de una potencia elevada en ocasiones puntuales distintas a su funcionamiento normal.

Un aspecto importante para la viabilidad de cualquier cambio es el costo. El costo de un vehículo no solo tiene que ver con el costo del motor, pero lógicamente es un elemento con una marcada componente en el precio total del vehículo. Así, cuanto más bajo sea el costo de fabricación del motor, más se podrá reducir el costo total del vehículo, ya que nadie comprará un vehículo eléctrico si uno de combustión con similares prestaciones cuesta menos.

A continuación se resumen los requisitos de los motores eléctricos para vehículos:

- Alta potencia
- Alta densidad de energía (tamaño y peso reducidos)
- Alta capacidad de sobrecarga (alto par de arranque)
- Alta eficiencia (superior al 90% en condiciones nominales)
- Amplia gama de velocidades
- Control sencillo
- Niveles de ruido y vibraciones bajos
- Par con pocas variaciones
- Robustez mecánica y térmica elevadas
- Fabricación y mantenimiento fácil
- Bajo costo

3.2.1.2. Tipos de motor eléctrico

Después de revisar los requisitos que un motor eléctrico debe cumplir como propulsor de un vehículo, se describirán de una manera muy general los tipos de máquinas eléctricas utilizadas en tracción de vehículos.

3.2.1.2.1. Máquinas asíncronas o de inducción

Es el motor industrial de corriente alterna por excelencia debido a su robustez, sencillez y seguridad de funcionamiento. Se le llama motor de inducción debido a que por los bobinados del rotor circulan corrientes producidas por la inducción de fuerzas electromotrices en ellos.

Constan fundamentalmente de dos partes: una fija, estator, y otra móvil, rotor. El estator está formado por chapas aisladas entre sí para reducir las corrientes parásitas. Ambas partes están separadas mediante un hueco denominado entrehierro y en cada una de ellas hay unos devanados, que crearán un campo magnético cuando por ellos circule la corriente.

El funcionamiento de la máquina se basa en la interacción de los dos campos magnéticos senoidales que se van a formar: uno en el rotor y otro en el estator. Cuando el campo del rotor vaya adelantado con respecto al del estator, la máquina estará funcionando como generador y si ocurre lo contrario y, por tanto, el campo del estator va adelantado con respecto al del rotor, entonces estará funcionando como motor. El par electromagnético en el caso de funcionamiento como motor será a favor del sentido de giro del eje y en el caso de generador, en contra.

El circuito eléctrico del estator está formado por tres devanados distanciados 120° eléctricos (máquinas trifásicas) y, si las corrientes están equilibradas, el campo, girará a una velocidad proporcional a la frecuencia de las corrientes de alimentación e inversamente proporcional al número de pares de polos de la máquina.

En el funcionamiento como generador, la velocidad del eje será mayor que la velocidad de sincronismo y en funcionamiento como motor será menor. En función del tipo de circuito eléctrico del rotor, se pueden distinguir dos tipos de máquinas asíncronas:

Máquina de rotor bobinado: el circuito del rotor es como el del estator y las tres fases van conectadas en estrella. Los extremos libres están conectados a tres anillos de cobre rodantes que giran solidariamente con el eje. Haciendo contacto con ellos, se encuentran unas escobillas que permiten realizar la conexión de los devanados del rotor desde el exterior, lo que constituye una gran ventaja. (Figura 3.1.)

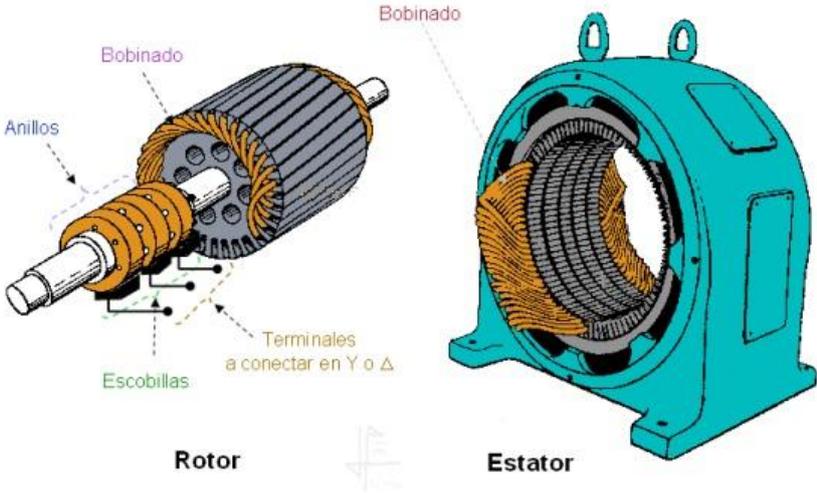


Figura 3.1. Máquina de rotor bobinado.

Máquina de jaula de ardilla: el devanado del rotor está constituido por barras de aluminio o cobre unidas en sus extremos por anillos del mismo material, no pudiendo acceder al rotor. Son más pequeños, robustos, más baratos y necesitan menor mantenimiento, pero su intensidad de arranque es más elevada. (Figura 3.2.).

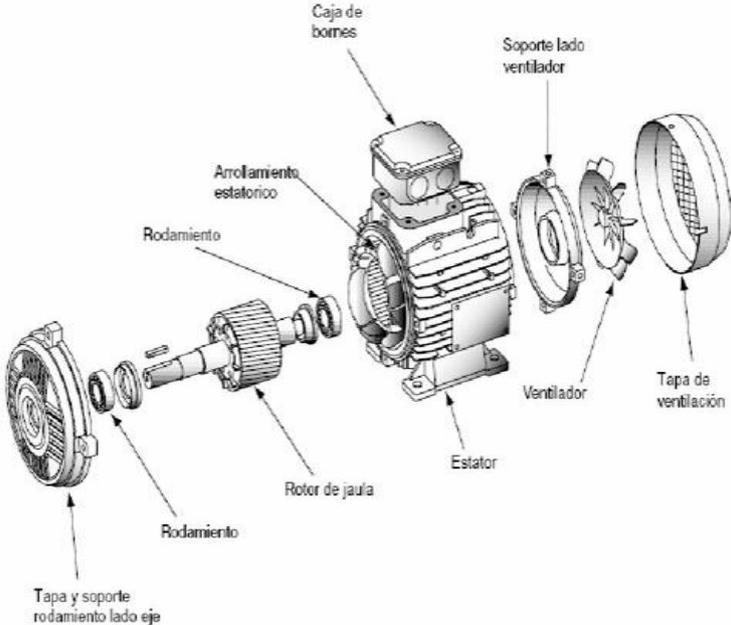


Figura 3.2. Máquina jaula de ardilla.

3.2.1.2.2. Máquinas síncronas

Las máquinas síncronas se utilizan fundamentalmente en aplicaciones de generación de energía eléctrica porque tienen mayor rendimiento y densidad de potencia que las máquinas asíncronas.

Igual que en las máquinas asíncronas, si el campo del rotor va por delante del campo del estator, éste se opondrá al movimiento (par resistivo) y la máquina funcionará como generador. Por el contrario, si es el campo del estator el que va adelantado, la máquina estará funcionando como motor y el par estará actuando para acelerar al rotor y hacerlo girar a esa velocidad. Este tipo de máquinas gira siempre a la velocidad de sincronismo, que es la velocidad del campo magnético generado en ella, condición necesaria para dar un par constante en régimen permanente. Al igual que las máquinas asíncronas, están formadas por un estator y un rotor. El rotor tiene un devanado de campo (excitado en corriente continua a través de unos anillos rozantes) y puede tener un devanado en cortocircuito (devanado amortiguador) que impide que la máquina gire a una velocidad distinta de la de sincronismo, normalmente en máquinas de polos salientes.

Dependiendo de la ubicación del devanado de campo, también llamado devanado de excitación, y de la forma del rotor se distinguen los siguientes tipos de máquinas síncronas:

Máquina síncrona de polos salientes: el rotor tiene expansiones polares que dan lugar a un entrehierro variable. El diámetro es mucho mayor que la longitud axial para poder poner más pares de polos. Se utilizan en aplicaciones de muchos pares de polos y velocidades bajas, como por ejemplo en generadores hidroeléctricos.

Máquina síncrona de rotor cilíndrico: tiene el rotor liso sin salientes por lo que el entrehierro es constante. El devanado de campo está distribuido en varias bobinas situadas para crear un campo senoidal. El diámetro de la máquina está diseñado para ser mucho menor que la longitud axial. Se utiliza en aplicaciones de pocos pares de polos y altas velocidades, como por ejemplo en generadores de centrales térmicas.

Gracias al desarrollo de nuevas posibilidades para este devanado de excitación, surgió la idea de crear el campo magnético con imanes permanentes solidarios al rotor compuestos por una aleación de Neodimio-Hierro-Boro. Con esto el circuito de excitación queda sustituido por imanes de alta energía (excitación fija).

Los imanes tienen una mayor densidad de potencia por lo que se pueden construir máquinas aproximadamente un 30% más pequeñas y de mayor eficiencia (10-15% más eficientes). Es más fácil la implementación de un mayor número de pares de polos para aplicaciones de baja velocidad. Los imanes no consumen energía eléctrica durante el funcionamiento por lo que pueden producir el campo sin tener pérdidas por efecto Joule. Al no tener partes rozantes se disminuyen las pérdidas mecánicas y se evita la refrigeración de la máquina.

Según cómo estén dispuestos los imanes, se tendrán motores de imanes superficiales (SPM) o motores de imanes interiores (IPM).

3.2.1.2.3. Máquinas de reluctancia conmutada

Las bobinas del estator están concentradas y el rotor está formado por una chapa metálica en vez de bobinados. Se caracterizan por tener un elevado par debido a la variación de la reluctancia a lo largo del entrehierro, por ser sencillas y robustas y por necesitar un control sencillo. Aun así necesitan un sistema de detección de posición lo que es un inconveniente además de tener un rizado de par y un factor de potencia bajo.

3.2.1.2.4. Motores de flujo axial

Por su reducido tamaño pueden ser integrados directamente en la ruedas del vehículo, optimizando espacio ya que se pueden eliminar parte de los acoplamientos mecánicos. Además tienen todas las ventajas de las máquinas síncronas de imanes permanentes. El rotor y el estator están dispuestos de manera longitudinal para crear un campo magnético paralelo al eje. Por ello sufren mayores esfuerzos radiales.

3.2.1.2.5. Motores de corriente continua sin escobillas

Tienen la ventaja de no tener delgas ni escobillas, que por rozamiento producen pérdidas en forma de fricción, por lo que tienen un rendimiento mayor y requieren menor mantenimiento. Funcionan gracias a ir alimentando de forma secuencial (conmutación electrónica) cada una de las fases del estator por lo que se necesitan unos sensores de posición del rotor (como las máquinas de reluctancia conmutada), en vez de hacerlo a través de las delgas y las escobillas (conmutación mecánica). Al estar alimentados en corriente continua, la electrónica de potencia utilizada es más simple. Incorporan imanes permanentes en el rotor, por ello son costosas.

Característica	Motor de corriente continua	Motor síncrono (corriente alterna)	Motor asíncrono (corriente alterna)
Densidad de potencia	Media-alta	Muy alta	Baja
Par de arranque	Alto	Alto	Medio-alto
Eficiencia	Baja (aproximadamente 80%)	Muy alta	Alta
Gama de velocidades	Amplia	Baja	Amplia
Control	Sencillo	Muy sencillo	Sencillo
Niveles de ruido y vibraciones	Medianos	Bajos	Bajos
Par	Constante	Con muy pocas variaciones	Pocas-medianas variaciones
Tamaño y peso	Mediano	Bajo	Mediano
Robustez mecánica	Buena	Buena	Muy buena
Robustez térmica	Mala	Buena	Muy buena
Fabricación y mantenimiento	Muy difíciles	Muy fáciles	Muy fáciles
Costo	Muy alto	Muy alto	Bajo

Tabla 3.1. Principales características de los diferentes tipos de motores respecto a su uso en vehículos eléctricos.

3.2.2. Baterías

La electricidad se ha convertido en el tipo de energía más usada por la humanidad, su fácil transporte y transformación y la variedad de formas de obtenerla la han convertido en el tipo de energía más común. Se podría decir que la humanidad depende de ella.

Uno de los temas más relevantes y tal vez el principal problema de los vehículos eléctricos es la autonomía, y al parecer, la solución para aumentarla se encuentra en las baterías.

Para no depender de la red eléctrica en situaciones que no lo permitan, existen acumuladores. Aprovechando las propiedades químicas de ciertos materiales y su tendencia a oxidarse o reducirse, se han podido diseñar dispositivos que almacenan electricidad en forma de energía química: las baterías.

Las baterías son dispositivos acumuladores de energía, que transforman la energía química en eléctrica. Una vez cargada, cuando se conecta a un circuito eléctrico, la energía química se transforma en energía eléctrica. Son un componente fundamental en los vehículos eléctricos, ya que son las responsables de almacenar y suministrar la energía eléctrica que necesitan para su funcionamiento.

Características de los vehículos eléctricos tales como la autonomía, velocidad máxima, tiempo de recarga, costo, etc., dependen de la tecnología de las baterías que se haya utilizado en el diseño y fabricación del vehículo. Por esto, la temática de las baterías recargables es una de las más importantes en el campo de los vehículos eléctricos. La autonomía del vehículo depende de la cantidad de energía almacenada, tomando en cuenta el consumo del motor y de otros sistemas.

Los parámetros que las caracterizan son: el estado de carga (SOC-State of charge- por sus siglas en inglés), su energía específica (cantidad de energía que puede almacenar por unidad de peso), densidad de energía, potencia específica, densidad de potencia, capacidad y voltaje.

3.2.2.1. Estado de carga

Se define como la capacidad de energía disponible de una batería y se puede hacer la analogía con el depósito de combustible de un vehículo. El SOC se representa como un porcentaje de la cantidad de energía contenida en la batería tomando como referencia de carga completa.

La estimación del estado de carga es esencial para alcanzar el comportamiento óptimo de un sistema que controle vehículos eléctricos o híbridos, para hacer más eficiente el funcionamiento del motor eléctrico comparado con el de combustión.

Uno de los factores más importantes que afectan a la estimación del SOC de una batería es el envejecimiento. Debido a los ciclos de carga y descarga, la capacidad de las celdas que forman la batería decrece con el tiempo. Este hecho induce a actualizar el máximo estado de carga disponible para la batería periódicamente, ya que es la referencia para calcular el porcentaje antes mencionado. En caso de tomar

como referencia el valor nominal de la capacidad de la batería la estimación puede no ser tan precisa. Otros factores relacionados con la estimación del SOC son los siguientes:

- **Tasa de carga y descarga**

El proceso electroquímico dentro de las celdas al cargarse y descargarse siempre toma un tiempo finito y no siempre es menor que el estímulo eléctrico que carga la batería. Durante el proceso de carga puede darse un pulso de descarga y no ser realizado por completo dando lugar a imprecisiones en la estimación del SOC. Además, los procesos tanto de carga como descarga consumen energía y la energía suministrada por la batería será menor que la utilizada para cargarla. Esta proporción es llamada *Eficiencia coulombica* y puede afectar hasta en un 3% de la capacidad disponible.

- **Auto descarga**

Con el transcurso del tiempo, una batería sufre un proceso de auto-descarga que típicamente es menor del 3% cada mes. Este consumo de energía puede ser apreciable para el caso de tiempos largos entre procesos de carga.

3.2.2.2. Densidad de energía

La densidad de energía, que se mide en Wh/kg si es densidad másica y en Wh/dm³ si es densidad volumétrica, es uno de los factores más importantes que definen la calidad de una batería puesto que nos dice la energía que es capaz de almacenar. Con este factor se pueden definir dos parámetros muy importantes: la autonomía del vehículo y la posible carga útil. La densidad de energía se usa como parámetro de comparación entre acumuladores.

3.2.2.3. Densidad de potencia

La densidad de potencia, la cual se mide en W/kg, nos define la potencia máxima que puede proporcionar un acumulador, así como la velocidad máxima del vehículo y la capacidad de aceleración. Es importante que la densidad de potencia sea adecuada incluso cuando la batería se haya descargado bastante con objeto de mantener unas prestaciones mínimas en el vehículo.

La viabilidad de un vehículo eléctrico depende del costo de las baterías, tanto desde el punto de vista de los fabricantes, como desde el de los usuarios. El precio total del vehículo eléctrico debe competir con el de un vehículo de combustión.

A continuación se presentan algunos de los criterios que se deben tomar en cuenta para elegir una batería y emplearla en un vehículo eléctrico. En la tabla se resumen las características de las baterías y el impacto de su uso en vehículos eléctricos.

Factor	Unidad de medida	Impacto de su uso en vehículos eléctricos
Densidad de energía másica	Wh/kg	Autonomía Carga útil
Densidad de energía volumétrica	Wh/dm ³	Autonomía Carga útil
Densidad de potencia	W/kg	Aceleración Velocidad punta
Duración	Numero de ciclos	Rentabilidad
Tensión de descarga	Volts	Prestaciones
Duración de la carga	Horas	Accesibilidad
Peso	kg	Autonomía Carga útil
Costo	Pesos mexicanos o dólares	Rentabilidad
Volumen	dm ³	Volumen útil
Rendimiento	%	Rentabilidad

Tabla 3.2. Criterios a considerar para elegir una batería para un vehículo eléctrico.

Tipo de batería	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Eficiencia energética (%)	Ciclos de vida
Ácido - Plomo	35-50	150-400	80	500-1000
Níquel-Cadmio	30-50	100-150	75	1000-2000
Níquel- Hidruro metálico	60-80	200-400	70	1000
Aluminio-aire	200-300	100	<50	--
Zinc-aire	100-220	30-80	60	500
Sodio-Azufre	150-240	230	85	1000
Sodio-cloruro de Níquel	90-120	130-160	80	1000
Polímero de litio	150-200	350	--	1000
Ion -litio	90-160	200-350	>90	>1000

Tabla 3.3. Propiedades de las baterías empleadas actualmente en vehículos eléctricos y vehículos híbridos eléctricos

3.2.2.4. Características de las baterías empleadas en vehículos eléctricos

A continuación se presentan las ventajas y limitaciones de las baterías más empleadas en la tracción de vehículos eléctricos y vehículos híbridos eléctricos son las de ácido plomo.

▪ **Baterías de ácido - plomo**

Ventajas:

- Alto voltaje: Dentro de los acumuladores electroquímicos basados en electrolitos acuosos, son los que tienen un mayor voltaje nominal.
- Potencia elevada: Son capaces de suministrar una elevada intensidad de corriente, y por lo tanto, una elevada potencia.
- Bajo costo: Esta es sin duda la principal ventaja de este tipo de baterías. Actualmente es la tecnología de acumuladores electroquímicos más barata del mercado.
- Se trata de una tecnología madura, ya que lleva más de 150 años de desarrollo.
- Componentes fácilmente reciclables. La tecnología para reciclar los componentes de estas baterías se encuentra altamente desarrollada.

Limitaciones:

- Baja energía específica. Estos bajos valores son consecuencia del elevado peso de los compuestos de plomo que se utilizan en estas baterías.
- Moderado ciclo de vida. Cuando se hacen descargas profundas, es decir, cuando se utiliza la mayor parte de la capacidad de la batería, el número de ciclos de carga/descarga que pueden realizar estas baterías es moderado.
- Desprendimiento de gases. Durante la etapa de carga de la batería se puede formar hidrógeno y oxígeno en los electrodos. El desprendimiento de hidrógeno tiene riesgo, ya que éste es un gas inflamable.
- Fuerte impacto ambiental. Además del fuerte carácter contaminante de los compuestos de plomo, algunas configuraciones de este tipo de baterías incluyen antimonio y arsénico como componentes. Estos elementos pueden dar lugar a estibina y arsina, compuestos de alta toxicidad.

▪ **Baterías de Níquel - hidruro metálico**

Ventajas:

- Mayor energía específica que las baterías de ácido plomo y níquel-cadmio
- Admiten recargas rápidas. Típicamente, este tipo de baterías son capaces de admitir cargas rápidas con una duración entre 1 y 3 horas. En vehículos híbridos eléctricos esto es muy importante para poder aprovechar la energía generadas por el freno regenerativo.
- Menor impacto ambiental que las baterías de ácido plomo y níquel-cadmio.
- No requieren mantenimiento.

Limitaciones:

- Moderado número de ciclos de vida. Los hidruros metálicos sufren una severa corrosión en el medio alcalino del electrolito, reduciéndose significativamente la recarga del acumulador.

- Costo elevado. Estas baterías pueden alcanzar un precio cuatro veces más superior al de los acumuladores de ácido plomo.
 - Menores prestaciones electroquímicas a alta corriente. En comparación con las baterías de níquel-cadmio, las prestaciones de este tipo de baterías disminuyen más cuando se utilizan altas intensidades de corriente.
 - Moderado efecto memoria
- **Baterías ión - litio**

Ventajas:

- Alto voltaje. Estas baterías poseen el mayor voltaje nominal con valores típicos de 3 volts. El uso de un electrolito no acuoso permite alcanzar estos elevados valores de voltaje.
- Elevada energía específica. De las tres tecnologías que se han mencionado, estas baterías son las que presentan los mayores valores de energía específica. Estos valores son casi el doble de los de las baterías de níquel-hidruro metálico y más de cuatro veces el valor de los acumuladores de ácido plomo.
- Elevado número de ciclos de vida. Las diferentes configuraciones de baterías de ión-litio comerciales, así como la gran parte de las nuevas configuraciones en desarrollo, presentan una excelente recarga.
- Moderado o bajo impacto ambiental. Al igual que las baterías de níquel-hidruro metálico, estas baterías están libres de materiales con alta toxicidad como el plomo, el cadmio o el mercurio.

Limitaciones:

- Elevado costo. El costo de estas baterías es elevado, se espera que reduzca de una manera significativa con el aumento de la demanda y la introducción de nuevos materiales catódicos.
- Pérdida de prestaciones a alta temperatura. Muchas de las configuraciones de estas baterías muestran una disminución significativa de sus propiedades electroquímicas cuando éstas trabajan a temperaturas mayores a los 50°C.
- Baja tolerancia al abuso. Estas baterías se degradan cuando se someten a condiciones de abuso, es decir, cuando se sobrecargan o sobredescargan. Así, cuando una batería se descarga por debajo de 2V, esta se degrada rápidamente, cuando se somete a sobrecarga se produce pérdida de capacidad de la batería. También puede sufrir calentamiento descontrolado, que en casos extremos, puede provocar el incendio de la batería.

Conociendo las ventajas y limitaciones de los diferentes tipos de baterías, cabe mencionar que las de mayor uso son las de ácido-plomo.

3.2.3. Unidad de control

El sistema de control es una parte importante en los vehículos eléctricos, ya que este determina la velocidad del motor.

Existen varias posibilidades para realizar el control del motor de un automóvil eléctrico en función de la configuración que se haya escogido, así como del tipo de motor seleccionado.

La electrónica de potencia es la encargada de convertir la energía eléctrica de una forma a otra (AC-AC, AC-DC, DC-AC, DC-DC) con la finalidad de controlar, procesar o modificar alguna de sus características (tensión, corriente, potencia, frecuencia, etc.).

Los dispositivos que se han desarrollado para llevar a cabo estas conversiones son principalmente diodos y transistores e integran componentes eléctricos básicos como las bobinas y los capacitores.

Los convertidores son los encargados de convertir la energía eléctrica en continua o alterna. En función de las formas de energía de la entrada y la salida de un convertidor, se pueden clasificar como:

- Rectificador: convierte la energía de corriente alterna de tensión constante a corriente directa de tensión constante o variable.
- Regulador de AC: convierte la energía de corriente alterna de tensión constante a corriente alterna de tensión variable.
- Cicloconvertidor: convierte la energía de corriente alterna a corriente alterna permitiendo variar la frecuencia, siendo siempre la frecuencia de salida menor a la frecuencia de entrada. Es una combinación entre un rectificador y un inversor.
- Inversor: convierte la energía de corriente directa a corriente alterna de tensión y frecuencia fija o variable.
- Chopper: convierte la energía de corriente directa de tensión constante a corriente directa de tensión fija o variable.

Todas estas conversiones realizadas por los convertidores parten de la misma base: semiconductores de potencia que juegan el papel de interruptores. Los semiconductores de potencia son los diodos, los transistores y los tiristores.

3.2.3.1. Control de un motor de DC

Existen diferentes configuraciones electrónicas utilizadas para el control de velocidad del motor DC, basada en la aplicación de distintos niveles de tensión al motor. En el pasado, dada una fuente de voltaje fija, se empleaba un reostato para proporcionar un nivel menor de tensión. Este es un método ineficiente debido a que existen muchas pérdidas de energía y por lo tanto disminuye la autonomía del vehículo.

Actualmente los controladores ajustan la velocidad y la aceleración del motor de corriente continua por medio de la modulación de ancho de pulso (PWM) (Figura 3.3.). La modulación por ancho de pulsos es una técnica utilizada para regular la

velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos. Mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza principalmente para el control de motores de DC y como su nombre lo indica, controla un momento alto (encendido o alimentado) y un momento bajo (apagado o desconectado).

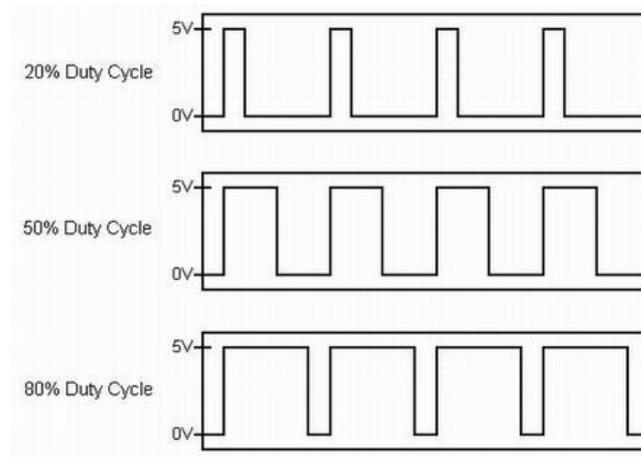


Figura 3.3. Modulación de ancho de pulso.

Esta modulación proporciona un control sobre el nivel de voltaje aplicado al motor sin incurrir en pérdidas como ocurría con el reostato. Esta regulación se basa en el recorte cíclico del voltaje continuo, proporcionado por el banco de baterías, que logra un voltaje de acuerdo a los requerimientos de velocidad o aceleración.

3.2.3.2. Control de un motor de AC

En general, los motores de inducción trifásicos cuentan con eficiencias superiores a los motores de corriente continua. El control presenta distintos desafíos tecnológicos para poder proporcionar un suministro energético alterno y trifásico a partir de una fuente de corriente continua (banco de baterías). Esto se logra gracias a otro sistema basado en la electrónica de potencia denominado inversor trifásico (Figura 3.4.).

Los inversores trifásicos son elementos esenciales dentro de un vehículo con tracción eléctrica, ya que son los encargados de regular la tensión suministrada al motor para alcanzar la velocidad deseada.

Este inversor debe funcionar como variador de frecuencia para poder manejar el motor sin fallas. Para maximizar las cualidades del motor de inducción trifásico, es necesario que el variador de frecuencia permita el control tanto de la frecuencia como de la amplitud de voltaje.

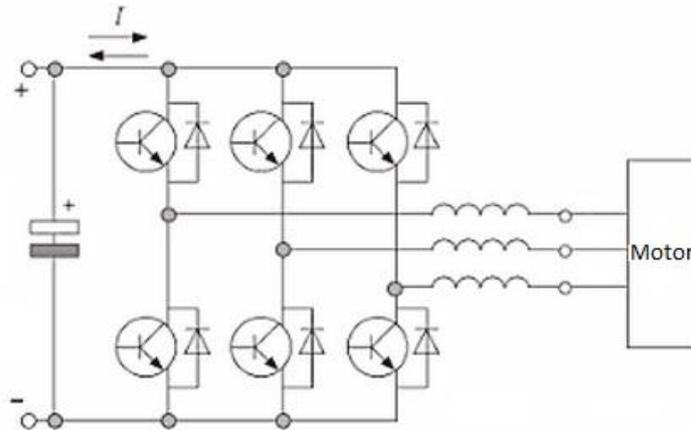


Figura 3.4. Circuito inversor común cuando se utiliza un motor asíncrono trifásico para la tracción eléctrica

Con este circuito se consigue obtener una onda sinusoidal (corriente alterna) a partir de una corriente continua utilizando el control PWM.

El circuito está formado por tres bobinas, una para cada fase más la carga trifásica, en este caso el motor, y seis interruptores. La batería, pasando por convertidor DC/DC, se conecta en los bornes positivo y negativo.

Lo que se pretende es que al variar la corriente continua hacia una dirección y otra, haciendo un uso adecuado de los interruptores, el motor vea la corriente de forma sinusoidal, aunque cabe mencionar que no se conseguirá una onda sinusoidal perfecta.

El control de velocidad es una de las aplicaciones más usadas en el manejo de motores de inducción, sin embargo, existen variadores de frecuencia mucho más complejos orientados al control de torque mediante la tecnología denominada vectorial. Estos dispositivos, en general, necesitan un procesamiento electrónico de señales que permita manejar y coordinar, el encendido y apagado de los interruptores de potencia (IGBT o MOSFET) que generan el voltaje trifásico. Hoy en día esta tarea la desempeña un DSP, que permite procesar una gran cantidad de información de control en poco tiempo, que permite coordinar en forma correcta estas complejas secuencias de encendido y apagado de los interruptores

3.2.4. Sistema de recarga

Es el sistema que permite recargar la energía en el banco de baterías. El proceso de recarga de energía debe realizarse en base a los criterios técnicos de mantenimiento de las baterías, por eso es importante la elección de las baterías adecuadas, esto significa proporcionar la energía necesaria para provocar la reacción electroquímica inversa en la batería que logra su recarga.

Los cargadores de baterías son dispositivos electrónicos que permiten una correcta carga de las baterías. Estos sistemas pueden ser alimentados mediante la red eléctrica o algún otro sistema que genere energía eléctrica. Hay que destacar que es factible incorporar otros sistemas de carga, que no sean cargadores, como por

ejemplo freno regenerativo, celdas solares, siempre y cuando se mantengan los criterios de carga dados por el fabricante de la batería.

Las técnicas para cargar baterías que se utilizan actualmente se mencionan a continuación.

3.2.4.1. Cargador de voltaje constante

Al aplicar un voltaje constante superior al voltaje electrolítico de las celdas de la batería, se produce un flujo de corriente hacia ésta. Si la batería se encuentra descargada presenta una resistencia interna baja, lo que genera altas corrientes de carga y a medida que la batería se carga, la resistencia interna de esta aumenta, lo que provoca que la corriente de cargadisminuya. Los cargadores de voltaje constante presentan un limitador de corriente para evitar corrientes demasiado altas, en el caso de baterías muy descargadas. Estos cargadores son relativamente simples por lo que no son muy caros.

3.2.4.2. Cargador de corriente constante

En este cargador, como su nombre lo indica, se utiliza una corriente constante de carga hasta que la batería alcance su voltaje de carga completa. Generalmente, este tipo de cargador es más rápido que el anterior.

Los sistemas electrónicos son un poco más complejos y un poco más caros que el anterior. Este cargador tiene el inconveniente de entregar corrientes altas cuando la batería alcanza su capacidad máxima, haciendo que la batería se caliente indebidamente con este exceso de corriente eléctrica.

3.2.4.3. Cargador de combinación de corriente/voltaje constante

Este cargador tiene un ciclo de carga que comienza con una alta y constante corriente de carga que eleva el voltaje de la batería.

Cuando se llega a un valor definido, este se cambia a un cargador de voltaje constante. Este sistema es más sofisticado y generalmente incrementa la vida útil de las baterías que permite reducir el calor generado durante el proceso de carga. Con esto se logra un cargador que tiene un mejor rendimiento y extiende la vida útil de la batería.

3.2.4.4. Cargador de pulsos

Este es uno de los métodos más avanzados de carga, siendo muy parecido al cargador de corriente o voltaje constante, con la diferencia que en vez de ser un valor constante se entrega un tren de pulsos. Este utiliza un tren de pulsos de corriente y/o voltaje (o combinaciones de estas) que son aplicados a la batería, que provocan corrientes que ingresan a la batería. Este tren de pulsos define las corrientes instantáneas de carga, como también la velocidad de carga.

La mayor ventaja de este cargador es que existe una reducción importante en el calentamiento de la batería debido a la carga, ya que tiene la posibilidad de reducir las corrientes cuando la batería está a punto de completar su carga.

Esta reducción de calentamiento de la batería logra una disminución en las pérdidas de energía del sistema por calor. Por lo tanto, se tiene un sistema que logra reducir los tiempos de carga y disminuir la energía utilizada. Hay que destacar que el ancho del pulso y la frecuencia utilizada influyen en la potencia que se le entrega a la batería y por ende en la velocidad de carga.

3.3. Vehículos híbridos

Anteriormente ya se describieron los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos, en este apartado se describen los vehículos híbridos eléctricos que son una mezcla de ambos.

El objetivo de desarrollar tecnologías híbridas es combinar dos o más fuentes de energía, de manera que las cualidades de cada una de las fuentes sean utilizadas para generación variable, de tal forma que las ventajas totales del sistema híbrido sean mayores que el costo de su configuración.

Un vehículo híbrido eléctrico posee tanto motor eléctrico, como motor de combustión interna, con esta doble motorización se consigue reducir uno de los mayores problemas de los vehículos eléctricos que es el elevado peso, tamaño y precio de las baterías actuales. Al utilizar un motor de combustión interna para recargar las baterías, se necesitan menor número de estas por lo que el peso total del vehículo es menor.

Frente a los vehículos de combustión interna tiene la ventaja de contaminar menos, incluso no contaminar usando solo el motor eléctrico y de consumir menos combustible ya que el motor de combustión interna es más pequeño y se puede hacer funcionar a velocidad prácticamente constante además de poder usar el freno regenerativo. Tienen la desventaja de ser más caros y más pesados que los vehículos de combustión interna y en lo que refiere a autonomía son similares gracias al motor de combustión interna.

Básicamente, los vehículos híbridos combinan un sistema de almacenamiento de energía, una unidad de potencia y un sistema de propulsión. Las alternativas para sistemas de almacenamiento incluyen baterías y ultracapacitores. Hoy las baterías son la opción más utilizada. La unidad de potencia puede estar formada por motores. La propulsión puede ser otorgada completamente por un motor eléctrico, configuración serie, o en conjunto con el motor de combustión interna, configuración paralelo.

La eficiencia y nivel de emisiones de un vehículo híbrido depende de la combinación de cada uno de los subsistemas, de cómo estos son integrados en un sistema global, y de las estrategias de control que integra a cada uno de los subsistemas.

Al igual que los vehículos puramente eléctricos un inconveniente es el tiempo de recarga de las baterías, este depende del tipo de batería que se haya elegido y de la red eléctrica a la que esté conectado el banco de baterías, pero aproximadamente se necesitan entre 6 y 10 horas para completar la carga.

A continuación se describen los componentes principales así como los dos tipos de configuración de los vehículos híbridos.

3.3.1. Componentes principales de un vehículo híbrido

Los vehículos híbridos al ser una mezcla entre un vehículo eléctrico y uno de combustión interna presentan en esencia los mismos sistemas descritos anteriormente para los vehículos eléctricos además de un moto-generador eléctrico y en algunos casos un sistema de frenos regenerativo.

- **Moto-generador eléctrico:**

El moto-generador está compuesto por un motor de combustión interna acoplado mecánicamente a un generador eléctrico el cual tiene la función de generar energía eléctrica para alimentar al cargador de baterías.

Los generadores eléctricos se pueden clasificar básicamente de acuerdo al tipo de señal eléctrica que producen, ya sea continua o alterna. Dentro de los generadores de corriente alterna se puede establecer una clasificación de acuerdo a los generadores auto excitados (síncronos) bien sea con corriente eléctrica continua inyectada en las bobinas del rotor o excitados mediante imanes permanentes y excitados a partir de la red eléctrica conectada a las bobinas del estator de la máquina (asíncronos).

- **Sistema regenerativo de frenos:**

Al frenar, el motor eléctrico actúa como generador, recuperando la energía cinética desde las ruedas, convirtiéndola en electricidad que puede ser guardada en la batería. Frenos de fricción tradicionales son requeridos, así como un sistema de control electrónico que permita maximizar la recuperación de energía y pueda operar el sistema dual de frenos. Sistemas comerciales en uso permiten recuperar alrededor de un 30% de la energía cinética típicamente perdida como calor en frenos de fricción. La energía recuperada al freno puede reducir el consumo energético en 15% en conducción en ciudad.

3.3.2. Configuración de los vehículos híbridos eléctricos

Los vehículos híbridos eléctricos combinan el motor de combustión interna de un vehículo convencional con un conjunto de baterías y el motor eléctrico de un vehículo eléctrico, de esta forma se obtiene un ahorro de combustible en comparación con los vehículos convencionales. Esta combinación representa una amplia autonomía y eficiencia así como un gran beneficio ambiental al disminuir significativamente las emisiones.

Dentro de los vehículos híbridos se pueden encontrar básicamente dos diferentes configuraciones: los vehículos híbridos serie y los vehículos híbridos paralelo.

3.3.2.1. Vehículos híbridos serie

Utilizan un motor de combustión interna acoplado a un generador que produce electricidad para cargar las baterías. El sistema formado por el motor de combustión interna y el generador se ocupa como una unidad auxiliar de energía, por lo que en la mayoría de los kilómetros se circula con las baterías. Cuando la duración del viaje excede las prestaciones de las baterías, el dispositivo generador se enciende. Para viajes más largos el dispositivo generador se puede conectar automáticamente cuando el nivel de descarga de las baterías alcanza un nivel predeterminado (Figura 3.5.).

De igual forma cuando se necesita mayor potencia por parte del motor eléctrico, se activa esta unidad auxiliar para satisfacer la demanda de corriente, de esta forma, el pico de corriente no lo entrega el banco de baterías.

Dependiendo del intervalo de velocidades que se desee disponer será la potencia de la unidad auxiliar. La tendencia es usar un intervalo grande de velocidades por lo que se requiere un sistema de generación de mucha potencia.

Este tipo de configuración resulta eficiente si el 80% de los kilómetros recorridos son alimentados por la energía de las baterías. En caso contrario es difícil la justificación de este tipo de propulsión híbrida ya que la energía de las baterías proviene en realidad del motor de combustión interna.

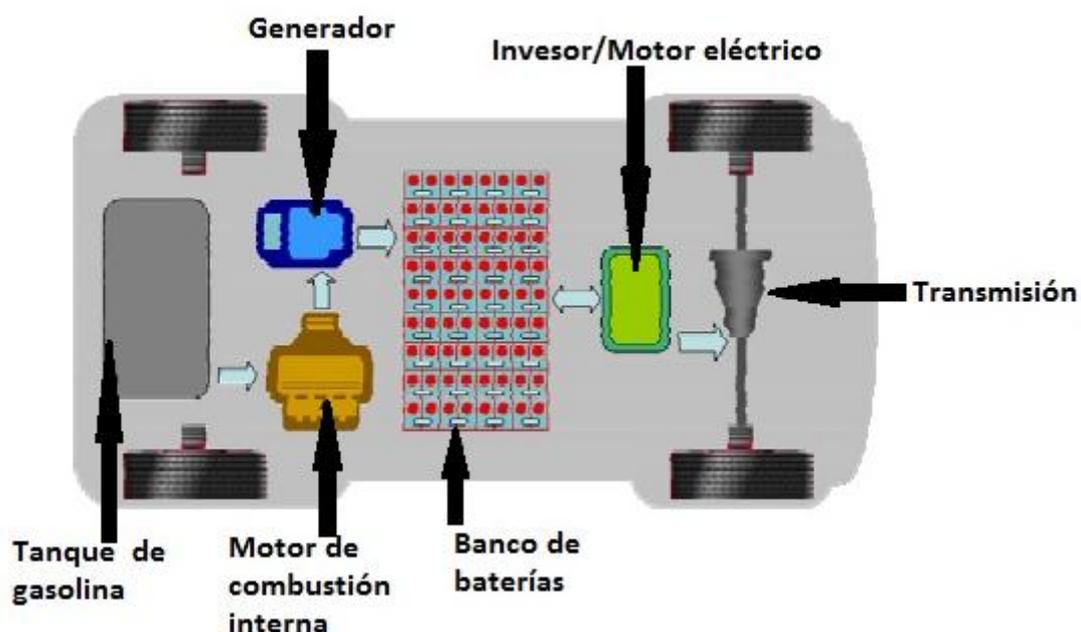


Figura 3.5. Esquema de un vehículo híbrido serie.

El motor de combustión interna impulsa un generador eléctrico que recarga las baterías, una vez rectificada la corriente, y alimenta al motor eléctrico el cual impulsa el vehículo.

3.3.2.2. Vehículos híbridos paralelo

A diferencia de la configuración serie, en esta configuración la potencia mecánica de las ruedas es proporcionada por dos unidades de manera independiente. Emplean tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico para accionar la tracción, asignando la energía de cada uno de acuerdo a las condiciones de conducción. Es llamado híbrido en paralelo porque la energía fluye en líneas paralelas. En esta configuración, el motor de combustión interna puede accionar la tracción al mismo tiempo que carga las baterías (Figura 3.6.).

En esta configuración el vehículo tiene más potencia debido a que tanto el motor de combustión interna como el eléctrico son capaces de proveer potencia simultáneamente.

La siguiente figura muestra un diagrama de la configuración paralelo al igual que los flujos de energía producidos.

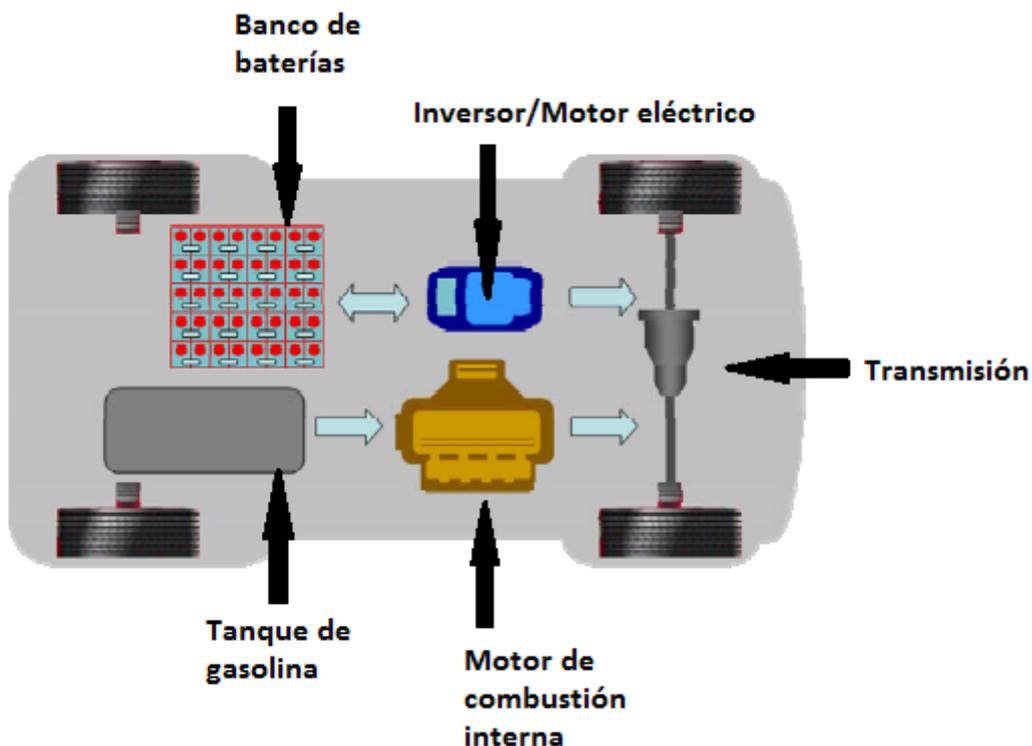


Figura 3.6. Esquema de un vehículo híbrido paralelo.

En resumen, la gran flexibilidad de configuración y control de los vehículos híbridos hacen que estos puedan ser diseñados de distinta forma, de modo que sea posible abarcar las necesidades particulares de cada grupo de mercado, y de esta forma tener vehículos más eficientes y con menor gasto de combustible. Por lo cual, la tracción eléctrica, y en particular el desarrollo de medios eléctricos de transporte, es

un área que ha presentado un desafío importante para los desarrolladores de vehículos de hoy en día, que estudian temas tan diversos como electrónica de potencia, diseño y control de motores, optimización, aerodinámica, etc., los que se combinan para buscar solución a las problemáticas planteadas para esta área del desarrollo. Dentro de los problemas a solucionar se encuentran el mejor aprovechamiento de la energía, mejorar la confiabilidad de los sistemas, reducir los costos de desarrollo y producción, ente otros.

4. Electrónica del automóvil

Para la mayoría de las personas el automóvil se ha convertido en un aparato de uso cotidiano, al ser, quizás, el más rentable y accesible de todos los aparatos disponibles actualmente para el transporte. Por esta razón a lo largo de los años, conforme ha evolucionado el automóvil, se han incorporado sistemas electrónicos y microcomputadoras que hacen más fácil y confortable el uso de los automóviles.

El progreso de la electrónica en el automóvil ha sido relativamente lento, debido principalmente a la relación entre el costo adicional y los beneficios. Las primeras aplicaciones electrónicas (aparte de la radio) se introdujeron en el automóvil comercial a finales de la década de 1950 y principios de la siguiente. Sin embargo, estas características no fueron bien recibidas por los clientes por lo que fueron descontinuadas en la producción de los automóviles.

Durante la década de 1970 ocurrieron dos acontecimientos importantes que iniciaron la tendencia hacia el uso de la electrónica moderna en el automóvil. En primera la introducción de regulaciones gubernamentales sobre las emisiones del escape y el ahorro de combustible, que requieren un mejor control y monitoreo del motor. Y en segunda instancia, debido al desarrollo de la electrónica digital de estado sólido con un costo por función relativamente menor por lo que se pudieron desarrollar más y mejores dispositivos para el control del motor y monitoreo de las condiciones generales del automóvil.

En la actualidad la presencia de dispositivos electrónicos dentro del automóvil es prácticamente indispensable y estos cada vez tienen más importancia en los sistemas de control del vehículo. Algunas aplicaciones actuales y potenciales de la electrónica en la industria automotriz son las siguientes:

- Control electrónico del motor para minimizar las emisiones del escape y maximizar el ahorro de combustible.
- Instrumentación para medir parámetros de rendimiento del vehículo y diagnosticar fallas del sistema de abordo.
- Control del sistema de transmisión.
- Control de velocidad del vehículo.
- Sistemas de seguridad.
- Mayor comodidad en el uso del vehículo.
- Entretenimiento, telecomunicaciones y sistemas de navegación (GPS).

Es necesario tener claros algunos conceptos sobre sistemas y electrónica para poder comprender los pasos realizados para el desarrollo de este trabajo, a continuación se define a algunos de ellos.

4.1. Concepto de sistema

Un sistema es un conjunto de componentes cuyo funcionamiento realiza una tarea específica. En la vida diaria encontramos diversos sistemas, por ejemplo, es común referirse a los huesos del cuerpo humano como el sistema óseo; o al conjunto de

carreteras que enlazan los centros de población de un país se conocen como sistema interestatal de carreteras.

Los sistemas electrónicos son similares en el sentido de que están compuestos por un conjunto de partes eléctricas y electrónicas de tal manera que pueden realizar una función específica. Los componentes de un sistema electrónico incluyen, transistores, diodos, resistores y capacitores, así como piezas eléctricas estándar como interruptores y conectores entre otros. Todos estos componentes están interconectados con alambres individuales o en placas de circuitos impresos. Además, muchos sistemas electrónicos del automóvil incorporan componentes especializados conocidos como sensores o actuadores que permiten al sistema electrónico interactuar con los sistemas mecánicos del vehículo.

Cualquier sistema electrónico puede describirse bajo diversos niveles de abstracción, desde una descripción pictórica o un diagrama esquemático en el nivel más bajo hasta un diagrama de bloques en el nivel más alto.

4.1.1. Sistemas analógicos

A pesar de que los sistemas digitales están reemplazando rápidamente a los sistemas analógicos en la electrónica automotriz, es más sencillo describir primero a los sistemas analógicos ya que generalmente se pueden entender de manera más intuitiva que los sistemas digitales. En el caso de las aplicaciones de control e instrumentación, el sensor convierte continuamente la variable de entrada en una señal eléctrica proporcional. Es decir, a medida que varía la cantidad de entrada, el voltaje de salida del sensor varía proporcionalmente. En términos matemáticos, si x es la amplitud de la cantidad de entrada (por ejemplo presión, desplazamiento o temperatura), el voltaje de salida de un sensor ideal (denotado por v) es continuamente proporcional a x .

$$v = k_s \cdot x$$

En esta expresión k_s representa lo que se denomina como ganancia del sensor. El aspecto más importante de este sistema analógico es que funciona continuamente con el tiempo (Figura 4.1.).

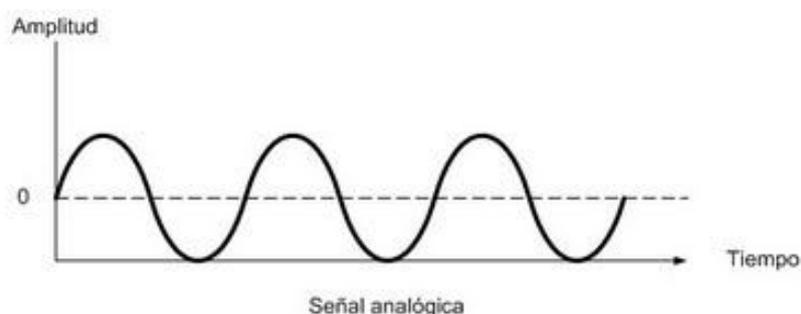


Figura 4.1. Señal analógica

4.1.2. Sistemas digitales

En contraste con un sistema electrónico analógico que opera en tiempo continuo, un sistema digital opera en instantes discretos de tiempo. Este proceso de representación de una cantidad continua respecto a valores de tiempo discretos específicos se denomina muestreo (Figura 4.2.).

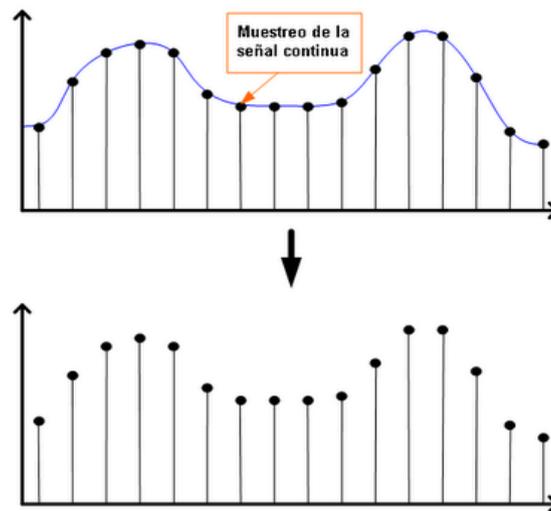


Figura 4.2. Muestreo de una señal continua.

La salida de los sensores, que permiten al equipo electrónico interactuar con el entorno, es normalmente una señal analógica, continua en el tiempo. En consecuencia, esta información debe convertirse a binaria (cada dato analógico decimal codificado a una palabra formada por unos y ceros) con el fin de adaptarla a los circuitos procesadores y de presentación. Un convertidor analógico-digital (CAD) es un circuito electrónico integrado cuya salida es la palabra digital resultado de convertir la señal analógica de entrada.

La conversión a digital se realiza en dos fases: cuantificación y codificación. Durante la primera se muestrea la entrada y a cada valor analógico obtenido se asigna un valor o estado, que depende del número de bits del CAD. El valor cuantificado se codifica en binario en una palabra digital, cuyo número de bits depende de las líneas de salida del CAD. Estos dos procesos determinan el diseño del circuito integrado.

En la práctica, el proceso de conversión está sujeto a numerosas limitaciones resultado de los procesos de fabricación. Las más relevantes son el tiempo de conversión y la finitud del número de estados de salida. La conversión involucra un tiempo y, en consecuencia, supone una incertidumbre que limita la velocidad máxima de la entrada. Los valores discretos del proceso de cuantificación llevan consigo un error y una limitación de resolución del circuito. La elección del CAD en un diseño electrónico dependerá de la adaptación de sus rasgos a los requerimientos de la aplicación.

4.2. Instrumentos

Un instrumento (o un sistema de instrumentación) es un dispositivo cuya función es medir alguna magnitud física específica. Los instrumentos automotrices tradicionalmente han sido mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos o una combinación de éstos. Sin embargo, la instrumentación automotriz moderna es principalmente electrónica. Estos instrumentos electrónicos o sistemas de instrumentación se emplean para medir las diferentes variables físicas que influyen en el desempeño de un vehículo, tales como:

- Velocidad del vehículo.
- Distancia total recorrida.
- Velocidad angular del motor (rpm).
- Cantidad de combustible, tasa de flujo o ambas.
- Presión de aceite.
- Temperatura del refrigerante del motor.
- Corriente de carga del alternador.
- Nivel de voltaje de baterías en el caso de los vehículos eléctricos e híbridos.

Para entender la instrumentación empleada para medición es oportuno conocer una definición de medición.

4.2.1. Medición

Una medición se define como una comparación numérica de una magnitud desconocida de una cantidad física dada con una magnitud estándar de la misma cantidad física. En este sentido, el resultado de una medición es normalmente un valor numérico que expresa el valor indicado de la medición como un múltiplo del estándar correspondiente, sin embargo, se pueden otros dispositivos de representación gráfica en donde se presentan mensajes simples. La instrumentación automotriz no siempre exhibe un resultado numérico, generalmente cuando un parámetro dado cae fuera de los límites permitidos, el sistema de instrumentación activa una alarma que da aviso sobre el estado de la variable medida.

En cualquier medición realizada con cualquier instrumento existen varios aspectos que se deben tomar en cuenta, tales como:

- Normas o estándares.
- Precisión.
- Calibración.
- Exactitud.
- Errores.
- Confiabilidad.

Cada uno de estos aspectos es de gran importancia en el desempeño del sistema de instrumentación.

Las magnitudes estándar de las variables físicas medidas por cualquier instrumento son mantenidas por el instituto a cargo de las normas y la tecnología en Estados

Unidos, *National Institute of Standards and Technology*. Esas magnitudes estándar y las relaciones fundamentales entre las variables determinan las unidades de cada cantidad física.

4.2.1.1. Precisión

La precisión de cualquier instrumento se relaciona con el número de cifras significativas que pueden leerse en un dispositivo de exhibición. Mientras mayor sea el número de cifras significativas presentadas, mayor es la precisión del instrumento.

4.2.1.2. Calibración

La calibración es el establecimiento de los parámetros de un instrumento de tal manera que el valor medido corresponda con el valor real de la magnitud que está sometida a la medición.

4.2.1.3. Exactitud

La exactitud de cualquier medición es la conformidad del valor indicado con el valor verdadero de la magnitud medida.

La exactitud requerida para los sistemas electrónicos automotrices varía dependiendo de la aplicación, en general aquellos instrumentos empleados únicamente para mostrar información sobre el estado del automóvil al conductor tienen menores requerimientos de exactitud que los que se utilizan para aplicaciones de control o diagnóstico del motor.

4.2.1.4. Errores

El error se define como la diferencia entre los valores verdadero e indicado, en consecuencia la exactitud y el error varían inversamente.

Los errores en cualquier medición se clasifican como sistemáticos o aleatorios. Los errores sistemáticos son resultado de variaciones conocidas en el desempeño del instrumento para las cuales se pueden hacer correcciones si se desea. Existen muchas fuentes de errores sistemáticos, incluyendo variaciones de la temperatura durante la calibración, carga y respuesta dinámica. Debido a que virtualmente cualquier componente de un instrumento es potencialmente susceptible a variaciones por la temperatura, se debe tener mucho cuidado en el diseño del instrumento para minimizar estas variaciones durante la calibración. La mayoría de los instrumentos automotrices tienen relativamente bajos requerimientos de precisión por lo que las variaciones de la temperatura durante la calibración son insignificantes.

Los errores aleatorios son esencialmente fluctuaciones aleatorias en el valor indicado para la medición. La mayoría de los errores aleatorios son resultado del ruido.

Los errores de carga sistemáticos se deben a la energía extraída por un instrumento al hacer una medición. Cuando no es insignificante la energía extraída de un sistema

bajo medición, dicha energía provoca una alteración en la variable que está siendo medida.

Otra fuente significativa de error sistemático es la respuesta dinámica del instrumento. Cualquier instrumento tiene una tasa de respuesta limitada a una entrada que cambia muy rápido. Entre mayor sea el ancho de banda de un instrumento más ágilmente puede seguir los cambios rápidos en la variable medida. En muchas aplicaciones de instrumentación automotriz el ancho de banda se reduce intencionalmente para evitar fluctuaciones rápidas en las lecturas.

4.2.1.5. Confiabilidad

La confiabilidad de un sistema de instrumentación se refiere a su capacidad para realizar la función para la que se diseñó de manera exacta y continua siempre que se requiera, bajo condiciones desfavorables y por un tiempo relativamente largo. La confiabilidad debe desarrollarse dentro del sistema empleando márgenes de diseño adecuados y componentes de buena calidad que operen tanto en el rango deseado de temperaturas como en las condiciones ambientales aplicables.

4.3. Sistema básico de medición

Cada sistema de medición tiene tres componentes básicos: sensor, procesamiento de señales y exhibición. En esencia, todos los sistemas electrónicos de medición incorporados en los automóviles tienen esta estructura básica independientemente de la variable física a medir, el tipo de exhibición que se emplea o si el procesamiento de las señales es digital o analógico.

La comprensión de los sistemas de instrumentación electrónica de un automóvil se facilita considerando algunas características fundamentales de los tres componentes básicos.

4.3.1. Sensor

Un sensor es un dispositivo que convierte energía de la forma de una variable de medición en una señal eléctrica.

Alternativamente, un sensor puede tener una salida digital lo cual lo hace directamente compatible con el procesamiento digital de señales, en este caso, la salida es el equivalente eléctrico de un valor numérico en el sistema de numeración binario. Por supuesto, un sensor es susceptible de error al igual que cualquier sistema o componente de un sistema. Las fuentes de errores potenciales incluyen la carga, la respuesta dinámica finita, desviación de la calibración y comportamiento no lineal. Algunas veces es posible compensar estos errores, sin embargo si un sensor tiene un ancho de banda limitado, introducirá errores cuando mida cantidades de entrada que presenten muchos cambios en un tiempo muy corto.

Un sensor ideal tiene una característica de transferencia lineal, por lo tanto se requiere cierto procesamiento de señales para hacer que la señal de salida tenga un comportamiento lineal. En ocasiones, un sensor no lineal puede operar

satisfactoriamente sin necesidad de procesar la señal si se trabaja en una región casi lineal de su característica de transferencia.

Los errores aleatorios en los sensores electrónicos son ocasionados principalmente por ruido eléctrico interno, el cual puede ser originado por vibraciones moleculares debidas al calor (ruido térmico) o movimiento aleatorio de electrones en semiconductores (ruido de detonación). En ciertos casos un sensor puede estar respondiendo a cantidades diferentes de la variable que está siendo medida. Un sensor ideal responde solamente a una cantidad física o estímulo, sin embargo, los sensores reales solo muy pocas veces son perfectos y generalmente responderán de alguna forma a estímulos externos.

4.3.2. Visualizadores y actuadores

Para ser útil con fines de medición, un sistema de instrumentación electrónico debe encargarse de que los resultados de la medición estén a disposición del usuario. Esto se realiza mediante un visualizador, que produce valores numéricos para el usuario. Estos visualizadores pueden ser digitales o analógicos. En las aplicaciones automotrices un visualizador es simplemente un aviso o alarma (una señal luminosa, por ejemplo) para el conductor, que le indica que un valor está fuera de la tolerancia para una variable o parámetro dados.

Los visualizadores, al igual que los sensores, son dispositivos de conversión de energía. Tienen un ancho de banda, un rango dinámico y características de calibración; por lo tanto presentan el mismo tipo de errores que los sensores. Como sucede con los sensores, muchas de sus deficiencias pueden reducirse o eliminarse con el procesamiento de señales adecuado.

Un actuador es un dispositivo de conversión de energía que tiene una señal de entrada eléctrica y una señal de salida mecánica. Los actuadores automotrices eléctricos, válvulas controladas por solenoide e interruptores.

4.3.3. Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es cualquier operación que se realiza sobre las señales que viajan entre el sensor y el visualizador, este procesamiento convierte la señal del sensor en una señal eléctrica que bien puede mostrarse en un visualizador o activar un actuador. Además puede incrementar la exactitud, confiabilidad o legibilidad de la medición. Con este procesamiento podemos acondicionar la señal de salida de un sensor no lineal para que se comporte como lineal, o puede suavizar la respuesta a la frecuencia de un sensor. El procesamiento de señales puede realizarse ya sea con un subsistema digital o con uno analógico. La tendencia en los sistemas electrónicos automotrices es implementar sistemas de instrumentación completamente o en su mayoría digitales, por esta razón el uso de microcomputadoras dentro de los automóviles es cada vez más común.

4.3.4. Sistemas de control

Los sistemas de control se emplean para regular la operación de otros sistemas. El sistema que está siendo controlado se conoce como planta del sistema y el que realiza la acción de control se denomina controlador electrónico.

La descripción de un sistema de control se hace mediante sus elementos fundamentales, los cuales son los objetivos del control, los componentes del sistema y los resultados o salidas. Los objetivos de un sistema de control son las medidas cuantitativas de las tareas que van a ser realizadas por el sistema. Éstos describen los valores deseados de una variable o múltiples variables y que son especificados por el usuario. Los resultados se denominan salidas o variables controladas. Típicamente, el objetivo de un sistema de control es regular los valores de las salidas en una forma prescrita por las entradas del sistema de control.

Un sistema de control debe cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Realizar su función con exactitud.
2. Presentar una respuesta rápida.
3. Ser estable.
4. Responder sólo a entradas válidas (inmunidad al ruido).

La exactitud de un sistema de control determina qué tan cercana estará la salida del sistema respecto a la salida deseada, con un comando de entrada de valor constante. Una respuesta rápida determina con qué cercanía la salida de un sistema rastreará o seguirá a un comando de entrada cambiante. La estabilidad de un sistema describe cómo se comporta un sistema cuando la señal de entrada realiza un cambio, particularmente un cambio repentino. La salida de un sistema de control inestable diferirá respecto a su valor deseado con base en su entrada. En el caso de una aplicación automotriz, un sistema de control debe ser estable y controlable en todo rango de operación deseado. El diseño de un buen controlador minimizará la probabilidad de una operación inestable incluso en condiciones extremas de operación. Un sistema deberá mantener su exactitud respondiendo solamente a entradas válidas. Cuando el ruido o algunas otras alteraciones amenazan cambiar la salida de la planta del sistema, un buen diseño eliminará la respuesta a tales entradas del desempeño del sistema tanto como sea posible. Un sistema de control con una respuesta mínima a entradas de ruido, se dice que tiene buena inmunidad al ruido. La exactitud, una respuesta rápida, la estabilidad e inmunidad al ruido están todas determinadas por la configuración del sistema de control y los parámetros elegidos para una planta particular.

El propósito de un sistema de control es determinar la salida del sistema (planta) que está siendo controlado respecto a la entrada y de acuerdo con las características de operación del controlador. La relación entre la entrada del controlador y la salida deseada para la planta se denomina ley de control del sistema. El valor deseado para la salida de la planta se denomina también punto de ajuste.

La salida de un sistema de control electrónico es una señal eléctrica que debe convertirse en alguna acción mecánica (o de otro tipo) a fin de regular la planta. Un dispositivo que convierte la señal eléctrica en la acción mecánica deseada se denomina actuador, como ya se mencionó anteriormente. En términos generales, un

actuador tiene terminales eléctricas de entrada que reciben energía eléctrica proveniente de las salidas del control, al recibir una señal de control, el actuador realiza una acción mecánica para llevar a cabo el control del sistema.

Existen dos categorías principales de sistemas de control: de ciclo abierto (o alimentación directa) y de ciclo cerrado (o de retroalimentación).

4.3.4.1. Control de ciclo abierto

En un sistema de control abierto la entrada de comando se envía al controlador electrónico que realiza una operación de control sobre la entrada para generar una señal eléctrica intermedia. Esta señal eléctrica es la entrada al actuador que genera una entrada de control que va hacia la planta, la cual a su vez, regula la salida de la planta al valor deseado. Este tipo de control se denomina control de ciclo abierto ya que la salida del sistema nunca se compara con la entrada de comando para ver si hay correspondencia (Figura 4.3.).

La operación de la planta es regulada directamente por el actuador por lo cual la salida del sistema también podría verse afectada por alteraciones externas que son resultado del ambiente de operación. En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques que ejemplifica la operación de un controlador de ciclo abierto básico.

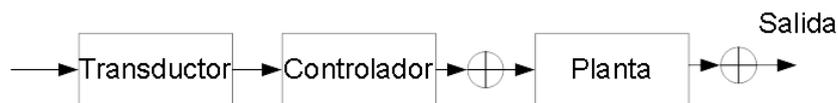


Figura 4.3. Diagrama de bloques que ejemplifica la operación de un controlador de ciclo abierto básico.

Una de las principales desventajas del controlador de ciclo abierto es su incapacidad para compensar los cambios que podrían ocurrir en el controlador o la planta debido a las mencionadas alteraciones externas.

4.3.4.2. Control de ciclo cerrado

A diferencia de un sistema de control de ciclo abierto, en el control de ciclo cerrado la salida real del sistema se compara con el valor deseado de la salida; de esta forma se eliminan los cambios en la salida debidos a alteraciones externas.

El potencial de un cambio en un sistema de ciclo abierto es lo que generó el control de retroalimentación o de ciclo cerrado. En un sistema de control de ciclo cerrado se obtiene, mediante un sensor, una medición de la variable de salida que está siendo controlada y esto se retroalimenta al controlador (Figura 4.4.).

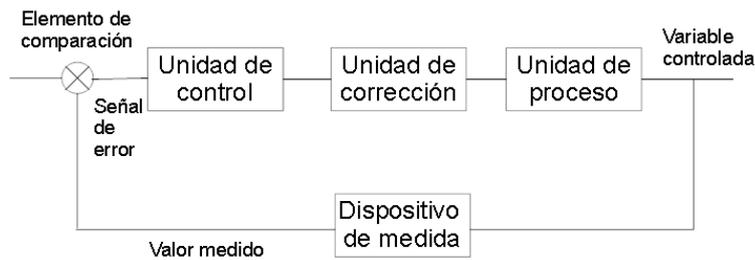


Figura 4.4. Diagrama de bloques que ejemplifica la operación de un controlador de ciclo cerrado básico.

El valor medio de la variable controlada se compara con el valor deseado con base en el valor de entrada de referencia. Se genera una señal de error basada en la diferencia entre los valores deseado y real de la señal de salida y de esta forma el controlador genera una señal en el actuador que tiende a reducir el error a cero. Además de esta ventaja, la retroalimentación tiene otros beneficios sobre el desempeño del sistema ya que le da mayor estabilidad al sistema y elimina los efectos de alteraciones externas sobre la salida del sistema.

4.4. Empleo de microcontroladores en los sistemas de medición y control del automóvil.

Para comprender el funcionamiento de los microcontroladores y sus aplicaciones es preciso conocer primero su arquitectura y programación en general, así como sus diferencias con un microprocesador.

Una microcomputadora se compone por tres bloques fundamentales: la CPU (Central Processing Unit), la memoria, la entrada y la salida. Los bloques se conectan entre sí mediante grupos de líneas eléctricas denominadas buses. Los buses pueden ser de direcciones (si transportan direcciones de memoria o de entrada y salida), de datos (si transportan datos o instrucciones) o de control (si transportan señales de control diversas) (Figura 4.5.).

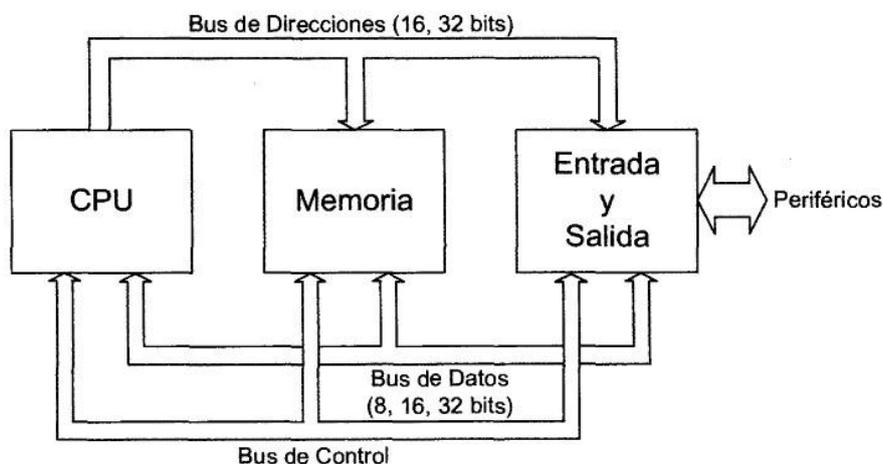


Figura 4.5. Configuración básica general de una microcomputadora, la CPU es el microprocesador.

La CPU es el cerebro de una microcomputadora y actúa bajo el control del programa almacenado en la memoria. La CPU se ocupa básicamente de traer las instrucciones del programa desde la memoria, interpretarlas y hacer que se ejecuten. La CPU también incluye los circuitos para realizar operaciones aritméticas y lógicas elementales con los datos binarios en la denominada unidad aritmética y lógica (ALU: Arithmetic and Logic Unit).

En una microcomputadora la CPU es el microprocesador, es decir, el circuito integrado capaz de realizar las funciones antes mencionadas. Un microcontrolador es una microcomputadora contenida en un circuito integrado.

Los microprocesadores se han desarrollado principalmente orientados al mercado de las computadoras personales y las estaciones de trabajo, donde se requiere una elevada potencia de cálculo, el manejo de gran cantidad de memoria y una gran velocidad de procesamiento. Un parámetro importante en los microprocesadores es el tamaño de sus registros internos (8, 16, 32 o 64 bits), que determina la cantidad de bits que pueden procesar simultáneamente.

Los microcontroladores se han desarrollado para cubrir diversas aplicaciones en el área de la automoción, las comunicaciones y telefonía, en instrumentos electrónicos, en equipos médicos e industriales de todo tipo, en electrodomésticos, etc. Están concebidos básicamente para ser utilizados en aplicaciones puntuales, es decir, aplicaciones donde el microcontrolador debe realizar un pequeño número de tareas al menor costo posible. En estas aplicaciones, el microcontrolador ejecuta un programa almacenado permanentemente en su memoria, el cual trabaja con algunos datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior a través de líneas de entrada y salida de que dispone. El microcontrolador es parte de la aplicación: es un controlador incrustado o embebido en la aplicación (embedded controller). En aplicaciones complejas se utilizan varios microcontroladores, cada uno de los cuales se ocupa de un pequeño grupo de tareas.

Hay varias características que son deseables en un microcontrolador:

1. Recursos de entrada y salida. Más que en la capacidad de cálculo del microcontrolador, muchas veces se requiere hacer énfasis en los recursos de entrada y salida del dispositivo, tales como el manejo individual de líneas de entrada y salida, el manejo de interrupciones, señales analógicas, etc.
2. Espacio optimizado. Se trata de tener los elementos esenciales para el desarrollo de una aplicación en el menor espacio posible y a un precio razonable.
3. Se procura que el diseñador disponga del microcontrolador hecho a la medida de su aplicación, por esta razón los fabricantes ofrecen familias de microcontroladores compuestas por miembros que ejecutan el mismo repertorio de instrucciones pero que difieren en sus componentes de hardware (más o menos memoria, más o menos dispositivos de entrada y salida, etc.), permitiendo así que el diseñador pueda elegir el microcontrolador idóneo para cada aplicación.
4. Seguridad en el funcionamiento del microcontrolador. Una medida de seguridad elemental es garantizar que el programa que esté

ejecutando el microcontrolador sea el que responde, es decir, que si el microcontrolador se “pierde”, esto pueda ser rápidamente advertido y se tome alguna acción para corregir la situación. Un componente común en los microcontroladores y que contribuye a una operación segura es el “perro guardián” (WDT: Watchdog Timer), dispositivo que no existe en las computadoras personales.

5. Bajo consumo. Dado que hay muchas aplicaciones donde se desea utilizar baterías como fuente de alimentación, es altamente deseable que el microcontrolador consuma muy poca corriente cuando no está realizando ninguna acción.
6. Protección de los programas frente a copias. Se trata de proteger la información almacenada en la memoria, es decir, el programa de la aplicación contra lecturas furtivas de la memoria del dispositivo. Los microcontroladores disponen de mecanismos que los protegen contra estas acciones.

4.4.1. Estructura de un microcontrolador

Un microcontrolador combina los recursos fundamentales disponibles en un microprocesador, es decir, la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria y los recursos de entrada y salida en un único circuito integrado (Figura 4.6.).

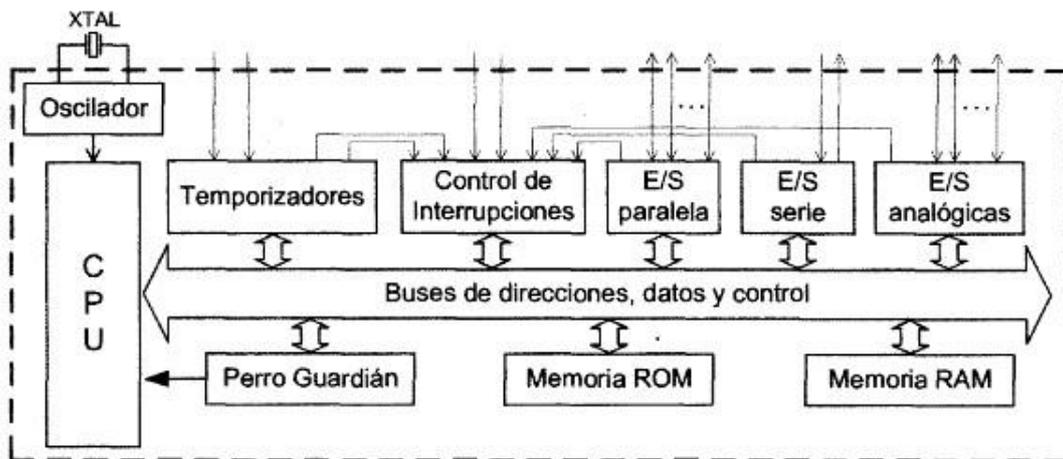


Figura 4.6. Diagrama de bloques de un microcontrolador.

Los microcontroladores disponen de un oscilador que genera los pulsos que sincronizan todas las operaciones internas. El oscilador puede ser del tipo RC aunque generalmente se prefiere que esté controlado por un cristal de cuarzo (XTAL) debido a su gran estabilidad de frecuencia. La velocidad de ejecución de las instrucciones del programa es directamente proporcional a la frecuencia del oscilador del microcontrolador.

Igual que en un microprocesador, la CPU es el “cerebro” del microcontrolador. Esta unidad trae las instrucciones del programa, una a una, desde la memoria donde están almacenadas, las decodifica y hace que se ejecuten. En la CPU se incluyen los circuitos de la ALU para realizar operaciones aritméticas y lógicas.

La CPU de un microcontrolador dispone de diferentes registros, algunos de propósito general y otro para propósitos específicos. Entre estos últimos están el registro de instrucción, el acumulador, el registro de estado, el contador de programa, el registro de direcciones de datos y el puntero de la pila.

- El registro de instrucción (RI) almacena la instrucción que está siendo ejecutada por la CPU, es invisible para el programador.
- El acumulador (ACC: accumulator) es el registro asociado a las operaciones aritméticas y lógicas que se pueden realizar en la ALU. En cualquier operación, uno de los datos debe estar en el ACC y el resultado se obtiene en el mismo ACC. Este registro no existe en los microcontroladores PIC que tienen en cambio el registro W (Working Register), con características muy parecidas a las del ACC.
- El registro de estado (STATUS) agrupa los bits indicadores de las características del resultado de las operaciones aritméticas y lógicas realizadas en la ALU. Entre estos indicadores están el signo del resultado, si el resultado es cero, si hay acarreo, el tipo de paridad del resultado, etc.
- El contador de programa (PC: Program Counter) es el registro de la CPU donde se almacenan direcciones de instrucciones. Cada vez que la CPU busca una instrucción en la memoria, el PC se incrementa, apuntando así a la siguiente instrucción. En un instante de tiempo dado, el PC contiene la dirección de la instrucción que será ejecutada a continuación. Las instrucciones de transferencia de control modifican el valor del PC.
- El registro de direcciones de datos (RDD) almacena direcciones de datos situados en la memoria. Este registro es indispensable para el direccionamiento de datos en la memoria. El RDD toma diferentes nombres según el microcontrolador. En los PIC el RDD es el registro FSR (File Select Register).
- Al puntero de la pila (SP: Stack Pointer) es el registro que almacena direcciones de datos en la pila. Los microcontroladores PIC carecen de registro SP.
- La memoria del controlador es el lugar donde son almacenadas las instrucciones del programa y los datos que manipula. En un microcontrolador siempre hay dos tipos de memoria: la memoria RAM (Random Access Memory) y la memoria ROM (Read Only Memory). La memoria RAM es una memoria de lectura y escritura volátil, es decir, pierde la información almacenada cuando falta la energía que alimenta la memoria. La memoria ROM es una memoria de solo lectura y no volátil. Tanto la memoria RAM como las memorias ROM son de acceso aleatorio pero la costumbre ha dejado el nombre de RAM para las memorias de lectura y escritura. El término "acceso aleatorio" se refiere a que el tiempo necesario para localizar un dato no depende del lugar de la memoria donde esté almacenado. En cambio, en las memorias de acceso secuencial cuanto más alejado esté un dato de la posición a la que se ha accedido por última vez, más se tarda en localizarlo.

La memoria ROM se usa para almacenar permanentemente el programa que debe ejecutar el microcontrolador. En la memoria RAM se almacenan temporalmente los datos con los que trabaja el programa. Una gran cantidad de microcontroladores disponen de alguna memoria no volátil del tipo

EEPROM para almacenar datos fijos o que sólo sean cambiados esporádicamente.

La cantidad de memoria ROM disponible es normalmente muy superior a la cantidad de memoria RAM. Esto debido a dos razones: la primera es que la gran mayoría de las aplicaciones requieren programas que manejan pocos datos; entonces basta una memoria RAM en la que se puedan almacenar decenas de datos. La segunda razón es que la memoria RAM ocupa mucho más espacio que la ROM en el circuito integrado, de modo que es mucho más costosa que ésta.

- La entrada y salida es particularmente importante en los microcontroladores pues a través de ellas el microcontrolador interacciona con el exterior. Forman parte de la entrada y salida los puertos paralelo y serie, los temporizadores y la gestión de las interrupciones. El microcontrolador puede incluir también entradas y salidas analógicas asociadas a convertidores A/D y D/A. tienen particular importancia los recursos que garantizan un funcionamiento seguro del microcontrolador como, como el denominado perro guardián.

Los puertos paralelos se organizan en grupos de hasta 8 líneas de entradas y salidas digitales. Normalmente es posible manipular individualmente las líneas de los puertos paralelos. Los puertos serie pueden ser de varios tipos, según la norma de comunicación que implementen: RS-232C, I²C, USB, Ethernet, etc.

Un requisito general para que un microcontrolador se pueda utilizar en un gran número de aplicaciones es que tenga muchos recursos de entrada y salida. Este requisito está relacionado con el número de terminales del circuito integrado. A la vez se desea tener estos recursos en un circuito integrado lo más pequeño posible. Si cada bloque de entrada y salida tuviera terminales exclusivas en el microcontrolador, posiblemente no alcanzarían las terminales o habría que fabricar microcontroladores con muy pocos recursos de entrada y salida. La solución para este problema es que un número importante de terminales del circuito integrado sean compartidos por unidades de entrada y salida diferente, es decir, una misma terminal puede estar conectada internamente a más de un bloque de entrada y salida.

4.4.1.1. El perro guardián

El perro guardián (WDT: Watchdog Timer) es un recurso disponible en muchos microcontroladores el cual está compuesto por un oscilador y un contador binario de N bits. El oscilador puede ser el oscilador principal del microcontrolador, aunque se prefiere un oscilador independiente. La salida de la última etapa del contador está conectada al circuito de reset del microcontrolador. El conteo no se puede detener de ninguna forma pero el contador se puede borrar (poner a 0) desde el programa (Figura 4.7.).

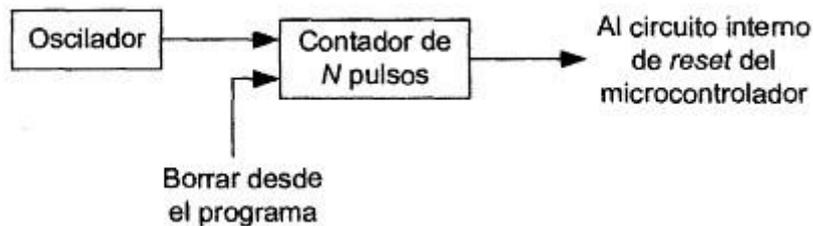


Figura 4.7. Esquema básico de un perro guardián.

El principio de funcionamiento del WDT es el siguiente: el oscilador envía sus pulsos periódica y permanentemente a la entrada del reloj contador. Si el contador llega a contar los N pulsos, se desborda, su salida se activa y produce el reset del microcontrolador.

El objetivo del programador es evitar el desbordamiento del WDT. Dado que una vez iniciado el conteo, el WDT no se puede detener, la única forma de evitar su desbordamiento, y con ello el reset del microcontrolador, es poner a 0 el contador del WDT desde el programa, y hacerlo en intervalos de tiempo más cortos que el tiempo que se tarda en contar los N pulsos. Para conseguirlo, el programador debe distribuir a lo largo del programa las instrucciones que borran al WDT. Si el programa se ejecuta correctamente, el WDT nunca se desborda pues antes de hacerlo ha sido borrado oportunamente desde el programa. En cambio, si el microcontrolador se pierde y el programa deja de ser ejecutado en la secuencia correcta, el WDT no es borrado a tiempo, se desborda y produce el reset del microcontrolador, con lo que es posible retomar el control y reconducir el programa por el camino correcto.

4.4.1.2. Reset

El reset es una acción con la cual se inicia el trabajo de los microcontroladores. Esta acción se ejecuta cuando se aplica una señal, denominada de reset, a una terminal, designada también como reset. El efecto práctico de la señal es poner el contador de programa (PC) en un valor predeterminado haciendo así que el microcontrolador comience a ejecutar las instrucciones que están a partir de esa posición de memoria apuntada por el PC.

En un microcontrolador hay diversas causas de reset como son el reset por falla de alimentación (power-glitch reset, brown-out reset) y el reset por desbordamiento de WDT.

El reset por fallo de alimentación se produce cuando la alimentación cae momentáneamente por debajo de un cierto valor umbral específico para cada microcontrolador.

El reset por desbordamiento de WDT se produce cuando por alguna razón no se ha refrescado a tiempo este registro. Generalmente ello significa que el microcontrolador se ha perdido en la ejecución del programa, es decir, se ha salido de la secuencia correcta.

Es muy importante que el microcontrolador efectúe una acción de reset cuando se producen fallos de este tipo. Ello garantiza que en situaciones como éstas, en las que el microcontrolador perdería la secuencia correcta de instrucciones del programa, no salte a una dirección aleatoria sino que vaya a una dirección determinada (la del vector de reset) donde se pueden efectuar acciones que contrarresten el fallo que se ha producido.

En algunos microcontroladores, como los PIC, se señala la causa del reset mediante algunos bits de un registro del microcontrolador; de esta forma en el programa se puede indagar sobre la causa del reset y realizar acciones correspondientes.

4.4.2. Arquitecturas von Neumann y Harvard

Las arquitecturas von Neumann y Harvard son modelos generales del hardware de las computadoras que presentan dos soluciones diferentes al problema de la conexión de la CPU con la memoria y a la organización de la memoria como almacén de instrucciones y datos.

La arquitectura von Neumann utiliza una memoria única para instrucciones y datos, esto significa que con un mismo bus de direcciones se localizan instrucciones y datos y que por un único bus de datos transitan tanto instrucciones como datos. La misma señal de control que emite la CPU para leer un dato sirve para leer una instrucción. No hay señales de control diferentes para datos e instrucciones. Aunque se usa memoria ROM para almacenar el programa y RAM para los datos, para la CPU no hay tal distinción, sino que ROM y RAM forman un conjunto único (una memoria de lectura y escritura) para el cual la CPU emite señales de control, de direcciones y datos. En la siguiente figura se muestra el esquema general de la arquitectura von Neumann, la memoria se conecta a la CPU mediante los buses de direcciones (BDIR), datos (BDAT) y control (BCON) (Figura 4.8.).

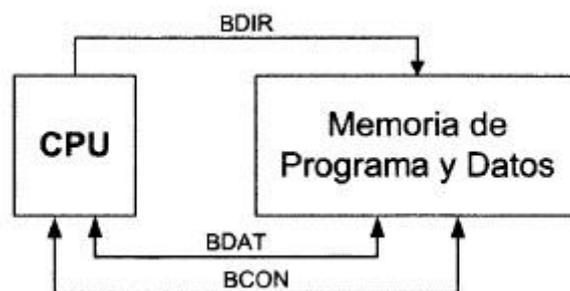


Figura 4.8. Diagrama de bloques de la arquitectura von Neumann.

La arquitectura Harvard utiliza memorias separadas para instrucciones y datos. En este caso la memoria de programa (que almacena instrucciones) tiene su bus de direcciones (de instrucciones), su propio bus de datos (más bien es un bus de instrucciones) y su bus de control. Por otra parte, la memoria de datos tiene sus propios buses de direcciones, datos y control, independientes de los buses de la memoria de programa. La memoria de programa es sólo de lectura mientras que en la de datos se puede leer y escribir. La siguiente figura muestra el esquema general de la arquitectura Harvard, las memorias se conectan a la CPU mediante los buses

de direcciones de instrucciones (BDIR-I) y de direcciones de datos (BDIR-D), los buses de direcciones (BINST) y de datos (BDAT) y los buses de control de instrucciones (BCON-I) y de datos (BCON-D) (Figura 4.9.).

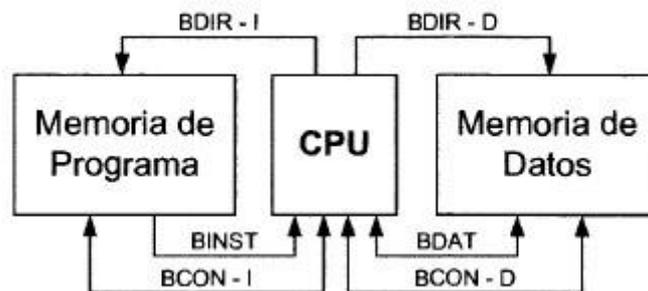


Figura 4.9. Diagrama de bloques de la arquitectura Harvard.

La arquitectura von Neumann requiere menos líneas que la Harvard para conectar la CPU con la memoria, lo cual significa una conexión más simple entre ambas; pero con esta arquitectura es imposible manipular simultáneamente datos e instrucciones, debido a la estructura de buses únicos, algo que si es posible en la arquitectura Harvard que tiene buses separados. Esto confiere a la arquitectura Harvard la ventaja de una mayor velocidad de ejecución en los programas.

4.4.3. Los microcontroladores PIC

Los PIC son una familia de microcontroladores fabricados por Microchip, los cuales se caracterizan por compartir la CPU y ejecutar el mismo repertorio de instrucciones pero se diferencian en el número de sus entradas y salidas; así como en su capacidad de memoria. Todos están basados en la arquitectura Harvard, con memorias de programa y de datos separadas. Como en la mayoría de los microcontroladores, la memoria de programa es mucho mayor que la de datos. La memoria de programa está organizada en palabras de 12, 14 o 16 bits mientras que la memoria de datos está compuesta por registros de 8 bits. El acceso a los diversos dispositivos de entrada y salida se realiza a través de algunos registros de la memoria de datos, denominados registros de funciones especiales (SFR: Special Function Registers). Muchos microcontroladores PIC cuentan con una cierta cantidad de memoria EEPROM para el almacenamiento no volátil de datos.

Por otra parte, todos los PIC son microcontroladores RISC (Reduced Instruction Set Computer) que cuentan con un número de instrucciones entre 33 y 77. Todas las instrucciones son del mismo tamaño, una palabra de 12, 14 o 16 bits. El modelo general de los PIC consta de un registro de trabajo (registro W) y los registros de memoria de datos. Para las operaciones aritméticas y lógicas, uno de los operadores debe estar en el registro W y el resultado se obtiene en W o en cualquier registro de la memoria de datos. Las transferencias de datos se realizan entre algún registro de la memoria de datos y el registro W, aunque en los PIC de gama alta se permiten transferencias directas entre dos registros de la memoria de datos sin necesidad de pasar por el registro W. Se dispone de instrucciones para acceder a cualquier bit de cualquier registro de la memoria de datos.

Todos los PIC utilizan la técnica de segmentado (pipeline) en la ejecución de las instrucciones, en dos etapas, de modo que las instrucciones se ejecutan en un único ciclo de instrucción, equivalente a cuatro pulsos del oscilador principal del microcontrolador, excepto las instrucciones de transferencia de control que toman dos ciclos de instrucción.

Otra característica común de los microcontroladores PIC es la forma en que está implementada la pila, la cual no forma parte de la memoria de datos sino que ocupa un espacio independiente y tiene además una profundidad limitada, según el modelo de PIC. En estos microcontroladores no hay puntero de pila (registro SP: Stack Pointer).

Los microcontroladores PIC cuentan con una amplia gama de dispositivos de entrada y salida. Disponen de puertos paralelos de 8 bits, temporizadores, puertos de serie sincrónicos y asincrónicos, convertidores A/D de aproximaciones sucesivas de 8, 10 o 12 bits, convertidores D/A, moduladores de ancho de pulso (PWM: Pulse Width Modulation), etc. Excepto en los PIC de gama baja, que no disponen de un sistema de interrupciones, los dispositivos de entrada y salida generan solicitudes de interrupción al microcontrolador, que se pueden enmascarar individualmente.

4.4.3.1. Programación en lenguaje ensamblador

Cualquier microcontrolador ejecuta las instrucciones de un programa en su lenguaje de máquina, el cual está constituido por los códigos binarios de las instrucciones que puede ejecutar el microcontrolador, por lo tanto es un lenguaje binario. En el lenguaje de máquina cada instrucción de un programa está formada por un grupo de dígitos binarios, por esta razón, elaborar programas directamente en el lenguaje de máquina resulta sumamente difícil. Para reducir el nivel de dificultad de la programación a este bajo nivel se crearon los lenguajes ensambladores, en los cuales las instrucciones son representadas por símbolos mnemónicos.

Un programa escrito en lenguaje ensamblador no se puede ejecutar directamente en el microcontrolador; es necesario traducirlo al lenguaje de máquina. Este proceso se denomina ensamblaje y lo realiza un programa denominado ensamblador. El programa original escrito en lenguaje ensamblador se denomina programa fuente y el resultado del ensamblaje es el programa objeto.

La obtención del código de máquina a partir del programa fuente escrito en lenguaje se puede realizar de diferentes formas. En principio, la operación del ensamblador depende de la forma en que ha sido escrito el programa fuente; en particular es determinante si en el programa fuente se precisan o no las direcciones reales donde se deben ubicar las instrucciones y los datos. Si en el programa fuente se precisan las direcciones reales de instrucciones y datos, el ensamblador genera código relativo o relocizable.

Si en el programa fuente está toda la información necesaria para la traducción al lenguaje de máquina, es decir, si están definidas las direcciones reales de las instrucciones del programa y las variables utilizadas además de las direcciones que ellas van a ocupar en la memoria de datos, entonces el ensamblador puede generar directamente el programa objeto en código de máquina, pues dispone de toda la

información necesaria. En este caso, el ensamblador realiza una codificación absoluta del programa fuente, produciendo directamente el programa en lenguaje de máquina.

En principio, las instrucciones de cualquier microcontrolador tienen dos componentes: el código de operación y los operandos. En el código de operación está codificada la orden para que el dispositivo ejecute la acción indicada por la instrucción. Los operandos son los datos necesarios para realizar esta acción y en general pueden representar direcciones o datos.

En los PIC un operando puede ser:

- Una dirección (de 7 bits) de la memoria de datos.
- Una dirección (de 11 bits) de la memoria de programa.
- Un dato de 8 bits.
- La dirección (de 3 bits) de un bit de un registro cualquiera de la memoria de datos.
- La indicación (con 1 bit) de cuál es el destino del resultado de la instrucción: si es el registro W o un registro de la memoria de datos.

En general en los microcontroladores hay instrucciones que no necesitan operandos y otras que trabajan con más de un operando. En algunos PIC hay instrucciones sin operandos es instrucciones con uno o dos operandos y las posibles combinaciones son las siguientes:

- En las instrucciones que realizan operaciones con los registros de la memoria de datos, hay dos operandos: uno es la dirección de 7 bits del registro y el otro es el bit que indica cuál es el destino del resultado de la operación, ya sea el registro W o el registro cuya dirección se da en la instrucción.
- Las instrucciones que incluyen un dato de 8 bits en la propia instrucción, tienen como único operando ese dato.
- Las instrucciones que incluyen en la propia instrucción una dirección de 11 bits de la memoria de programa, tienen como único operando esa dirección.
- En las instrucciones que operan con bits de los registros de la memoria de datos, hay dos operandos: uno es la dirección del bit dentro del registro, lo cual requiere 3 bits y el otro es la dirección de 7 bits del registro de la memoria de datos.

Los modos de direccionar los datos se refieren a las distintas formas en que, desde una instrucción, se puede hacer referencia a un dato. Básicamente hay dos ubicaciones para un dato: la propia instrucción o la memoria de datos. En este último caso, la instrucción hace referencia al dato a través de su dirección.

En general, los microcontroladores construyen la dirección de un dato de formas diversas, relacionadas con su arquitectura. En su forma más simple la dirección de un dato puede estar en la instrucción o en un registro del dispositivo. Al registro que almacena direcciones de datos se le llama registro de direcciones de datos (RDD). Por ello hay tres formas básicas de hacer referencia a un dato: con el dato en la instrucción, con la dirección del dato en la instrucción o con la dirección del dato en el registro RDD. Esto da lugar a tres modos de direccionar los datos:

- Direccionamiento inmediato cuando el dato forma parte de la instrucción. El operando de la instrucción es el propio dato.
- Direccionamiento directo cuando la dirección del dato se da en la instrucción. El operando de la instrucción es la dirección del dato.
- Direccionamiento indirecto cuando la instrucción toma la dirección del dato en RDD. El operando de la instrucción es la dirección del RDD.

En los PIC de gama media, el registro de funciones especiales FSR (File Select Register) actúa como RDD. En estos microcontroladores se puede acceder a todos los registros de la memoria de datos utilizando direccionamiento directo o indirecto. Al utilizar los modos de direccionamiento directo e indirecto, hay que tener en cuenta que la memoria de datos se encuentra organizada en páginas o bancos de registros, por esta razón es necesario seleccionar previamente el banco en el que se encuentra el registro que se quiere redireccionar.

Como todo lenguaje de programación, el lenguaje ensamblador tiene sus propias reglas para escribir las palabras y combinarlas para formar instrucciones. Estas reglas constituyen la sintaxis del lenguaje. Un programa en lenguaje Ensamblador es una secuencia de líneas de texto, cada una de las cuales puede ser:

- Una instrucción del repertorio de instrucciones del microcontrolador.
- Una directiva del ensamblador.
- Una macroinstrucción o simplemente "macro".
- Un comentario.
- Una etiqueta.
- Una línea en blanco.

Una directiva es una instrucción que se escribe en el programa fuente y está dirigida al programa ensamblador. En un programa escrito en lenguaje ensamblador se mezclan las instrucciones para el microcontrolador con las instrucciones para el programa ensamblador o directivas. Las directivas transmiten al ensamblador diversas indicaciones, como la definición de símbolos variables y constantes, la ubicación del programa en la memoria, la ubicación de variables en memoria de datos, etc.

Una macroinstrucción o macro es una instrucción definida por el usuario. En la definición de una macro se utilizan instrucciones del repertorio del microcontrolador y directivas del ensamblador. Una vez definida una macroinstrucción, basta con citarla en el texto del programa para que el ensamblador sustituya la llamada a la macro por el conjunto de instrucciones y directivas que la definieron.

Un comentario es un texto cuyo objetivo es informar, haciendo con ellos más fácil la lectura y comprensión del programa fuente. Va precedido por el carácter punto y coma (;). El ensamblador, cuando encuentra este carácter, ignora todo lo que sigue hasta el final de la línea.

Una etiqueta (label) es el símbolo que identifica a una línea de programa fuente y que representa la dirección de una instrucción. Las etiquetas deben colocarse a

partir de la columna 1 para que el ensamblador las identifique como tales y puedan ser seguidas por el carácter dos puntos (:).

Las directivas y mnemónicos se pueden escribir con letras mayúsculas o minúsculas.

Las constantes son valores numéricos que se utilizan en el programa y pueden ser valores numéricos o ASCII. Al escribir una constante numérica se pueden emplear los sistemas de numeración decimal, hexadecimal, octal o binario. Una constante ASCII se forma con el código binario de un carácter ASCII. Las constantes son tratadas por el ensamblador como números binarios de 32 bits. El valor de la constante es truncado si se intenta colocarle en un campo de menor longitud.

En los programas en ensamblador se utilizan también símbolos, los cuales son cadenas de caracteres alfanuméricos de hasta 32 caracteres, que comienzan siempre con una letra o con el carácter guión bajo (_). Los símbolos se usan para nominar:

- Las direcciones de instrucciones. En este caso el símbolo recibe el nombre de etiqueta.
- Los datos constantes.
- Los registros de la memoria de datos, ya sean registros de funciones especiales o de propósito general.
- Los bits de los registros de la memoria de datos.

Aunque para organizar un programa escrito en lenguaje ensamblador no hay reglas fijas, es recomendable llevar el siguiente orden:

1. Definir el procesador y sus símbolos mediante las directivas `list` e `#include`.
2. Si se van a utilizar macroinstrucciones, escribir la definición de las que se vayan a emplear en el programa.
3. Definir los símbolos con los que se representarán datos constantes mediante las directivas `equ` y `set`.
4. Definir el uso de la memoria de datos, es decir, definir los símbolos que se emplean en el programa para representar registros de propósito general de la memoria de datos y sus direcciones.
5. Escribir el cuerpo del programa principal, que en general comienza por iniciar las variables que requieren un valor inicial determinado.
6. Escribir las subrutinas, si las hay.
7. Terminar el programa fuente con la directiva `end`.

4.4.3.2. Puertos paralelos

Los microcontroladores PIC de gama media-alta pueden tener hasta 7 puertos paralelos, nombrados con las letras A, B,...G. Cada puerto puede ser de hasta 8 bits. Las terminales de los puertos se identifican como RA<x>, RB<x>,...RG<X>, donde x es el número del bit (x=0,1...7). En general, cada línea de un puerto se puede programar como entrada o como salida.

La mayoría de las terminales de los puertos de E/S pueden realizar varias funciones, por ejemplo, una misma terminal puede servir como entrada o salida digital, o puede ser una entrada analógica al convertidor A/D, o puede ser portador de alguna señal de entrada o salida a uno de los temporizadores del microcontrolador.

Algunos microcontroladores PIC también tienen un puerto paralelo adicional denominado Puerto Paralelo Esclavo (PSP: Parallel Slave Port). El PSP se comporta como bus periférico de 8 bits, con líneas para controlar la transferencia de datos entre el PIC y el periférico. Cuando existe el PSP comparte sus terminales con los puertos D y E.

Para manipular los puertos paralelos, hay dos registros de funciones especiales por cada uno de los puertos, que se denominan PORT y TRIS. Los registros PORT almacenan el dato de salida del puerto mientras que los registros TRIS sirven para programar cada línea del puerto correspondiente como entrada o salida.

El circuito de una terminal de E/S consta de dos flip-flops D latch, uno para almacenar el bit del dato de salida y otro para almacenar el bit de control TRIS<x>. la terminal de E/S se manipula mediante dos transistores MOS en configuración totem-pole (Figura 4.10.)

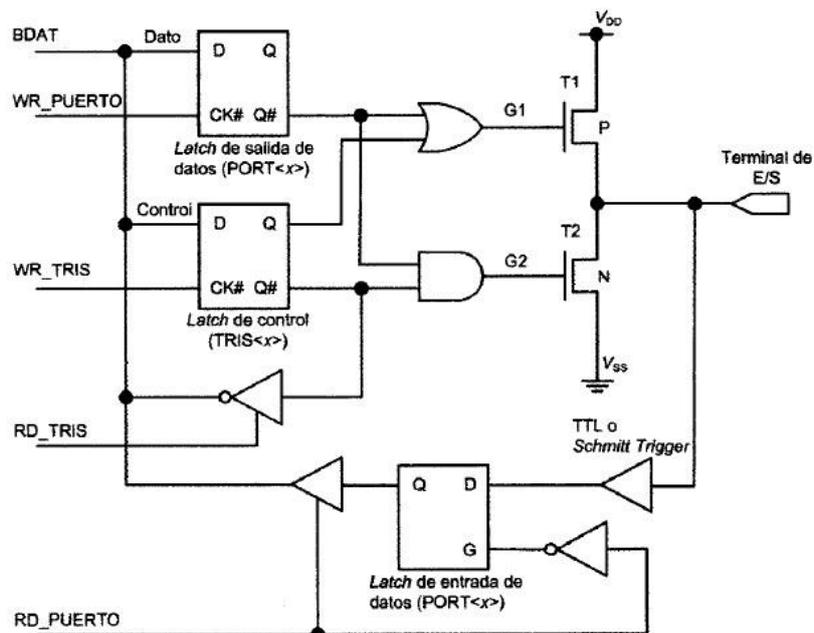


Figura 4.10. Esquema básico de una terminal E/S.

En esta configuración el transistor T1 (canal P) conduce cuando en su puerta hay un '0' y se corta con un '1'; en el transistor T2 (canal N) ocurre lo contrario, conduce cuando hay un '1' y se corta con un '0'. El totem-pole es excitado desde los flip-flops a través de dos compuertas lógicas, una AND y otra OR. Si el flip-flop de control almacena un '1', ambos transistores están cortados por lo que la terminal entra en un estado de alta impedancia (3er estado) y por lo tanto queda configurada como terminal de entrada de datos. Si el flip-flop de control almacena un '0', entonces la terminal queda configurada como salida y en ella aparece el valor del bit almacenado en el flip-flop de datos.

El circuito de la terminal incluye un tercer flip-flop que almacena el estado de la terminal de E/S cuando éste ha sido configurado como entrada, cuya entrada D recibe la tensión existente en la terminal de E/S a través de una compuerta no inversora que puede ser TTL o Schmitt Trigger, según el puerto del microcontrolador.

Se concluye que escribir un bit en un puerto es escribir en el latch correspondiente, mientras que leer un bit en un puerto es leer el estado lógico (nivel de tensión) que tiene físicamente la terminal. Esto significa que si se escribe un dato en un puerto de salida y luego se lee ese puerto, el valor leído puede no coincidir con el valor escrito con anterioridad. Esto puede ocurrir si se exceden los valores máximos de las corrientes de salida recomendados por el fabricante.

Al conectar dispositivos a las terminales de los puertos hay que tener en cuenta las limitaciones de potencia eléctrica del microcontrolador. Cada terminal de E/S puede suministrar o drenar una corriente máxima, además, la corriente suministrada o drenada por el total de terminales de un puerto no puede exceder un cierto valor, que es generalmente menor que la suma de las corrientes individuales permitidas a través de las terminales del puerto.

Por otra parte, si se quiere que las tensiones en las terminales de salida permanezcan dentro de los límites establecidos para los estados lógicos '0' y '1', es necesario mantener las corrientes de salida dentro de los límites recomendados por el fabricante.

La modificación selectiva o individual de los bits de un puerto exige ciertas precauciones, los PIC no disponen de hardware en sus puertos para modificar exclusiva y selectivamente un bit de salida sino que para modificar un bit, siempre se escriben la totalidad de los bits del puerto.

4.4.3.3. Temporizadores

En muchas aplicaciones el microcontrolador trabaja con la variable tiempo, por ejemplo para generar señales de una determinada frecuencia, para medir la duración de una señal o simplemente para llevar la fecha y hora, por lo cual el microcontrolador necesita un temporizador para contar el tiempo con precisión.

En los PIC de gama media-alta hay hasta tres módulos básicos para temporizar, los cuales se identifican con los nombres Timer0, Timer1 y Timer2. Todos los PIC disponen al menos del Timer0. Algunos PIC tienen uno o dos módulos adicionales para temporizar, que amplían las posibilidades de los módulos básicos. Son los denominados módulos de comparación, captura y modulación de ancho de pulso, que comparten componentes y funciones con el Timer1 y el Timer2.

Cada uno de los temporizadores en un PIC tiene como elemento esencial un contador síncrono ascendente de 8 o 16 bits. Estos contadores se pueden programar para contar pulsos internos o externos, el número almacenado en cada contador se puede leer o modificar mediante la lectura o escritura de registros de funciones especiales asociados al temporizador en cuestión. El desbordamiento de

los contadores queda reportado en bits indicadores disponibles en esos registros y puede generar una solicitud de interrupción al microcontrolador.

Los temporizadores pueden disponer de un contador asíncrono auxiliar el cual se inserta en el camino de los pulsos, antes del contador principal, en cuyo caso funciona como un pre-divisor (prescaler) o después del contador principal, funcionando entonces como un post-divisor (postscaler). Los temporizadores Timer0 y Timer1 tienen solamente un pre-divisor, en cambio el Timer2 dispone de un pre-divisor y un post-diviso (Figura 4.11.).

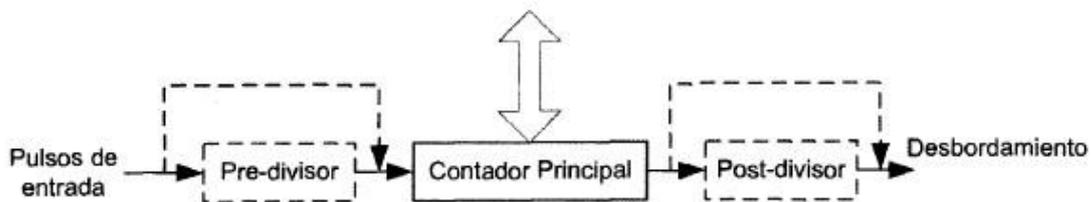


Figura 4.11. Esquema general de los temporizadores.

Temporizador	Tamaño	Pre-divisor divide entre:	Post-divisor divide entre	SFR donde está la cuenta	Desbordamiento
Timer0	8 bits	2,4, ...,256	No	TMR0	Bit TOIF OPTION
Timer1	16 bits	1,2,4,8	No	TMR1H,TMR1L	Bit TMR1F PIR1
Timer2	8 bits	1,4,8	1,2, ...,16	TMR2	Bit TMR2IF PIR2

Tabla 4.1. Características de los temporizadores.

4.4.3.4. El módulo CCP

Los módulos de captura, comparación y modulación por ancho de pulso (CCP: Capture/Compare/PWM) son circuitos que junto con los módulos Timer1 y Timer2 permiten temporizar en diversas formas.

En un mismo PIC pueden existir hasta dos módulos CCP, denominados CCP1 y CCP2. Un módulo CCP está formado básicamente por una pareja de registros de 8 bits denominados CCPRxH y CCPRxL, en donde la letra "x" se sustituye por 1 o 2, dependiendo del módulo CCP al que se esté haciendo referencia. En estos registros se puede almacenar la parte alta y baja de un número de 16 bits. Cada módulo CCP utiliza también el registro CCPxCON para el control y el bit CCPxIF del registro PIR como indicador de que se ha producido un evento.

Cada módulo CCP puede operar en cualquiera de los siguientes modos:

- Modo de captura. El módulo CCP captura el valor del Timer1 cuando ocurre un evento externo en la terminal CCPx.
- Modo comparador. El registro del módulo CCP almacena un número de 16 bits que se compara con el valor del Timer1 y según el resultado de la comparación, se genera un evento que puede incluir un cambio en la terminal CCPx.
- Modo modulador de ancho de pulso (PWM). El módulo CCP y el Timer2 forman un modulador de ancho de pulso con salida en la terminal CCPx.

Las terminales CCPx son entradas en el modo de captura y salidas en los modos de comparador y PWM. En los modos de captura y comparador el Timer1 es utilizado por los módulos CCP como base de tiempo. En estos modos, el Timer1 debe ser programado como temporizador o como contador en modo sincronizado. En el modo PWM el Timer2, que opera siempre como temporizador, determina la frecuencia de la señal PWM.

4.4.3.5. Interrupciones en los PIC

Las interrupciones en los PIC son enmascaradas y fijas, es decir, se pueden habilitar o inhabilitar global e individualmente. Para que una solicitud de interrupción se haga efectiva, tanto la fuente de interrupción como el sistema en su conjunto deben estar habilitados. El sistema se habilita o inhabilita globalmente mediante el bit GIE del registro de funciones especiales INTCON. Los dispositivos con posibilidad de interrumpir se habilitan o inhabilitan individualmente mediante los bits de los registros INTCON, PIE1 y PIE2.

Al ser todas las interrupciones fijas, todas las solicitudes, si están habilitadas, hacen que el microcontrolador pase a ejecutar la instrucción que esté en la dirección 4 de la memoria de programa. Cuando se produce una solicitud de interrupción, si el sistema en su conjunto y la fuente en particular están habilitados, el microcontrolador termina la instrucción en curso, guarda en la pila el valor del contador de programa y salta a la dirección 4 de la memoria de programa.

El tiempo transcurrido entre el momento en que se produce la solicitud de interrupción y el comienzo de la ejecución de la primera instrucción de la subrutina de atención a la interrupción (la que está en la dirección 4), está entre 3 y 3.75 ciclos de máquina. Este es el denominado tiempo de latencia de la interrupción, cuyo valor exacto depende del momento en que se produce la solicitud dentro de un ciclo de máquina y de la fuente de la interrupción (si es interna o externa).

Durante el período de latencia tienen lugar las siguientes operaciones. En primer lugar se completa la instrucción que estaba en curso cuando se produjo la solicitud de interrupción; a continuación se guarda en la pila el valor del contador de programa (PC), que apunta a la siguiente instrucción y finalmente se pone el valor 0004 en el PC, con lo cual se salta a la primera instrucción de la rutina que atiende la solicitud de interrupción. Al atender una solicitud de interrupción, el sistema de interrupciones queda inhabilitado.

Cada módulo de entrada y salida puede generar al menos una solicitud de interrupción. Entre las posibles fuentes de interrupción están las siguientes:

- Interrupción externa por la terminal INT del microcontrolador.
- Interrupción por cambio en el nivel lógico de las entradas RB4:RB7 del puerto B.
- Interrupción por desbordamiento de los temporizadores Timer0, Timer1 y Timer2.
- Interrupción por algún evento en el módulo CCP.

- Interrupción por el puerto serie USART.
- Interrupción por el convertidor A/D.

La mayoría de los PIC usan al menos un registro de funciones especiales para controlar las interrupciones: el registro INTCON. En este registro se controla la interrupción externa (proveniente de la terminal INT), la interrupción por cambio en las terminales RB4 a RB7 y la interrupción por desbordamiento del Timer0. Hay también un bit (GIE) para habilitar globalmente el sistema de interrupción. Las fuentes restantes de interrupción se controlan con los registros PIE1, PIR1, PIE2 y PIR2.

Para que una solicitud de interrupción cause efectivamente la interrupción del programa en curso, es necesario en primer lugar que el sistema de interrupción del PIC esté habilitado (esto es que el bit GIE del registro INTCON debe ser 1). En segundo lugar, la fuente de la interrupción debe estar también habilitada, si se presentan estas condiciones la solicitud progresa y el microcontrolador guarda en la pila el contador de programa y salta a la dirección 4 de la memoria de programa. El bit GIE pasa automáticamente a 0, con lo cual se inhabilita el sistema de interrupción y no se atenderán nuevas solicitudes. El sistema se habilita de nuevo cuando se ejecuta la instrucción `retfie` de retorno al programa interrumpido desde la subrutina de atención a la interrupción. La instrucción `retfie` pone el bit GIE a 1 y así el sistema de interrupción queda nuevamente habilitado, y con ello el PIC está listo para atender nuevas solicitudes de interrupción.

Al producirse un reset, el bit GIE es puesto a 0, de modo que el microcontrolador no atenderá ninguna solicitud de interrupción después de haberse producido un reset por cualquiera de las causas posibles. Cuando se energiza el microcontrolador, este siempre inicia su trabajo con el sistema de interrupción inhabilitado y debe habilitarse en el programa poniendo el bit GIE a 1. Los bits de control individual de las interrupciones (TOIE, INTE, etc.) normalmente no se modifican cuando hay una solicitud de interrupción.

Los indicadores individuales de solicitudes de interrupción (TOIF, INTF, etc.) pasan a 1 automáticamente para dar cuenta de una solicitud de interrupción, pero normalmente deben ser puestos a 0 en el programa que atiende la interrupción.

4.4.3.6. Adquisición y distribución de señales

Las señales que se desea medir son generalmente magnitudes físicas o químicas, las cuales deben convertirse en señales eléctricas. Las magnitudes que se desea controlar o las señales empleadas para comunicar el resultado de una operación o algún aviso al usuario tampoco son magnitudes eléctricas, por lo tanto las funciones básicas en un sistema de medición son: detectar la magnitud (con un sensor), procesar la información y comunicarla, ya sea al usuario o a otra máquina. Cuando el sistema es electrónico, como es el caso del microcontrolador, a estas funciones hay que añadirles la alimentación eléctrica y el control u organización de las funciones.

En el mundo real todas las señales a medir son analógicas, sin embargo el microcontrolador requiere señales digitales para su procesamiento; por esta razón

es necesario hacer una conversión de la señal analógica a una digital de tal forma que el microcontrolador pueda procesarla y llevar a cabo el ciclo de control requerido. El dispositivo encargado de realizar esta operación es el convertidor analógico digital (ADC por sus siglas en inglés, Analog to Digital Converter), (Figura 4.12.) .

El objetivo básico de un ADC es transformar una señal eléctrica analógica en un número binario equivalente. Esta función exige que los pasos intermedios se realicen de forma óptima para no perder información. Según el tipo de componente y su aplicación existen distintos parámetros que lo caracterizan, tales como la velocidad de conversión, la resolución, los rangos de entrada, etc.

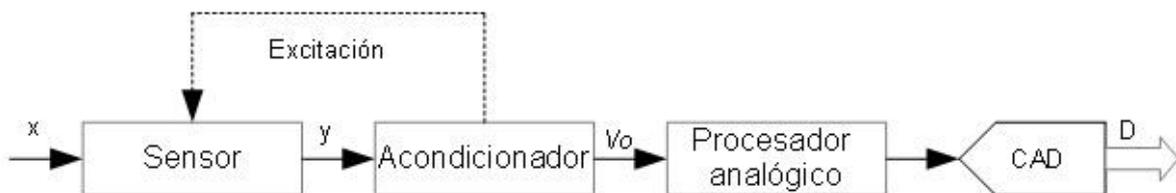


Figura 4.12. Secuencia desde que una variable física entra al ADC hasta que es transformada en una señal digital.

La señal es tomada con un sensor y para poder ingresar el ADC debe ser muestreada, es decir, tomar valores discretos de la misma a una cierta frecuencia, la cual debe cumplir con el teorema de Nyquist; el cual establece que la frecuencia de muestreo (f_s) debe ser como mínimo el doble que el ancho de banda de la señal muestreada (f_m).

$$f_s > 2f_m$$

La conversión analógico-digital (A/D) es en esencia la comparación de una tensión desconocida V_x con una tensión de referencia V_{ref} . En la denominada conversión A/D directa, la comparación se realiza entre V_x y fracciones de V_{ref} de valor $LxV_{ref} / 2^N$, donde L y N son números enteros. Esta comparación se puede hacer de forma simultánea con todos los valores entre 0 y V_{ref} , o de forma sucesiva con valores fraccionarios elegidos en un orden tal que agilice el proceso de decisión (convertidor de aproximaciones sucesivas). Los ADC integrados en los microcontroladores suelen ser de aproximaciones sucesivas (Figura 4.13.).

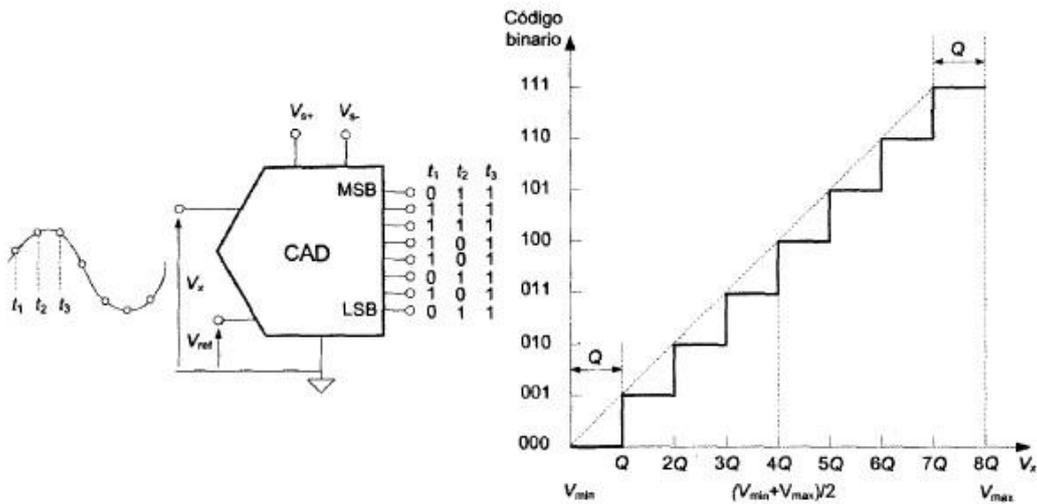


Figura 4.13. Característica de la conversión para un ADC con N=3.

De esta forma es como el microcontrolador toma una señal de entrada, la cual puede ser muestreada por alguno de los pines correspondientes al ADC, y la procesa de tal forma que sea compatible con el procesamiento digital que este lleva a cabo en su interior.

4.4.3.7. Transmisión de datos en serie

La transmisión en serie de información binaria consiste en enviar uno a uno y de forma sucesiva los bits de una palabra a través de una misma terminal. Esta señal de datos se genera en sincronía con una señal de reloj cuyo período determina la duración de un bit de la señal de datos.

Entre el transmisor y el receptor debe haber alguna forma de sincronización para que al información transmitida pueda ser interpretada correctamente por el receptor. En aplicaciones en las que los datos se transmiten a cortas distancias la señal de reloj puede acompañar a la de datos, lo cual facilita dicha sincronización. Cuando la señal de reloj es transmitida, se dice que la comunicación es síncrona.

Cuando las distancias son grandes, por lo general resulta incosteable transmitir la señal de reloj. Pero aunque el reloj del transmisor no esté disponible en el receptor la sincronización debe permitir a este último conocer la duración de cada bit y el momento en que comienza cada palabra transmitida. La primera de estas condiciones puede lograrse si tanto el transmisor como el receptor utilizan un reloj con la misma frecuencia, lo que equivale a haber acordado de antemano la velocidad de transmisión. La segunda condición, es decir, el conocimiento por parte del receptor de momento en que comienza una nueva palabra, puede lograrse de dos formas diferentes: marcando de alguna forma el inicio de cada nueva palabra o bloque de palabras. Esto da lugar a dos modalidades de la comunicación digital conocidas como comunicación asíncrona y síncrona. En la comunicación asíncrona, la sincronización entre transmisor y receptor se realiza palabra a palabra, mientras que en la comunicación síncrona la sincronización se hace por bloques de palabras. En ambas modalidades es necesario introducir cierta cantidad de información

redundante en los datos transmitidos para poder lograr la sincronización entre el transmisor y el receptor.

El término comunicación síncrona se usa para identificar una transmisión o recepción de datos en serie en la cual se transmite la señal de reloj y la sincronización se lleva a cabo por bloques de palabras, en cambio el término comunicación asíncrona se aplica solamente a la transmisión y recepción de datos en serie sin transmisión de la señal de reloj y donde la sincronización se realiza palabra a palabra.

La coordinación entre el transmisor y el receptor se realiza siguiendo un determinado protocolo de comunicación, que es un conjunto de reglas acordadas entre transmisor y receptor que aseguran la transferencia ordenada de los datos. Hay dos tipos diferentes de protocolos de comunicación:

- Protocolos orientados a bytes, en los que todas las palabras transmitidas son de 8 bits.
- Protocolos orientados a bits, en los que los bloques de datos transmitidos no están formados necesariamente por palabras de 8 bits, es decir, los bloques de datos son conjuntos de bits más que conjuntos de bytes.

La creciente necesidad de intercomunicar diferentes módulos de control, administración y seguridad ha hecho posible el desarrollo de diferentes protocolos de comunicación, tales como el J1850, RS-232, I²C, BusCAN, entre muchos otros. Sin embargo el BusCAN ha tenido gran impacto en el desarrollo de sistemas electrónicos para la industria automotriz, esto debido a que es un protocolo muy robusto y seguro; y que además permite el intercambio de información entre varios dispositivos en tiempo real y de manera inteligente. A continuación se da una descripción general de este protocolo.

4.5. Bus CAN

Robert Bosch introdujo el sistema de bus serial CAN (Controller Area Network, por sus siglas en inglés) en el congreso de la Sociedad de Ingenieros Automotores (SAE) en 1986. Fue llamado "Automotive Serial Controller Area Network" porque los sistemas CAN fueron desarrollados para la industria automotriz. Sin embargo muy pronto la industria se dio cuenta que el protocolo se comportaría extremadamente bien en una gran variedad de sistemas de aplicaciones. En 1990 la tecnología CAN fue introducida en maquinas textiles, y hoy en día esta industria realiza un gran uso de los sistemas CAN; se pueden encontrar en sistemas de elevación de edificios altos, naves de todo tipo, trenes, y aviones, en máquinas de rayos X y en otros equipos médicos, entre muchas otras aplicaciones. Actualmente la mayoría de los autos tienen por lo menos un sistema CAN en su interior, y CAN se ha convertido en un estándar dentro de los sistemas de comunicación de los vehículos. Los líderes de industria cuentan con un crecimiento constante para los sistemas CAN en todos los tipos de equipamiento y maquinaria.

El Bus CAN es un protocolo de comunicación serial orientado a control distribuido en tiempo real, es decir, todos los nodos de la red son capaces de enviar y recibir datos, así como solicitar información de cualquier otro nodo de la red. Por esta razón

el Bus CAN es un protocolo cuya transmisión de datos se enfoca en el contenido y prioridad del mensaje enviado en lugar de la dirección del mismo. La información es enviada en la red a todos los destinos de forma simultánea, así que los nodos deben saber si la información les concierne o deben rechazarla; todos los nodos pueden acceder al bus en forma simultánea respetando una sincronización previamente definida.

Otras características importantes del Bus CAN son la flexibilidad, ya que se pueden añadir nodos sin que ello perturbe el funcionamiento de la red y gran fiabilidad de transmisión, dado que el bus can posee una eficiente detección de errores y puede funcionar con condiciones extremas de ruido e interferencias. Las redes CAN pueden alcanzar 1000 metros de longitud ampliables con repetidores y su velocidad depende de la longitud de la red.

El Bus CAN está basado en las capas 1,2 y 7 del modelo OSI, es decir, la capa de aplicación, la de enlace y la capa física (Figura 4.14.).

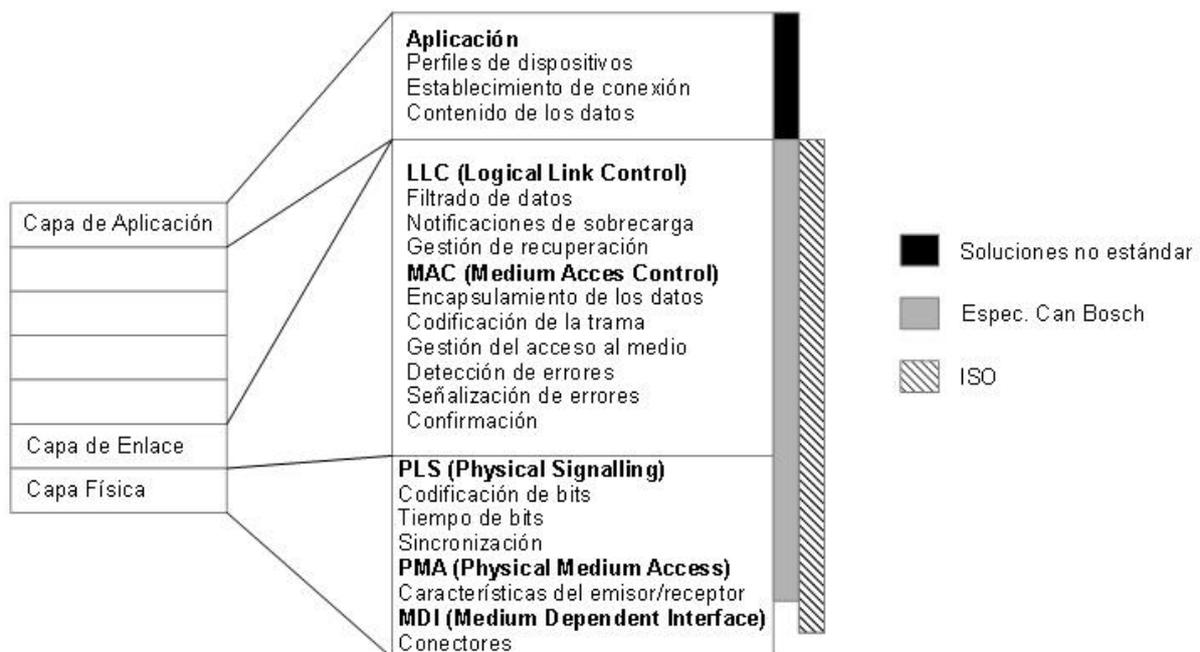


Figura 4.14. Niveles del modelo OSI.

Las implementaciones hardware de CAN cubren de forma estandarizada las capas físicas y de enlace del modelo de comunicaciones OSI (Open Systems Interconnection), mientras diversas soluciones de software no estandarizadas cubren la capa de aplicación.

Las estandarizaciones ISO (International Standard Organization), a diferencia de las normas BOSCH, especifican también el medio de comunicación. Por lo tanto una implementación CAN a partir de las especificaciones de BOSCH no siempre será compatible con las normas ISO.

4.5.1. Capa física

La capa física de CAN es responsable de la transferencia de bits entre los distintos nodos que componen la red. Define aspectos como niveles de señal, codificación de los bits y tiempos en que los bits se transfieren al bus. En la especificación original de CAN, la capa física no fue definida, permitiendo diferentes opciones para la elección del medio y niveles eléctricos de transmisión.

4.5.1.1. Topología bus

La configuración más común en la industria automotriz consiste en una línea de bus de dos hilos, que es terminada en ambos extremos por resistencias que representan la impedancia característica de la línea.

Los cables del bus pueden ser paralelos, trenzados o blindados, dependiendo de los requerimientos del sistema. La topología del cableado debe estar tan cerca como sea posible a una sola estructura de línea, para reducir al mínimo las reflexiones. Los segmentos del cable para la conexión de los nodos del bus deben ser tan cortos como sea posible, especialmente en tasas altas de bit.

Un problema que se puede presentar en el bus de la red son los reflejos, por lo que se recomienda poner resistencias terminales en el mismo. Las resistencias recomendadas son de 120 Ω para redes que trabajen a velocidades altas. Por otra parte, cuando se manejan velocidades bajas es recomendable utilizar resistencias terminales de 150 hasta 500 Ω .

El uso de los voltajes diferenciales permite eliminar errores a causa de interferencia electromagnética y además, al ser uno la referencia del otro, se elimina la necesidad de extender un cable de tierra a lo largo del bus.

4.5.1.2. Nivel de señal

Las especificaciones de las señales eléctricas en el bus se encuentran establecidas por el estándar ISO 11898 para las aplicaciones de alta velocidad y por el estándar ISO 11519 para las aplicaciones de baja velocidad.

Es importante definir los niveles eléctricos que se manejan para poder decodificar la información que se está recibiendo. El bus CAN utiliza los conceptos de bit dominante y bit recesivo. Un bit dominante es un "0" lógico presente en algún nodo de la red. Es nombrado bit dominante debido a que hace desaparecer los "1" lógicos en la red. Un bit recesivo es un "1" lógico.

El bus CAN utiliza dos líneas eléctricas para representar los bits dominantes y bits recesivos, estas líneas se denominan CAN_High (CAN_H) y CAN_Low (CAN_L).

A continuación se describen las especificaciones para cada aplicación del Bus CAN:

▪ Especificaciones para aplicaciones de baja velocidad

Para aplicaciones de baja velocidad los niveles eléctricos para cada bit son los que se muestran en la siguiente gráfica (Figura 4.15.)

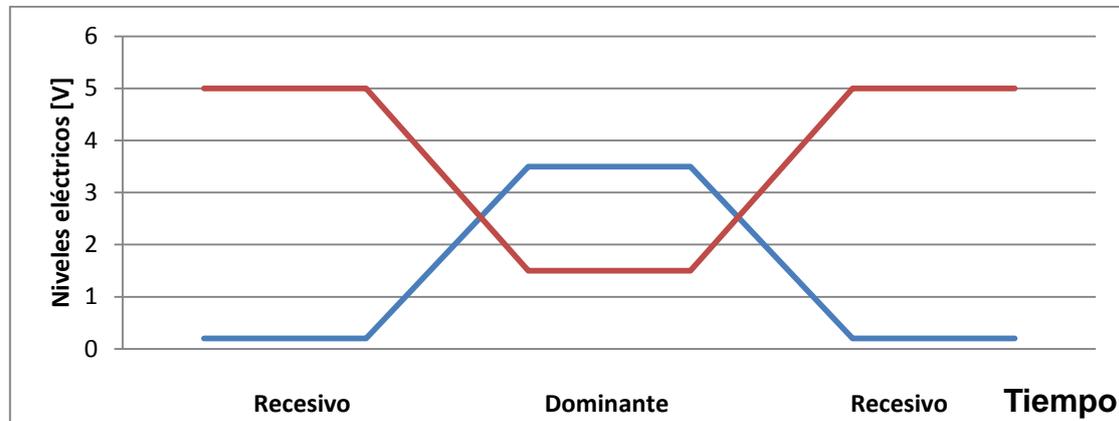


Figura 4.15. Niveles eléctricos para baja velocidad.

- El bit es dominante si la tensión diferencial (CAN_H-CAN_L) es del orden de 2 V con CAN_H = 3.5 V y CAN_L = 1.5 V.
- El bit es recesivo si la tensión diferencial (CAN_H-CAN_L) es del orden de 5 V con CAN_H = 0 V y CAN_L = 5 V.

El bus de baja velocidad requiere dos resistencias en cada transceptor: RTH para la señal CAN_H y RTL para la señal CAN_L. Esta configuración permite al transceptor de bus de baja velocidad detectar fallas en la red. La suma de todas las resistencias en paralelo debe estar en el rango de 100-500 Ω .

▪ Especificaciones para aplicaciones de alta velocidad

Los nodos conectados en este bus interpretan los niveles lógicos mostrados en la siguiente gráfica (Figura 4.16.).

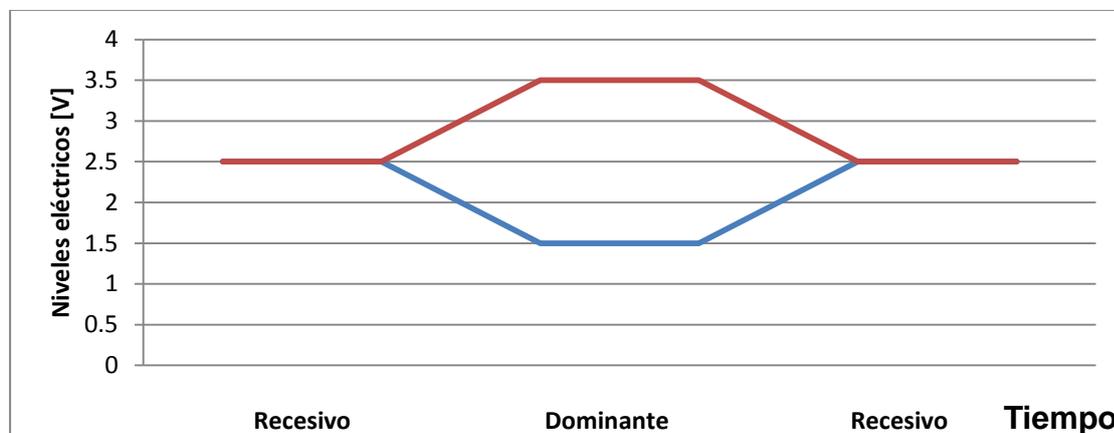


Figura 4.16. Niveles eléctricos para alta velocidad.

- El bit es dominante si la tensión diferencial (CAN_H-CAN_L) es del orden de 2 V con CAN_H = 3.5 V y CAN_L = 1.5 V.
- El bit es recesivo si la tensión diferencial (CAN_H-CAN_L) es del orden de 0 V con CAN_H = CAN_L = 5 V.

El par de cables trenzados (CAN_H y CAN_L) constituyen una transmisión de línea. Si dicha transmisión de línea no está configurada con los valores correctos, cada trama transferida causa una reflexión que puede originar fallos de comunicación. Como la comunicación en el bus CAN fluye en ambos sentidos, ambos extremos de red deben de estar cerrados mediante una resistencia de 120 Ω .

El dispositivo electrónico que adapta los niveles *TTL* a los niveles utilizados en el bus CAN se llama transceptor, el cual realiza funciones tanto de transmisión como de recepción de datos, utilizando componentes de circuito comunes para ambas funciones.

4.5.1.3. Codificación de bits

Una característica importante del protocolo CAN es su codificación NRZ (*Non Return to Zero*), (Figura 4.1.7.) que es utilizada comúnmente en interfaces de comunicación ,síncrona y asíncrona. En esta codificación no existe un regreso a nivel de cero para representar un bit como ocurre en algunos protocolos en los que es necesario un ciclo de regreso a cero. En esta codificación un "1" lógico se representa con nivel alto, mientras que un "0" lógico es representado por un nivel bajo.

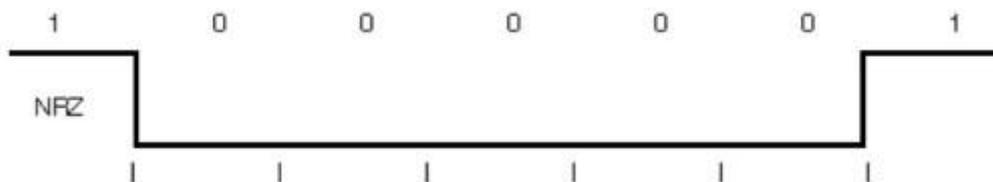


Figura 4.17. Cambios de nivel lógico en la codificación NRZ.

La codificación NRZ muestra algunos problemas cuando se tiene un número considerable de bits del mismo nivel lógico. El principal problema de ésta codificación es la pérdida de sincronización, debido a la falta de transiciones en un periodo considerable. Para atacar este problema, el protocolo CAN implementa el *Stuffing bit* o bit de relleno.

El *Stuffing bit* es un cambio forzado de nivel que se presenta cada vez que se han detectado 5 bits del mismo nivel lógico, es decir si se tienen 5 bits de nivel alto, se agregará un bit de nivel bajo, antes de mandar el siguiente bit de la trama. Por el contrario, cuando se tienen 5 bits de nivel bajo, se agregará un bit de nivel alto antes de continuar con la trama (Figura 4.1.8.).

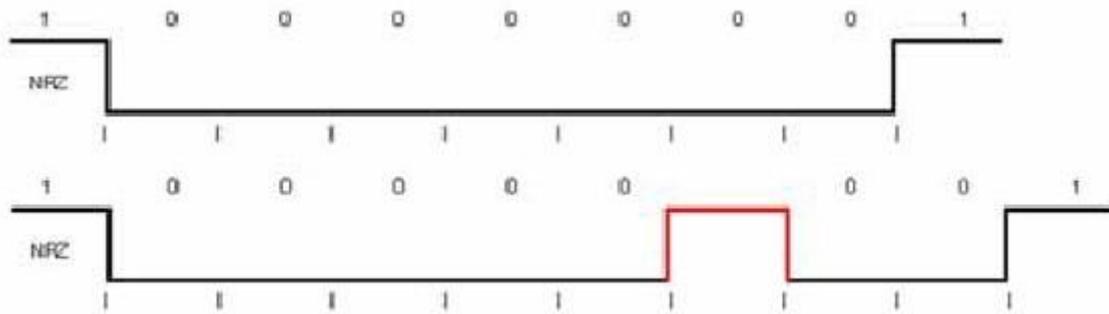


Figura 4.18. Implementación del Stuffing bit.

4.5.1.4. Temporización y sincronización de un bit.

Una red CAN cuenta con distintos nodos que se pueden considerar como maestros o esclavos a la vez. Además de sus capacidades maestro-esclavo, los distintos nodos de la red cuentan con su reloj propio, el cual no necesariamente debe ser del mismo valor para todos.

El uso de un reloj independiente en cada nodo de la red, provoca que existan corrimientos de fase entre los mismos. Para poder sincronizar los nodos, es necesario que cada nodo sea capaz de alargar o recortar la duración de cada bit. Para lograr esto, el protocolo CAN divide cada bit en segmentos y los segmentos a su vez se dividen en “Quantas” (T_q). Una cuanta es una unidad fija de tiempo que se deriva del periodo de oscilación del reloj maestro.

Los segmentos que conforman un bit en el bus CAN son: segmento de sincronización, segmento de propagación, segmento de fase 1 y segmento de fase 2 (Figura 4.1.9.).

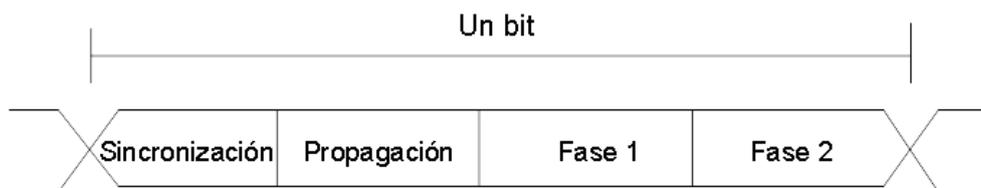


Figura 4.19. Segmentos que conforman un bit en el bus CAN.

A continuación se da una breve definición de cada uno de los segmentos de bit.

- **Segmento de sincronización:** Este segmento se utiliza para sincronizar los relojes de cada nodo, se espera que la transición de los bits se encuentre en este segmento y su duración es de $1 T_q$.
- **Segmento de propagación:** Este segmento proporciona el tiempo necesario para que la señal del bus sea recibida por cada uno de los nodos, la duración de este segmento puede ir desde 1 hasta $8 T_q$. Este segmento debe ser dos veces mayor a la suma del máximo tiempo de propagación de los nodos más lejanos.
- **Segmento de fase 1:** Este segmento se utiliza para alargar la duración del bit y puede ir de 1 hasta $8 T_q$.

- **Segmento de fase 2:** Este segmento se utiliza para acortar la duración del bit y su duración puede variar desde 1 hasta 8 T_q.

Los conceptos anteriores acerca de la temporización y sincronización de bits son importantes para comprender el funcionamiento del bus CAN, pero cabe mencionar que en la práctica son conceptos transparentes para el usuario.

4.5.1.5. Tramas

El protocolo CAN está basado en mensajes, no en direcciones. El nodo emisor transmite el mensaje a todos los nodos de la red sin especificar un destino y todos ellos escuchan el mensaje para luego filtrarlo según le interese o no.

Existen distintos tipos de tramas predefinidas por CAN para la gestión de la transferencia de mensajes:

- Trama de datos: Se utiliza normalmente para poner información en el bus y la pueden recibir algunos o todos los nodos.
- Trama de información remota: Puede ser utilizada por un nodo para solicitar la transmisión de una trama de datos con la información asociada a un identificador dado. El nodo que disponga de la información definida por el identificador la transmitirá en una trama de datos.
- Trama de error: Se generan cuando algún nodo detecta algún error definido.
- Trama de sobrecarga: Se generan cuando algún nodo necesita más tiempo para procesar los mensajes recibidos.
- Espaciado entre tramas: Las tramas de datos (y de interrogación remota) se separan entre sí por una secuencia predefinida que se denomina espaciado inter-trama.
- Bus en reposo: En los intervalos de inactividad se mantiene constantemente el nivel recesivo del bus.

En un bus CAN los nodos transmiten la información espontáneamente con tramas de datos, bien sea por un proceso cíclico o activado ante eventos en el nodo. La trama de interrogación remota sólo se suele utilizar para detección de presencia de nodos o para puesta al día de información en un nodo recién incorporado a la red. Los mensajes pueden entrar en colisión en el bus, el de identificador de mayor prioridad sobrevivirá y los demás son retransmitidos lo antes posible.

4.5.2. Capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos es responsable del acceso al medio y el control lógico y está dividida a su vez en dos niveles.

- El subnivel LLC (Logical Link Control): Gestiona el filtrado de los mensajes, las notificaciones de sobrecarga y la administración de la recuperación.
- *El subnivel MAC (Medium Acces Control):* Es el núcleo del protocolo CAN y gestiona el tramado y desentramado de los mensajes, el arbitraje a la hora de acceder al bus y el reconocimiento de los mensajes, así como el chequeo de posibles errores y su señalización, el aislamiento de fallos en unidades de

control y la identificación del estado libre del bus para iniciar una transmisión o recepción de un nuevo mensaje.

Cuando un nodo necesita enviar información a través de una red CAN, puede ocurrir que varios nodos intenten transmitir simultáneamente. CAN resuelve lo anterior al asignar prioridades mediante el identificador de cada mensaje, donde dicha asignación se realiza durante el diseño del sistema en forma de números binarios y no puede modificarse dinámicamente. El identificador con el menor número binario es el que tiene mayor prioridad.

5. Desarrollo del control para el moto-generador en el vehículo Ecco 5

Para la realización de este proyecto contamos con el apoyo de la empresa mexicana Vehizero SAPI, la cual era una compañía dedicada al diseño, desarrollo y producción de vehículos híbridos.

El control desarrollado en este trabajo fue hecho para el camión repartidor ECCO-5, el cual es un vehículo híbrido serie con un motor de corriente directa y un banco de 16 baterías de 6 V cada una. Como ya se mencionó anteriormente, la presencia de sistemas electrónicos que monitorean diversas variables en un automóvil es cada vez más común; ya que hacen más eficientes a los vehículos y permiten que la interacción entre usuario y automóvil sea cada vez más sencilla.

El ECCO-5 cuenta con diversos sistemas electrónicos que monitorean el estado de las variables que intervienen en el funcionamiento del vehículo, por ejemplo, las RPM del motor eléctrico para determinar la velocidad del camión o el estado de carga del banco de baterías para determinar si debe encenderse el moto-generador y así recargar las baterías. Otros sistemas sirven para encender o apagar los sistemas auxiliares del vehículo o para controlar el encendido del sistema eléctrico. Todos estos sistemas son nodos conectados al control maestro en una red Bus CAN, el cual se encarga de realizar determinadas acciones para el correcto funcionamiento del vehículo además de mostrar información del estado de las variables al usuario.

Uno de los sistemas más importantes para este vehículo es el control de encendido del moto-generador, ya que al ser un vehículo híbrido serie, la tracción del mismo depende únicamente de la energía contenida en el banco de baterías; por lo cual el estado de carga debe mantenerse en un nivel adecuado para que el motor tenga un rendimiento óptimo. El correcto funcionamiento de este control es de vital importancia para el desempeño general del vehículo, éste debe ser capaz de medir las variables correspondientes para encender el moto-generador y recargar el banco de baterías; aumentando así la autonomía y eficiencia del vehículo. Por otra parte, es importante conocer el SOC del banco de baterías para evitar que estas sufran descargas abruptas y de esta forma mantenerlas en buen estado.

A continuación se describe el proceso llevado a cabo para el desarrollo de este control.

5.1. Descripción del problema

Como ya se mencionó anteriormente, este control fue desarrollado para el vehículo ECCO-5 el cual era producido en su totalidad por la empresa Vehizero SAPI. Cuando empezamos a trabajar en este proyecto, el vehículo utilizaba una versión del

control que presentaba muchos errores, sobre todo en el programa cargado en el microcontrolador.

Dado que este control ya estaba instalado en una flotilla de vehículos ECCO-5, y que la empresa era muy pequeña y limitada en capital, fue necesario trabajar con la versión de hardware existente haciendo cambios mínimos en componentes y circuitos para que estos pudieran implementarse de forma sencilla sobre la versión instalada previamente en los vehículos. En cuanto a programación del microcontrolador, se modificaron las rutinas encargadas de la medición del voltaje en el banco de baterías y del nivel de gasolina ya que las anteriores resultaban imprecisas, debido a que mezclaban muchas rutinas para calcular los niveles de voltaje y gasolina, lo que provocaba un funcionamiento deficiente del control y por lo tanto del vehículo.

Las variables que el sistema desarrollado debe medir para llevar a cabo el control del moto-generador son las siguientes:

- Estimación del estado de carga del banco de baterías.
- Nivel de gasolina.
- RPM en el moto-generador
- Temperatura del moto-generador.

Por otro lado, el control también debe generar las señales necesarias para encender el moto-generador mediante el sistema de arranque incorporado en el mismo.

5.1.1. Estimación del estado de carga (SOC) del banco de baterías

Muchos métodos de estimación del estado de carga de baterías han sido desarrollados y mejorados durante los últimos años. Éstos dependen del tipo de batería y de las condiciones del sistema. A continuación se mencionan los más importantes.

- **Medida directa**

La medida se trata de un método teórico, ya que se basa en la hipótesis de una corriente de descarga constante. Éste valor de corriente es multiplicado por el tiempo total de descarga obteniendo así la capacidad de la batería. Este resulta un método inviable ya que en la práctica la corriente de descarga es variable y además se debe conocer el SOC que presentaba la batería antes de la descarga total de la misma.

- **Medida de la gravedad específica**

La medida de la gravedad específica también es conocida como medida de densidad relativa y es necesario tener acceso al electrolito de la batería, por lo tanto es un método poco práctico. La relación entre la densidad del agua y la de una sustancia electrolítica tiene una relación proporcional con la descarga de la celda de la batería, por lo tanto al medir la densidad del electrolito se obtiene una estimación del SOC de la celda.

- **Impedancia interna**

Debido a los ciclos de carga y descarga de la batería, la composición de los componentes químicos internos de una celda cambian, y esto deriva en una variación de la impedancia interna. Este parámetro también es un indicativo del SOC pero su medida resulta muy complicada durante el funcionamiento de una batería.

- **Estimación basada en intensidad de corriente**

La estimación basada en intensidad de corriente también llamado *Coulomb counting*, este método consiste en la integración de la corriente entrante y saliente en la batería. Es considerado el más preciso para la estimación del SOC, debido a que se tiene una medición directa de la carga y descarga a través de la batería. Sin embargo es necesario conocer el momento de inicio de los procesos de carga y descarga para tener una estimación precisa.

- **Estimación basada en voltaje**

La estimación basada en voltaje está basada en la relación directa que hay entre el voltaje actual de la batería y la capacidad disponible de la misma. Se trata de un método viable debido a que sólo se requiere de un dispositivo que sea capaz de medir el voltaje promedio en la batería para hacer una estimación del SOC de la misma.

Para este proyecto se emplea este método ya que el hardware empleado anteriormente se utiliza para medir el voltaje a la salida del banco de baterías. Como se menciona anteriormente, la dinámica de descarga del banco está relacionada con la corriente que demanda el motor eléctrico del vehículo y por lo tanto necesitamos una medición promedio del voltaje en el banco de baterías. Para esto se utilizan unos capacitores a manera de filtros en la entrada del ADC del microcontrolador y de esta forma obtenemos una medición del voltaje promedio del banco de baterías.

Como se menciona anteriormente, el vehículo es movido por un motor de corriente directa alimentado por un banco de baterías de 96 V. A continuación se justifica el uso de este motor y del banco de baterías.

5.1.2. Motor eléctrico del ECCO-5

El motor utilizado en el ECCO-5 es un motor de corriente directa modelo FB1-4001, el cual está diseñado especialmente para vehículos eléctricos de carreras o bien de carga, debido a que es capaz de producir hasta 17.3 kW cuando es alimentado con 96 V.

5.1.3. Moto-generator del ECCO-5

El moto-generator utilizado para recargar el banco de baterías del ECCO-5 es un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico de la marca Evans, modelo 9000. Las especificaciones eléctricas de este generador son las siguientes:

ESPECIFICACIONES		
PARTE	CARACTERÍSTICAS	GT90MG1600THAE
GENERADOR	Tipo de alternador	Trifásico 2 polos; con escobillas y compound
	Frecuencia	60 ciclos
	Max. Potencia (W)	9000
	Potencia continua (W) a nivel del mar	7700
	Potencia del alternador (W)	7500
	Volts a 3600 RPM	127/220 V
	Max Corriente continua (A)	29/20
	Factor de potencia	1.0
	Salidas para 127 V	1 Receptáculo Duplex
	Salidas a 127/220 V	1 Receptáculo L21-30R
	Protección contra sobrecarga	Interruptor Termomagnético 3 polos 20 A

Tabla 5.1. Especificaciones eléctricas del moto-generador.

Este moto-generador cuenta con un sistema de arranque eléctrico cuyas características son aprovechadas por el control desarrollado para llevar a cabo el encendido automático del mismo cuando el voltaje en el banco de baterías se encuentra por debajo del límite permitido para el correcto funcionamiento del vehículo. En este caso solo se utiliza la parte del motor de combustión interna y el generador ya que el vehículo cuenta con su propio tanque de gasolina y una batería auxiliar. (Figura 5.1.)



Figura 5.1. Moto-generador.

5.1.4. Banco de baterías del ECCO-5

El banco de baterías del ECCO-5 consta de 16 baterías de electrólito líquido (plomo-ácido) de la marca Trojan, modelo T-125 (Figura 5.2.). Cada batería tiene capacidad para almacenar 6 V nominales, sin embargo, el fabricante indica que cuando la batería está cargada al 100%, esta puede almacenar hasta 6.37 V; y cuando la batería se encuentra al 10%, es decir, está prácticamente descargada, hay 5.75 V en sus terminales.

Dado que las baterías están conectadas en serie, el máximo voltaje que puede entregar el banco es de 101.92 V y el mínimo es de 92 V. Estos valores están dentro del rango permitido para que el motor del vehículo funcione adecuadamente. El voltaje mínimo para que el moto-generador arranque es de 96 V ya que de esta forma el motor eléctrico tiene el desempeño deseado y además se evita un posible daño en las baterías debido a una sobrecarga por el bajo voltaje.



Figura 5.2. Batería de ácido-plomo.

A continuación se describen los sistemas implementados para realizar la medición de las variables mencionadas así como la estructura del nuevo programa desarrollado para que el control funcione correctamente y el vehículo tenga un desempeño eficiente.

5.2. Descripción del hardware utilizado

Como ya se mencionó anteriormente, parte de los sistemas empleados en este proyecto son los mismos que tenía el control que había sido desarrollado previamente ya que la mayoría de ellos funcionaban correctamente y no era económicamente viable realizar un nuevo diseño de hardware.

A continuación se describen los circuitos y dispositivos utilizados en este control.

5.2.1. Voltaje de CAN y Voltaje auxiliar

Es importante diferenciar entre las diferentes fuentes que alimentan a los sistemas del vehículo, ya que si no se toman las medidas adecuadas podemos tener problemas eléctricos que pueden dañar a los dispositivos electrónicos utilizados en el control.

El voltaje CAN es proporcionado por unas fuentes reguladas que toman el voltaje del banco de baterías y lo regulan a 12 V para poder alimentar a los sistemas dentro del bus CAN.

El voltaje auxiliar es proporcionado por una batería auxiliar que se encuentra instalada en el vehículo; se utiliza para alimentar a los sistemas auxiliares del vehículo, tales como: los limpiadores, el claxon, el sistema de arranque del moto-generator, etc.

5.2.2. Microcontrolador PIC18f2580

El dispositivo más importante en el desarrollo de este control es el microcontrolador PIC18f2580 (Figura 5.3.), ya que lleva a cabo la adquisición de datos del vehículo para posteriormente procesarlos y tomar decisiones para controlar el encendido del moto-generator. Este microcontrolador cuenta con 256 bytes de memoria EEPROM suficientes para almacenar datos. Además cuenta con un módulo ECAN (Enhanced Control Area Network) el cual será utilizado para comunicarse con los demás sistemas de control del vehículo.

Las características principales de este microcontrolador son las siguientes:

- Frecuencia de operación: 40 MHz
- Memoria de programa: 32 kB
- Puertos de E/S: 4
- Módulo de captura: 1
- Módulo de convertidor analógico digital (ADC) de 10 bits

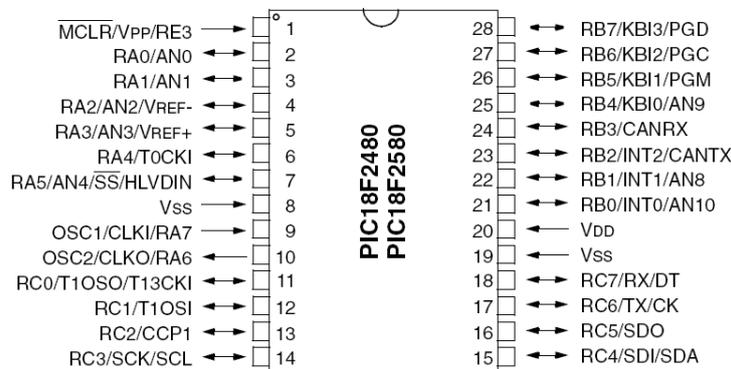


Figura 5.3. Configuración de pines del PIC18f2580.

5.2.3. Transceptor MCP2551

Como se menciona previamente, el transceptor es un dispositivo utilizado para adecuar los niveles de las señales para su posterior transmisión en el bus. El dispositivo utilizado en este proyecto es el MCP2551 (Figura 5.4.) el cual hace la función de interfaz entre el controlador de CAN integrado en el PIC18f2580 y el bus. También se utiliza como buffer entre el bus y el controlador CAN para prevenir picos de voltaje, provocados por fuentes externas, tales como interferencia electromagnética, transitorios o descargas electrostáticas. Este dispositivo es empleado para aplicaciones de alta velocidad.

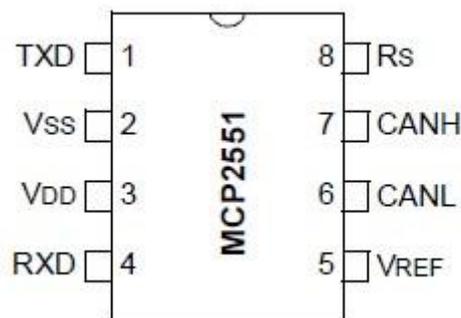


Figura 5.4. Configuración del transceptor MCP2551.

A continuación se describe la función de cada terminal de este dispositivo:

- **TxD:** Entrada digital que recibe los datos que van a ser enviados por el bus.
- **VSS:** Referencia de tierra.
- **VDD:** Tensión de alimentación (+5V).
- **RxD:** Señal digital que transmite los datos recibidos por el
- **V_{REF}:** Tensión de referencia a la salida definida como $V_{dd}/2$.
- **CANL:** Parte baja de la señal diferencial del bus.
- **CANH:** Parte alta de la señal diferencial del bus.
- **Rs:** Este pin permite seleccionar distintos modos de operación mediante una resistencia externa.

Los tres modos de operación para este transceptor son los siguientes:

- **High-speed:** este modo se selecciona al conectar el pin Rs con el pin Vss. Es utilizado para aplicaciones cuya tasa de transmisión de datos es muy alta.
- **Slope-control:** este modo se selecciona al conectar un resistor externo entre el pin Rs y la tierra del sistema. Con este modo se reducen las interferencias electromagnéticas.
- **Standby-mode:** el dispositivo puede ser puesto en standby o modo "sleep" si se conecta un nivel alto en Rs; en este modo el transmisor se apaga y el receptor opera con una corriente muy baja.

En este proyecto el dispositivo está configurado en Slope-control para reducir errores en el sistema debidos a interferencia electromagnética (Figura 5.5.)

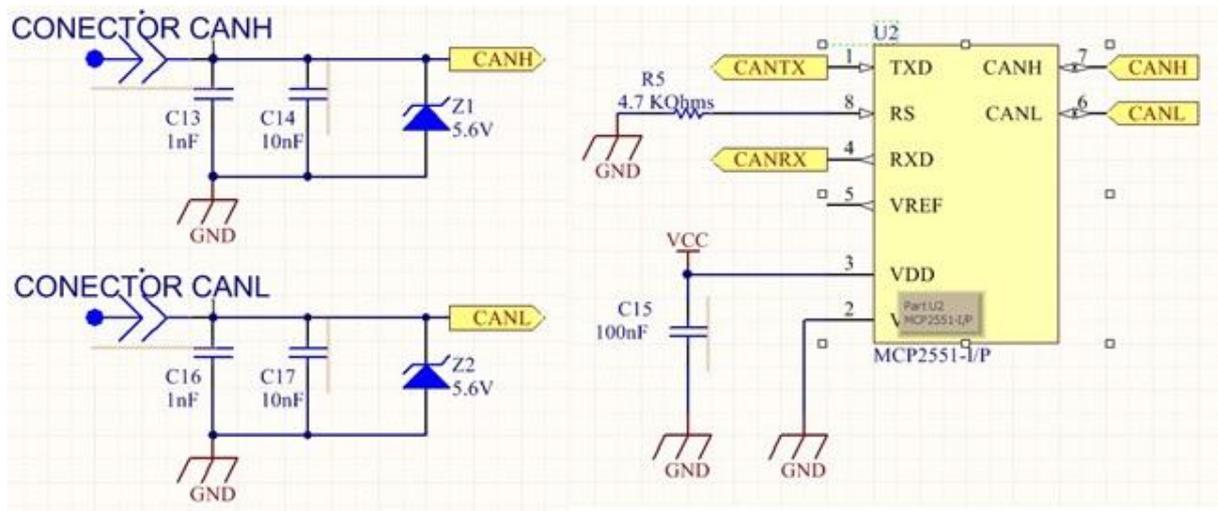


Figura 5.5. Conexión del transceptor.

El circuito conjunto es un sistema de filtrado y fijador de voltaje para protección de sobre voltaje del transceptor.

5.2.4. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación para el control es de suma importancia pues de ella depende en gran medida el buen funcionamiento de este. El microcontrolador y los demás dispositivos deben ser alimentados con un voltaje constante que no sea vulnerable a picos de voltaje o a diversas fuentes de ruido. El voltaje de CAN es 12 V, por lo tanto es necesario utilizar un regulador de voltaje para obtener únicamente 5 V con los que se va a alimentar a los circuitos digitales. El regulador de voltaje utilizado es un LM7805 con sus respectivas etapas de filtrado a la entrada y a la salida del circuito para evitar daño por pico de voltaje o ruido (Figura 5.6.).

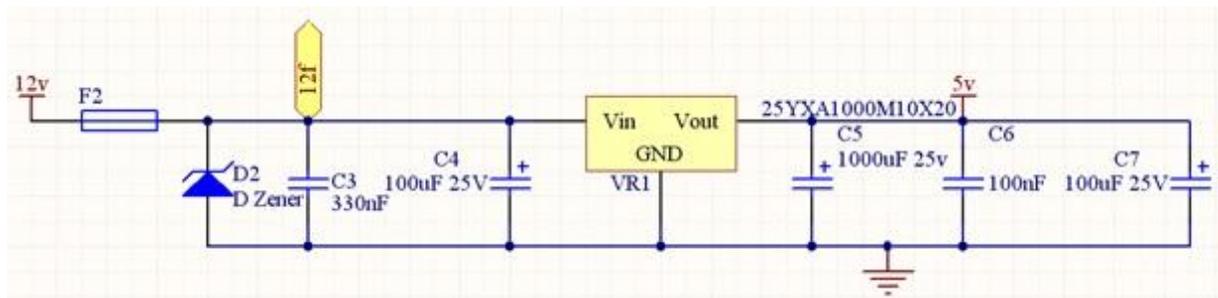


Figura 5.6. Circuito de la fuente de alimentación.

5.2.5. Referencia de voltaje para el módulo ADC

Como se menciona previamente, el PIC18f2580 cuenta con un módulo de convertidor analógico digital con el cual se realiza la adquisición de diversas señales en el sistema. Este módulo requiere una referencia de voltaje para poder llevar a cabo la conversión con base en este nivel. En este caso se maneja una referencia de 5 V la cual no debe presentar variaciones debido a que la más mínima puede causar errores en la lectura de los datos. Por esta razón se utiliza un diodo zener de precisión LM336 de 5 V, cuya máxima variación es de 0.004 V. de esta forma el

módulo del convertidor analógico digital siempre tiene la referencia de 5 V y funciona adecuadamente (Figura 5.7.).

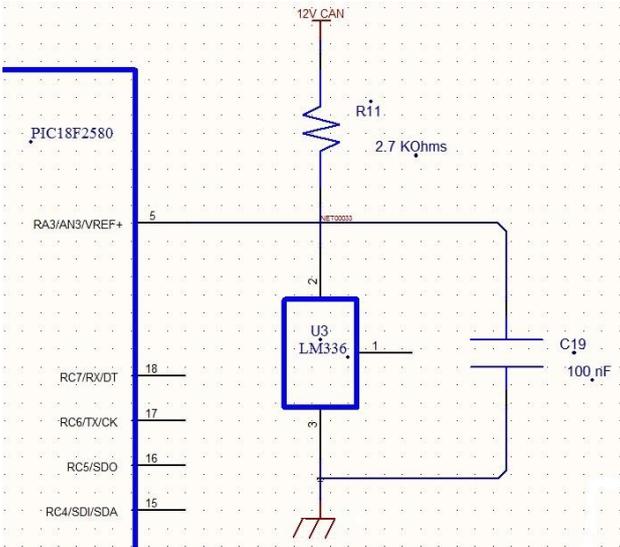


Figura 5.7. Circuito empleado para la referencia de voltaje para el módulo de convertidor analógico digital.

5.2.6. Circuito de programación ICSP

Con el fin de programar el microcontrolador sin necesidad de retirarlo de la tarjeta de circuito impreso se introduce un circuito de programación ICSP (InCircuit Serial Programming).

Este circuito es empleado para llevar a cabo la comunicación entre la herramienta de programación y el microcontrolador, se emplea para cargar el programa en el microcontrolador y para depurarlo.

La herramienta de programación que se empleó para este trabajo es el ICD2 de Microchip. El circuito empleado para llevar a cabo la comunicación entre el programador y el microcontrolador, según el fabricante, debe ser el siguiente (Figura 5.8.).

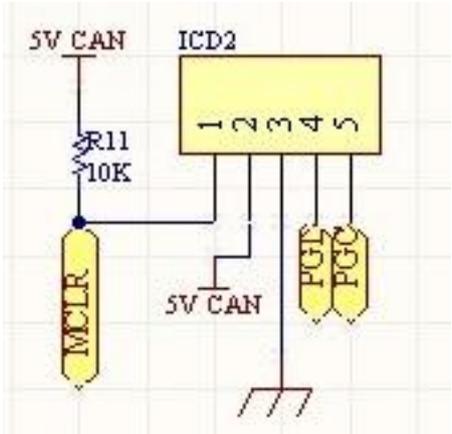


Figura 5.8. Circuito de programación ICSP.

5.2.7. Medidor de voltaje promedio para la estimación del SOC

Este circuito es el más importante del control pues se encarga de medir el voltaje a la salida del banco de baterías del ECCO-5 y con base en esta medición se estima el SOC y posteriormente decide si debe encender el moto-generator. Debido a que el módulo del convertidor analógico digital del microcontrolador tiene una referencia de 5 V, se debe acondicionar la señal del banco de baterías, la cual puede variar de 92 V a 102 V. Para esto se utiliza un divisor de voltaje de tal forma que el valor máximo de salida sea de 5 V.

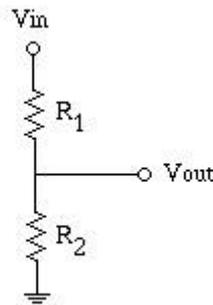


Figura 5.9. Configuración general de un divisor de voltaje.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Los resistores que componen a este divisor son de 100 M Ω para R_1 y 3.9 M Ω para R_2 , de esta forma se garantiza que el valor máximo leído por el ADC es menor a 5 V. los valores máximos que proporciona el divisor, son los siguientes:

- Para 92 V (10% del SOC):

$$V_{out} = 92 \frac{3.9}{103.9} V$$

$$V_{out} = 3.4533V$$

- Para 102 V (100% del SOC):

$$V_{out} = 102 \frac{3.9}{103.9} V$$

$$V_{out} = 3.8286V$$

La medición debe ser precisa para que el control funcione correctamente, por esta razón se utilizan resistores cuyos valores son muy grandes y su tolerancia es mínima, de esta forma se garantiza que no haya una variación muy grande en el voltaje de salida y este pueda ser leído adecuadamente por el ADC del microcontrolador.

Por último, como ya se mencionó anteriormente, se utiliza una etapa de filtrado compuesta por unos capacitores acoplados a la entrada del ADC del microcontrolador (Figura 5.10.). Cuando se presenta una demanda de corriente muy alta por parte del motor eléctrico los capacitores se mantienen cargados y de esta forma obtenemos una medición del voltaje promedio en el banco de baterías. Posteriormente, el microcontrolador toma este voltaje como referencia y realiza una estimación del SOC basada en los datos proporcionados por el fabricante.

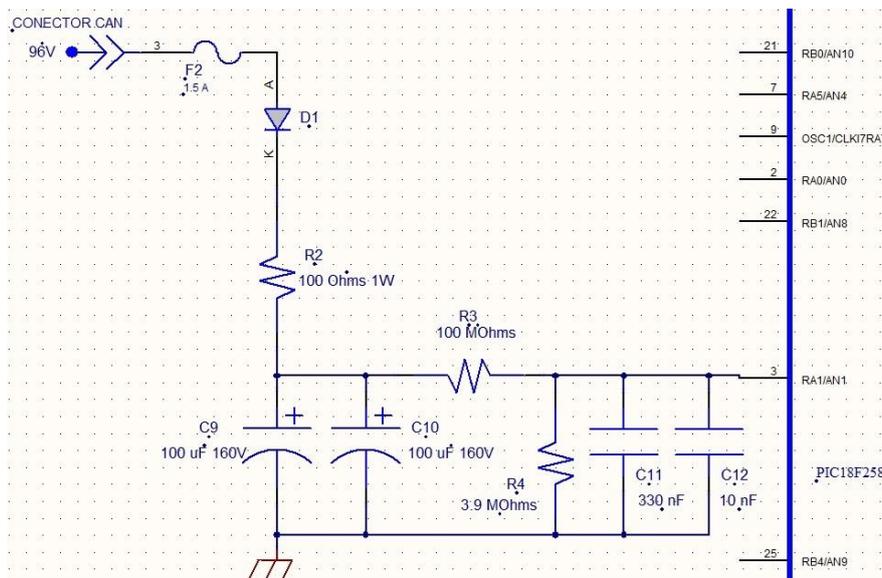


Figura 5.10. Circuito para la medición del voltaje del banco de baterías.

5.2.8. Medidor de gasolina

Este es otro sistema de gran importancia pues indica la cantidad de gasolina que hay en el tanque del vehículo. En caso de que no haya combustible en el tanque, el control no permite que el moto-generator encienda para evitar posibles daños en el sistema de arranque.

El dispositivo utilizado para medir el nivel de gasolina en el tanque es un flotador cuyo principio de funcionamiento se basa en una resistencia variable, dependiendo de la posición del flotador. Cuando el flotador se encuentra en la parte más alta el valor de la resistencia es de 30Ω , y cuando se encuentra en la parte más baja el valor de la resistencia es de 256Ω . En la siguiente figura se muestra el flotador que además incluye la bomba de gasolina para hacer llegar el combustible hasta el moto-generator (Figura 5.11.).



Figura 5.11. Flotador y bomba de gasolina.

Para llevar a cabo la medición del nivel de gasolina realizamos cambios mínimos en el hardware, siendo esto lo único que modificamos del hardware que ya se tenía diseñado previamente.

De nueva cuenta recurrimos a un divisor de voltaje, cuya salida será leída en otro canal del ADC, en este caso se tiene la misma referencia de voltaje, por lo que se puede medir directamente (Figura 5.12.).

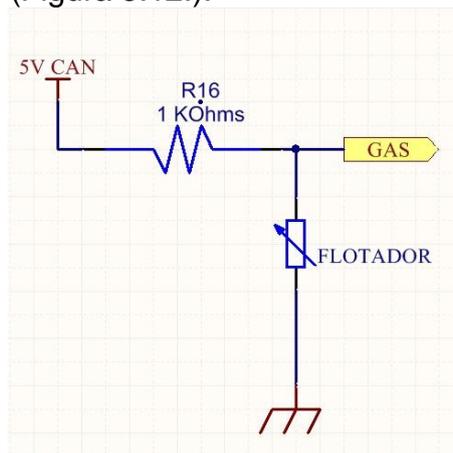


Figura 5.12. Circuito que mide el nivel de gasolina.

Para el divisor de voltaje utilizamos una resistencia de 1 k Ω conectada en serie con el flotador. El divisor está alimentado por un regulador de 5 V, que toma el voltaje de entrada de la fuente auxiliar del vehículo; así el voltaje que tenemos a la salida del divisor, y que será medido por el módulo ADC, es el siguiente:

- Tanque lleno (30 Ω):

$$V_{out} = 5 \frac{30}{1030} V$$

$$V_{out} = 0.1456V$$

- Tanque vacío (256 Ω):

$$V_{out} = 5 \frac{256}{1256} V$$

$$V_{out} = 1.0191V$$

De esta forma nos aseguramos que los valores proporcionados por el divisor de voltaje puedan ser leídos por el ADC.

5.2.9. Medidor de temperatura

Es importante conocer la temperatura dentro del gabinete del moto-generador ya que si esta es muy baja, el motor de combustión interna no será capaz de arrancar y necesitará la acción de un ahogador para poder encender. De igual forma es importante que la temperatura no sea muy alta para evitar posibles daños mecánicos en el motor y problemas eléctricos en los dispositivos electrónicos del control.

Para conocer la temperatura del moto-generador se utiliza un circuito integrado LM35, el cual es un sensor de temperatura de precisión cuya salida es de 10mV/°C (Figura 5.13.).

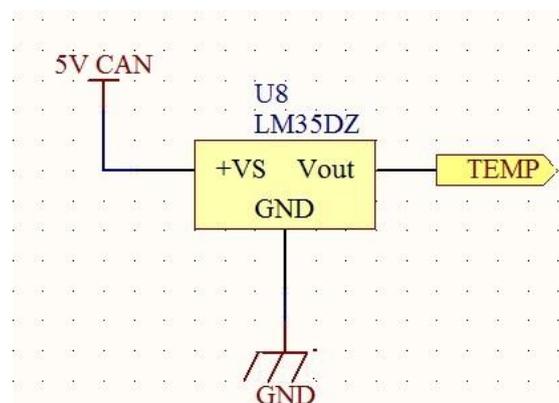


Figura 5.13. Diagrama del sensor de temperatura.

5.2.10. Contador de RPM

El circuito de la chispa es el encargado de proveer la energía para la ignición del combustible dentro el motor, por esta razón cada que el motor desarrolla una revolución, el circuito de la chispa genera un pulso. Podemos aprovechar esta característica para contar el número de pulsos en un segundo con el contador de eventos del microcontrolador y de esta forma conocer las RPM del motor. De nueva cuenta nos encontramos con un problema de referencias eléctricas ya que el circuito de la chispa está alimentado con el voltaje auxiliar y el microcontrolador con el voltaje CAN. Este problema se resuelve de nueva cuenta con el empleo de un aislamiento óptico por medio de un optoacoplador, de esta forma el microcontrolador puede leer sin problema el número de pulsos a la salida del optoacoplador (Figura 5.14.).

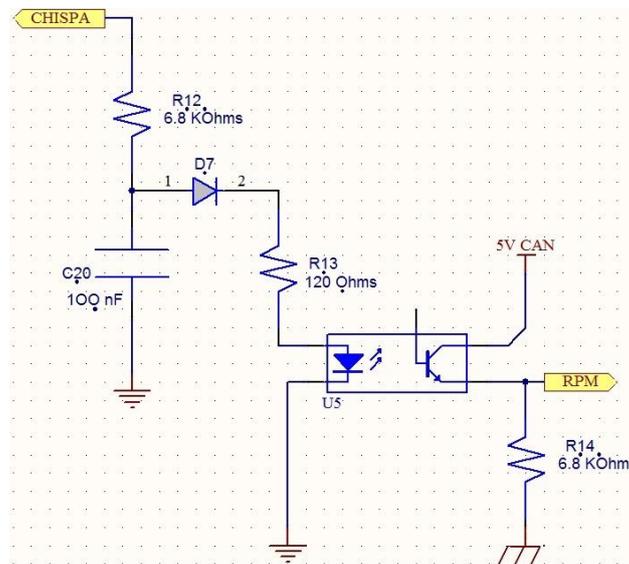


Figura 5.14. Circuito de la chispa y contador de RPM.

5.2.11. Sistema de arranque del moto-generator

El moto-generator cuenta con su propio sistema de arranque eléctrico, el cual requiere de un circuito de arranque que ya está incorporado en el control. El sistema de arranque está compuesto por la marcha, la bomba de gasolina, un actuador electro mecánico que funciona como ahogador del motor, un circuito de ralentí y el circuito que proporciona la chispa para la ignición del combustible dentro del motor.

Para la activación de cada uno de los circuitos de cada uno de los elementos mencionados anteriormente se utiliza un relevador que hace la función de switch de encendido y apagado de cada una de las señales necesarias para el encendido del motor (Figura 5.15.). De esta forma el microcontrolador envía las señales de control a estos relevadores en un orden específico para poder encender el motor, este orden es descrito mas adelante.

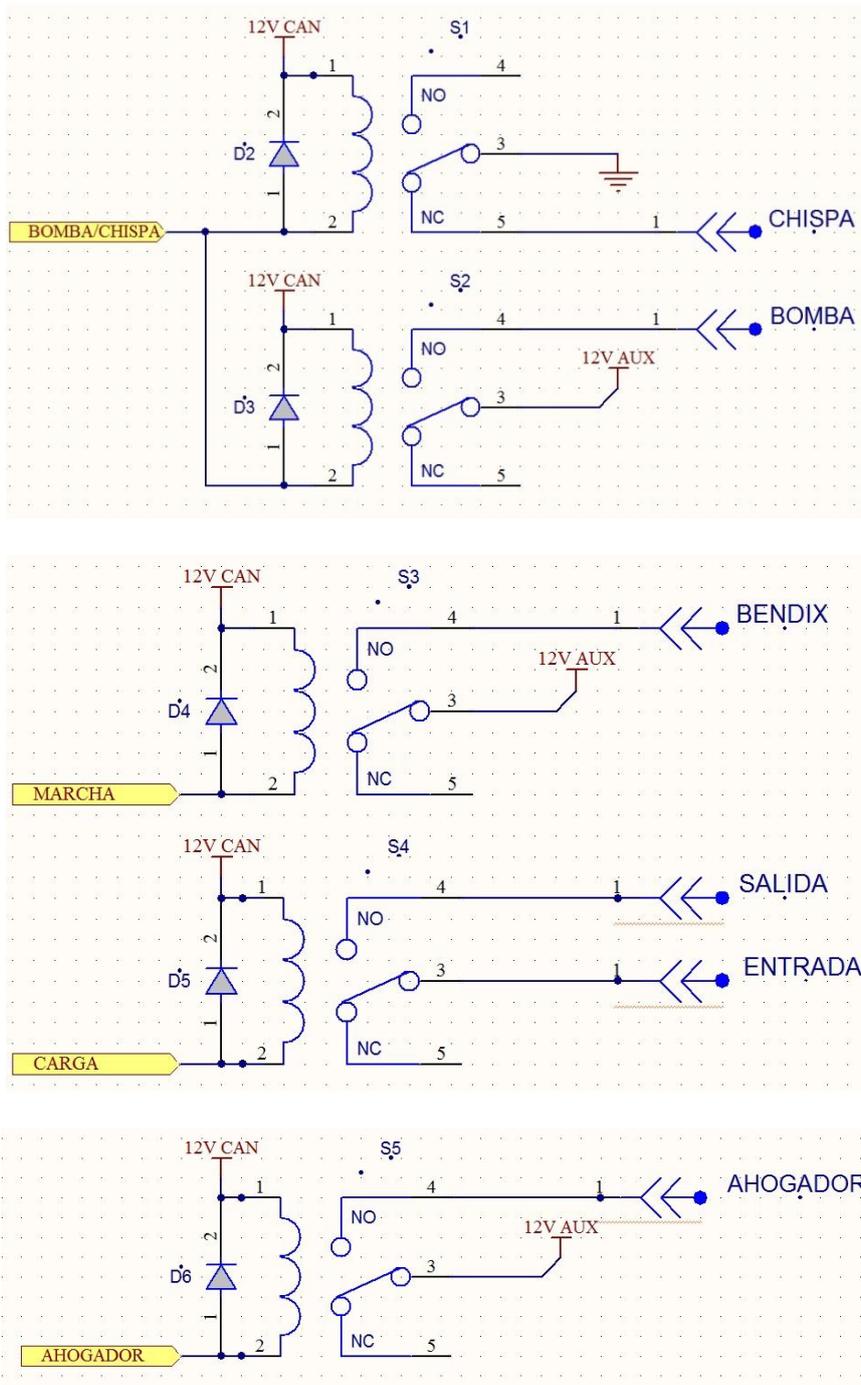
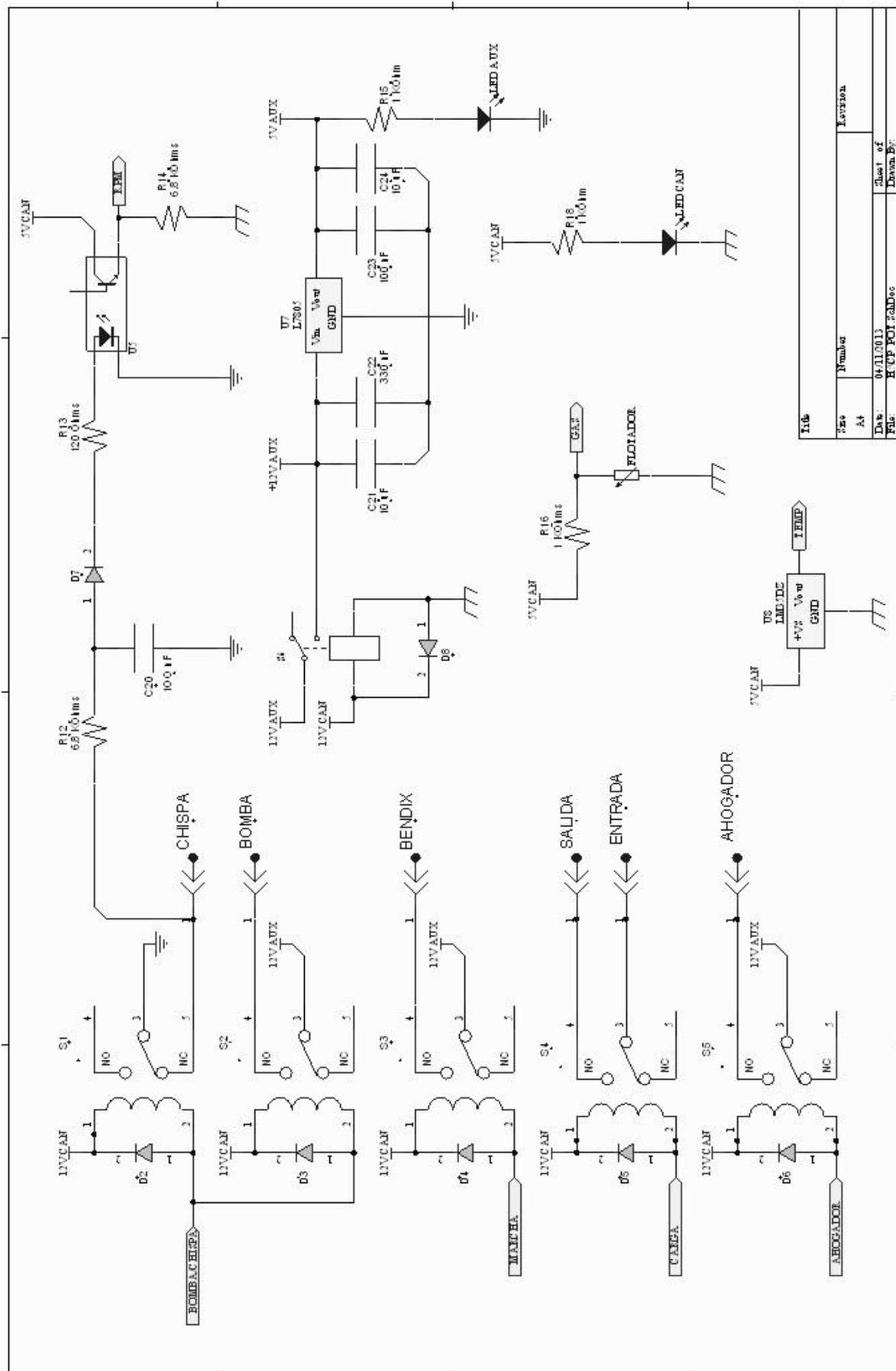


Figura 5.15. Diagrama de la activación de los elementos para el encendido del motor.



Título	
№ de	Numero
A4	A4
Date:	04/11/2013
File:	PLC-BOY-PLC.DWG
Page 1 of 1 Drawn By:	

Figura 5.17. Diagrama del circuito completo del control (Continuación).

5.3. Desarrollo del software para el control

La red CAN instalada en el vehículo está constituida por un bus o arnés y los nodos CAN. Su función principal es comunicar los diferentes dispositivos interconectados en la red, con una alta tasa de transmisión e inmunidad a ruido electromagnético.

La red de CAN de nuestro vehículo consta de 7 nodos y un control maestro (CM). El tránsito de los mensajes los controla el CM el cual manda los mensajes para pedir información a cada nodo, estos tienen un identificador que pasa por un filtro de aceptación el cual permite que puedan enviar información de regreso al CM.

El CM está configurado para administrar los mensajes de todos los periféricos conectados al CAN. Manda mensajes preguntando a cada módulo y después espera respuesta de estos, ningún otro módulo CAN manda mensajes de manera independiente. El CM a su vez está conectado a un display que muestra la información al usuario sobre el estado del vehículo (Figura 5.18.).

El control del moto-generador envía los siguientes mensajes a través del bus:

- Nivel de gasolina
- Nivel de voltaje de baterías
- Estado y errores
- Horas de uso del moto-generador

De esta forma el CM puede procesar los datos recibidos del control de moto-generador y mostrar en el display el estado actual del banco de baterías y del tanque de gasolina, así como mandar un mensaje de error en caso de que el moto-generador presente alguna falla.

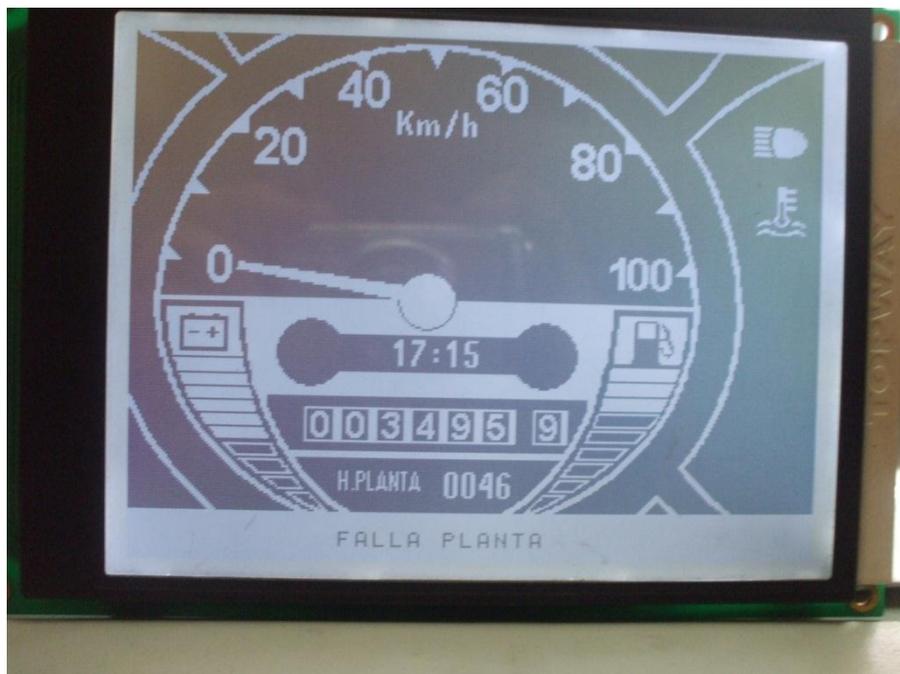


Figura 5.18. Display que muestra el estado del vehículo al usuario.

Para el desarrollo de este control se utilizaron las herramientas proporcionadas por Microchip para la programación de sus microcontroladores. Se utilizó el editor MPLAB así como el programador ICD2 para llevar a cabo el cambio de las rutinas de medición de voltaje y gasolina en el programa original. La programación del microcontrolador fue hecha mediante el puerto ICSP implementado en la tarjeta del control.

Se utilizó lenguaje ensamblador por ser un lenguaje de bajo nivel que requiere menos recursos de memoria del microcontrolador y por lo tanto resulta más eficiente.

A continuación se describen las modificaciones hechas al programa original para que el control del moto-generador funcione adecuadamente.

5.3.1. Diagramas de flujo

El control del moto-generador es un sistema de ciclo cerrado, ya que el voltaje de las baterías se monitorea todo el tiempo y se compara con una referencia, que en este caso es de 96 V; y de esta forma el control decide si encender o no el moto-generador.

Un sistema de control debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Realizar su función con precisión.
- Presentar una respuesta rápida.
- Ser estable.
- Responder sólo a entradas válidas (inmunidad al ruido).

El programa que tenía originalmente el control no cumplía con las dos primeras características ya que las rutinas que se tenían desarrolladas eran muy complejas y se llevaban a cabo muchas operaciones para calcular el nivel de voltaje en el banco de baterías así como el nivel de gasolina. Por esa razón se hizo un cambio en estas rutinas, haciéndolas más sencillas pero eficientes, con esto se logra que las mediciones y las operaciones aritméticas hechas por el microcontrolador sean más rápidas y el control sea eficiente.

Para llevar a cabo la medición de variables y posteriormente el encendido del moto-generador el control debe seguir una secuencia lógica.

El programa hecho en lenguaje ensamblador cargado en el microcontrolador es el encargado de establecer la secuencia en la que trabaja el control. Por lo que a continuación se muestran los diagramas de flujo del programa principal y sus subrutinas (Figura 5.19., Figura 5.20., Figura 5.21. y Figura 5.22.).

5.3.1.1. Programa principal

El programa principal es el siguiente:

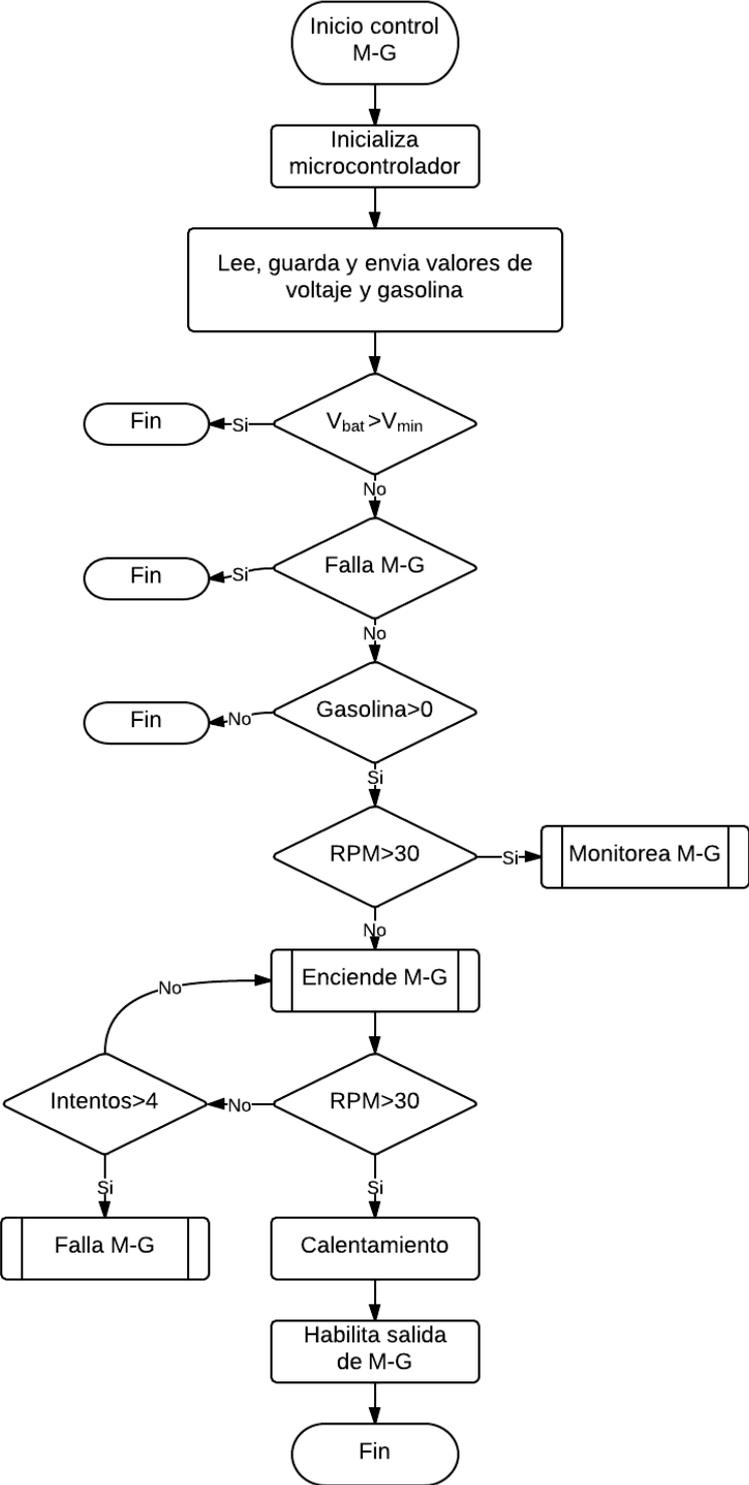


Figura 5.19. Diagrama de flujo del programa completo.

5.3.1.2. Monitoreo de moto-generador

La subrutina "Monitorea M-G" tiene la siguiente secuencia:

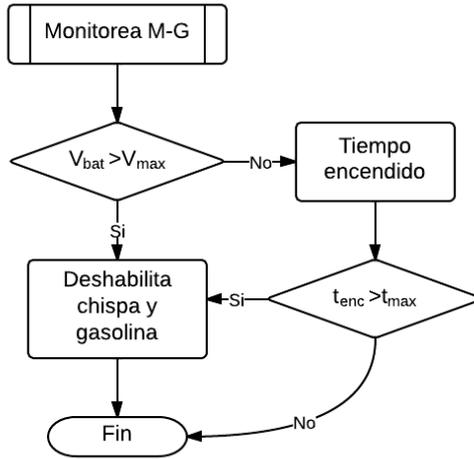


Figura 5.20. Diagrama de flujo de la rutina Monitorea M-G.

5.3.1.3. Encendido de moto-generador

La rutina de encendido para el moto-generador está dada por la siguiente secuencia:

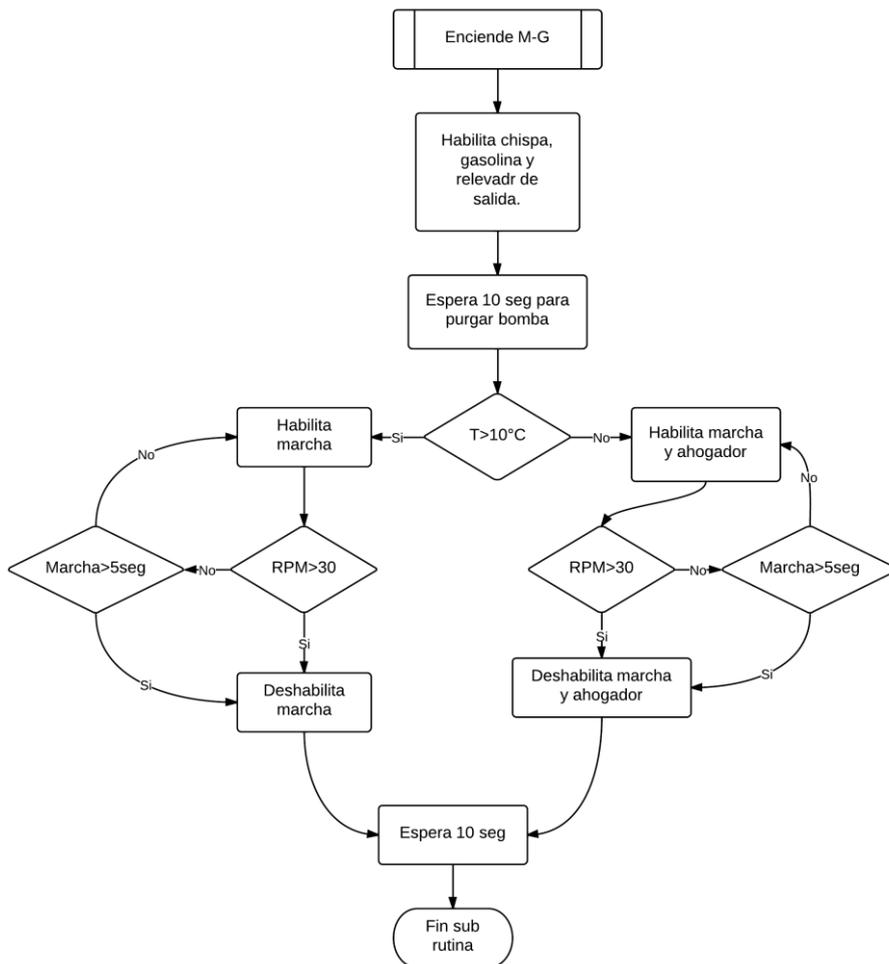


Figura 5.21. Diagrama de flujo del encendido del moto-generador.

5.3.1.4. Falla de moto-generator

Rutina para la secuencia de falla del moto-generator.



Figura 5.22. Diagrama de flujo de falla del moto-generator.

El control tiene que enviar el estado del moto-generator por el bus CAN hacia el control maestro para que este pueda mostrar el nivel de voltaje y de gasolina en el display; y en caso de ser necesario avisar al usuario si falló el moto-generator.

El control tiene que enviar los siguientes mensajes a través del bus CAN hacia el CM:

- Voltaje de baterías
- Nivel de gasolina
- Horas de uso
- Bandera de fallo de planta en caso de que sea necesario.

Los dos primeros mensajes son los más importantes pues de ellos depende que el moto-generator encienda. Las rutinas que hacían estas mediciones en la versión anterior del control eran muy tardadas y provocaban muchos errores en el sistema debido a que no reflejaban el estado real del sistema; por esta razón se decidió hacer un cambio en estas rutinas de tal forma que la medición fuera precisa y más rápida que en la versión anterior.

5.3.2. Rutina de lectura de voltaje de baterías

Para realizar la medición del voltaje en el banco de baterías llevamos a cabo una conversión analógico-digital del voltaje muestra en el divisor de voltaje implementado para acondicionar la señal del banco de baterías. La conversión la hacemos por medio del canal 0 del módulo ADC del microcontrolador.

El control debe enviar un valor de voltaje hacia el CM para que este pueda desplegar el estado del sistema en el display. El display cuenta con un medidor compuesto por 11 estados que representan el voltaje en el banco de baterías en el rango de los 90

V a los 100 V. Como el motor del vehículo tiene un buen desempeño a partir de los 96 V en el banco de baterías, este será el voltaje mínimo para que el motor-generador encienda.

Como el módulo ADC del microcontrolador es de 10 bits, el dato adquirido es almacenado en dos registros diferentes llamados ADRESL y ADRESH en los cuales se almacena la parte baja y alta de la adquisición, respectivamente.

Cada estado del medidor está representado por una barra horizontal que a su vez representa al voltaje medido en el banco de baterías (Figura 5.23.).



Figura 5.23. Display que muestra el estado de carga del banco de baterías.

De esta forma el estado 11 indica que el voltaje en el banco se encuentra por arriba de los 100 V, es decir, que el banco está “lleno”. En cambio el estado 1 indica que el voltaje en el banco está por debajo de los 90 V. Cuando el sistema está en el estado 11 todas las barras se encuentran apagadas y cuando el sistema se encuentra en el estado 1 todas las barras están encendidas.

Considerando que el convertidor analógico digital del PIC18f2580 tiene una resolución de 10 bits y que el voltaje de referencia es de 5 V, obtenemos que la resolución de nuestra conversión es de 4.8 mV/bit. Así a la entrada analógica de 0 V le corresponde una digital de 00 0000 0000 y para la de 5 V una de 11 1111 1111.

Mediante esta relación obtuvimos los siguientes datos teóricos correspondientes a cada nivel de voltaje en el banco de baterías.

Estado	Voltaje baterías	Voltaje mínimo para cambio de estado	Voltaje mínimo en divisor	Valor decimal en el ADC	ADRESH	ADRESL
11	100 V	99.5 V	3.7348 V	765	00000010	11111101
10	99 V	98.5 V	3.6973 V	757	00000010	11110101
9	98 V	97.5 V	3.6597 V	750	00000010	11101110
8	97 V	96.5 V	3.6222 V	742	00000010	11100110
7	96 V	95.5 V	3.5846 V	734	00000010	11011110
6	95 V	94.5 V	3.5471 V	726	00000010	11010110
5	94 V	93.5 V	3.5096 V	719	00000010	11001111
4	93 V	92.5 V	3.4720 V	711	00000010	11000111
3	92 V	91.5 V	3.4345 V	703	00000010	10111111
2	91 V	90.5 V	3.3970 V	696	00000010	10111000
1	90 V	89.5 V	3.3594 V	688	00000010	10110000

Tabla 5.2. Valores teóricos para cada nivel de voltaje.

Consideramos que el cambio de estado debe ocurrir a partir de que el voltaje de las baterías supera el valor medio entre dos valores consecutivos enteros de voltaje, por esta razón se utiliza el voltaje mínimo para realizar cambio de estado. De esta forma la medición del voltaje en las baterías es más precisa.

Dada la tabla anterior observamos que el valor del registro ADRESH permanece constante, razón por la cual podemos utilizar al registro ADRESL para determinar el voltaje de las baterías.

Con los datos obtenidos en la tabla anterior podemos determinar los valores de 11 registros, uno para cada estado, tomando como referencia el valor decimal del registro ADRESL correspondiente a cada uno de los voltajes mínimos para el cambio de estado.

Estado	Voltaje baterías	ADRESL BIN	ADRESL DEC
11	100 V	11111101	253
10	99 V	11110101	245
9	98 V	11101110	238
8	97 V	11100110	230
7	96 V	11011110	222
6	95 V	11010110	214
5	94 V	11001111	207
4	93 V	11000111	199
3	92 V	10111111	191
2	91 V	10111000	184
1	90 V	10110000	176

Tabla 5.3. Valores teóricos para cada nivel de voltaje considerando solo la parte baja de la conversión analógica digital.

De esta forma cuando el módulo del ADC hace la adquisición de datos, guardamos el contenido del registro ADRESL en un registro llamado VOLTBAT y lo

comparamos con los valores de ADRESL-DEC para determinar el nivel de voltaje en el banco de baterías.

Una vez que el programa ha determinado el estado del banco de baterías escribe el valor de voltaje en un registro llamado CANVOLTAJE, cuyo contenido es enviado al CM a través del bus CAN y además es utilizado por el control para terminar si debe encender el moto-generator.

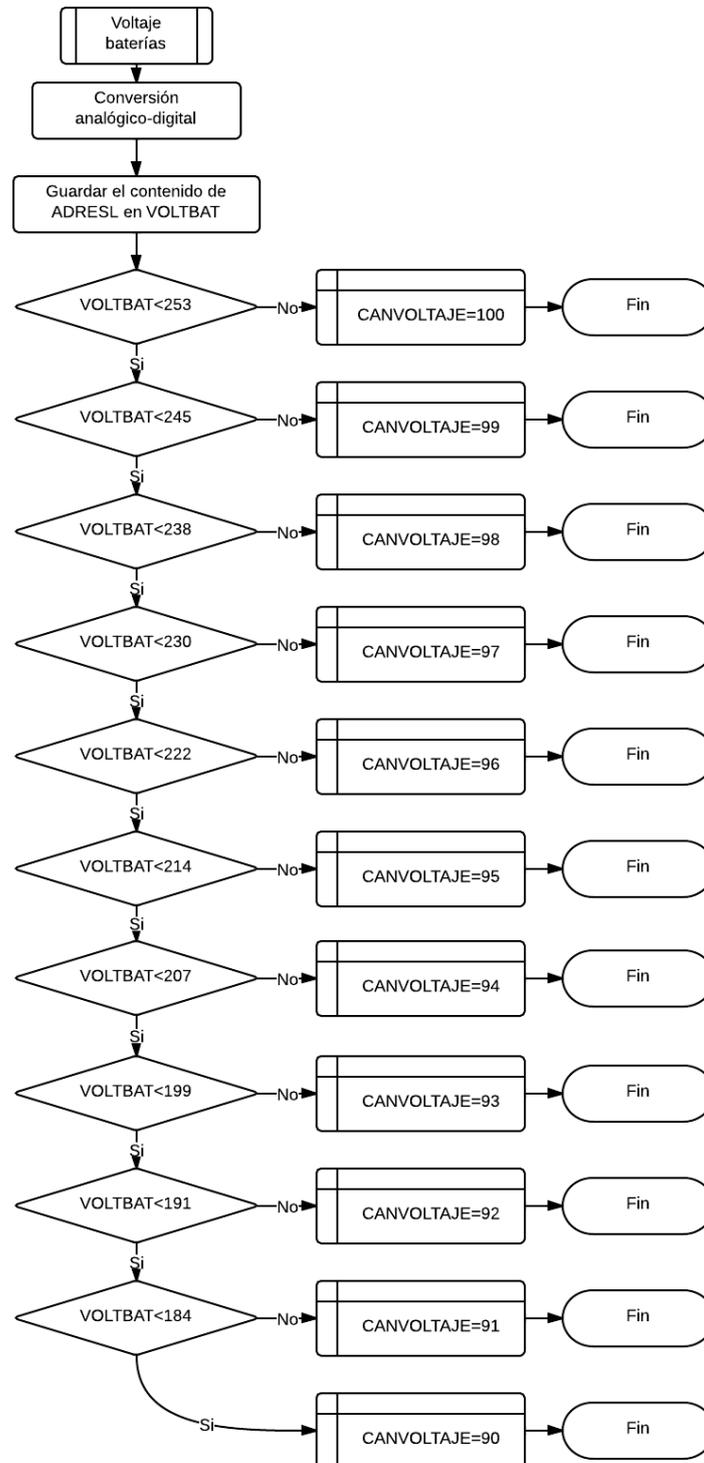


Figura 5.24. Diagrama de flujo de la rutina de medición de voltaje.

El código en lenguaje ensamblador queda como sigue:

```

=====
;VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE
;VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE+VOLTAJE
=====
        CLRWDT
        MOVLW B'00000000';           SELECCIONA EL CANAL 0 PARA LAS ENTRADAS ANALÓGICAS
        MOVWF ADCON0
        BSF  ADCON0, ADON
        BSF  ADCON0, GO
CICLOVOLTAJE:
        BTFSC ADCON0, GO ;           PREGUNTA SI YA TERMINÓ LA CONVERSIÓN
        BRA  CICLOVOLTAJE
        BCF  ADCON0, ADON ;         DESHABILITA EL CONVERTIDOR
        MOVFF ADRESL, VOLTBAT

        MOVLW D'253'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO10
        MOVLW D'245'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO9
        MOVLW D'238'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO8
        MOVLW D'230'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO7
        MOVLW D'222'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO6
        MOVLW D'214'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO5
        MOVLW D'207'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO4
        MOVLW D'199'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO3
        MOVLW D'191'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO2
        MOVLW D'184'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO1
        MOVLW D'176'
        CPFSLT VOLTBAT
        BRA  ESTADO0

ESTADO0:
        MOVLW D'90'
        MOVWF CANVOLTAJE
        MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
        RETURN
ESTADO1:
        MOVLW D'91'
        MOVWF CANVOLTAJE
        MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
        RETURN
ESTADO2:
        MOVLW D'92'
        MOVWF CANVOLTAJE
        MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
        RETURN
ESTADO3:
        MOVLW D'93'
        MOVWF CANVOLTAJE
        MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
        RETURN

```

```

ESTADO4:
    MOVLW D'94'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO5:
    MOVLW D'95'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO6:
    MOVLW D'96'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO7:
    MOVLW D'97'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO8:
    MOVLW D'98'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO9:
    MOVLW D'99'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN
ESTADO10:
    MOVLW D'100'
    MOVWF CANVOLTAJE
    MOVFF CANVOLTAJE, VOLTAJE
    RETURN

    NOP
    RETURN

```

5.3.3. Rutina de lectura de nivel de tanque de gasolina

Para llevar a cabo la medición de gasolina en el tanque del vehículo realizamos un proceso similar al de la medición de voltaje. Se emplea el canal 2 del módulo ADC del microcontrolador para medir la salida del divisor de voltaje formado por el flotador y la resistencia de 100Ω.

El control debe enviar un mensaje al CM indicando el nivel del tanque de gasolina. El medidor de gasolina en el display es muy similar al del voltaje, cuenta con 9 barras horizontales que al estar el tanque lleno se encuentran apagadas y por el contrario, cuando el tanque está vacío las 9 barras están encendidas.



Figura 5.25. Display que muestra el nivel de gasolina en el tanque.

Dado que este medidor solo indica el nivel de gasolina en el tanque y no los litros contenidos en él, podemos tomar 10 valores proporcionales a la salida del divisor de voltaje para representar a cada estado de este medidor. Previamente se calculó el voltaje a la salida del divisor cuando el flotador se encuentra en su nivel más alto y más bajo, de esta forma podemos tomar los siguientes valores como referencia para cada estado del medidor.

Estado	Voltaje en el divisor	Valor decimal en el ADC	ADRESH	ADRESL
1	1.0191 V	209	00000000	11010001
2	0.9220 V	189	00000000	10111101
3	0.8249 V	169	00000000	10101001
4	0.7279 V	149	00000000	10010101
5	0.6308 V	129	00000000	10000001
6	0.5338 V	109	00000000	01101101
7	0.4367 V	89	00000000	01011001
8	0.3397 V	69	00000000	01000101
9	0.2426 V	49	00000000	00110001
10	0.1460 V	29	00000000	00011101

Tabla 5.4. Valores teóricos para cada nivel de gasolina en el tanque.

Se observa que el registro ADRESH se encuentra vacío para todos los valores seleccionados, por lo tanto cuando el módulo del ADC termina la conversión almacenamos el contenido de ADRESL en un registro llamado FINGAS. Posteriormente comparamos el contenido de este registro con cada uno de los valores de referencia dados en la tabla anterior y de esta forma se determina el nivel de gasolina en el tanque

Una vez que el programa ha determinado el nivel del tanque de gasolina, escribe un valor entre 0 y 9, dependiendo del resultado de la comparación, en un registro llamado CANGASFINAL, cuyo contenido es enviado al CM a través del bus CAN.

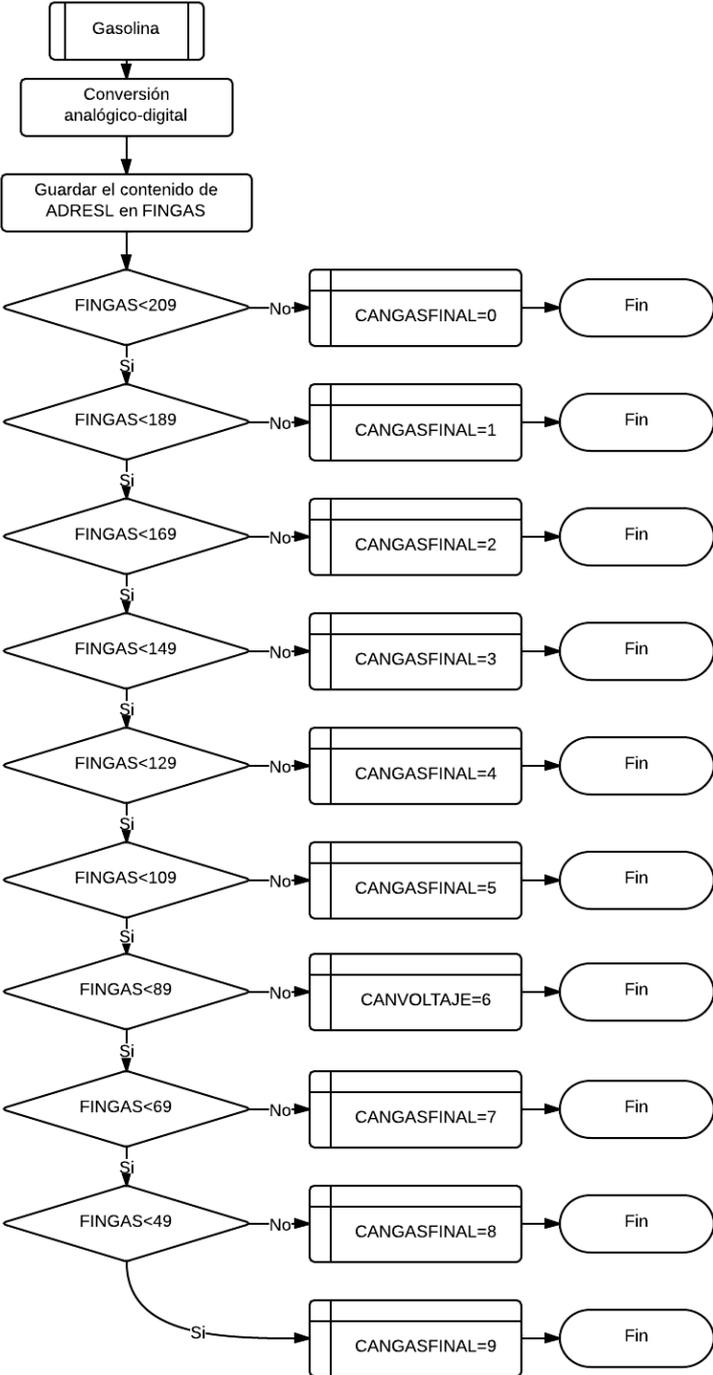


Figura 5.26. Diagrama de flujo de la rutina de medición de gasolina.

El código en lenguaje ensamblador queda como sigue:

```
=====
;GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+
GASOLINA.;GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+GASOLINA+
=====
```

```
CLRWDT
MOVLW B'00001000'; SLECCIONA EL CANAL 2 PARA LAS ENTRADAS ANALÓGICAS
MOVWF ADCON0
BSF ADCON0, ADON
BSF ADCON0, GO
```

CICLOGAS:

```
BTFSK ADCON0, GO
BRA CICLOGAS
BCF ADCON0, ADON
MOVFF ADRESL, FINGAS
```

```
MOVLW D'209'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL1
MOVLW D'189'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL2
MOVLW D'169'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL3
MOVLW D'149'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL4
MOVLW D'129'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL
MOVLW D'109'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL6
MOVLW D'89'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL7
MOVLW D'69'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL8
MOVLW D'49'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL9
MOVLW D'29'
CPFSLT FINGAS
BRA NIVEL10
```

; RETURN

NIVEL1:

```
MOVLW D'0'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN
```

NIVEL2:

```
MOVLW D'1'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN
```

NIVEL3:

```
MOVLW D'2'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN
```

NIVEL4:

```
MOVLW D'3'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN
```

NIVEL5:

```
MOVLW D'4'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN
```

NIVEL6:
MOVLW D'5'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN

NIVEL7:
MOVLW D'6'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN

NIVEL8:
MOVLW D'7'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN

NIVEL9:
MOVLW D'8'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN

NIVEL10:
MOVLW D'9'
MOVWF CANGASFINAL
RETURN

CLRF FINGAS
RETURN

6. Resultados y conclusiones

Como se ha mencionado previamente es muy importante dar seguimiento al desarrollo y producción de vehículos eléctricos e híbridos en México ya que, comparados con los vehículos con motor de combustión interna, resultan menos contaminantes y más eficientes pues su emisión de gases de efecto invernadero es prácticamente nula y son considerablemente menos ruidosos que un vehículo convencional.

Una de las principales desventajas de los vehículos eléctricos en la actualidad es su baja autonomía; ya que esta depende directamente de la energía almacenada en las baterías se necesitaría un banco de baterías más grande para tener mayor autonomía, lo cual no es viable por cuestiones de costo y de peso del vehículo. Por esto es necesario que los sistemas de control empleados en este tipo de vehículos sean tan eficientes como sea posible.

El principal problema del control para el encendido del moto-generador en el vehículo híbrido ECCO5 consistía en la lentitud con la que se hacía la estimación del estado de carga del banco de baterías así como del nivel de combustible. Esto se debía principalmente a que las rutinas de medición programadas en el microcontrolador eran muy extensas y repetitivas. Originalmente para hacer el cálculo del estado de carga se tomaban tres muestras de voltaje y de estas se obtenía un promedio, esta acción se repetía tres veces y al final se calculaba un promedio de estas tres mediciones. Para determinar el estado del tanque de combustible se llevaba un procedimiento similar.

Para solucionar este problema se programaron unas rutinas que toman el valor del ADC del microcontrolador y este se compara con un valor predeterminado en una tabla. Una vez que se ha determinado a que valor de Estado de carga y del nivel de gasolina corresponden los valores medidos, el valor correspondiente de la tabla se envía por el bus CAN y así el CM manda los valores al display para que puedan ser vistos por el usuario y además determina si debe encender o no al moto-generador.

Una vez que se programa el microcontrolador con las nuevas rutinas de medición de voltaje y gasolina se observa que hay una notable mejoría en cuanto al tiempo de adquisición de datos. Anteriormente el control tardaba mucho en enviar los mensajes de CANGASFINAL y CANVOLTAJE al CM lo cual era interpretado por este como un nivel de voltaje muy bajo en el banco de baterías, lo cual llevaba al sistema a un estado de falla.

De igual forma es importante mantener el estado de carga del banco de baterías en un nivel adecuado para evitar un posible daño en el mismo debido a una descarga abrupta y una vez que el control hace una estimación adecuada del estado de carga para determinar si enciende o no el moto-generador, se garantiza que el estado de carga será el adecuado durante el funcionamiento del vehículo.

A pesar de que la estimación del estado de carga por medio de la medición del voltaje del banco de baterías no es el método más preciso, si es el más adecuado para este proyecto ya que por cuestiones económicas y para no aumentar la

complejidad del proyecto, no era posible hacer cambios severos en hardware. Con la configuración actual del control resulta muy fácil medir el voltaje a la salida del banco de baterías haciendo uso del ADC del microcontrolador. De igual forma sucede con la medición del estado del tanque de combustible ya que se toma la salida del divisor de voltaje que se forma entre la resistencia variable del flotador y la resistencia establecida en el circuito del control.

Con estas mejoras tenemos un control mucho más eficiente ya que las mediciones son más precisas y el usuario puede conocer una estimación del estado de carga del banco de baterías y del tanque de combustible en tiempo real.

Por último cabe mencionar la importancia del bus CAN pues es el protocolo de comunicación serial más utilizado en la industria automotriz debido a su alta velocidad de transmisión de datos y a que es un protocolo estandarizado.

Bibliografía consultada

- **ALI Mazidim, Muhammad. Pic Microcontroller And Embedded Systems: Using Assembly and C for Pic18. Pearson Education, Limited. 2008.**
- **C. C. Chan, K. T. Chau. Modern Electric Vehicle Technology. Oxford University Press. 2001.**
- **CAL Y MAYOR, Rafael. Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones. Octava edición. Alfaomega. 2007.**
- **CONDE, Javier (coordinador). Economía, transporte y medio ambiente. Nivola Libros y Ediciones. 2003.**
- **EHSANI, Merhdad. Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, And Design. Taylor & Francis Group. 2005.**
- **FONT Mezquita, José. DOLS Ruiz, Juan F. Tratado sobre automóviles. Segunda edición. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de publicación. 2004.**
- **HUSAIN, Iqbal. Electric And Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition. CRC Press. 2011.**
- **LARRODÉ Pellicer, Emilio. Automóviles eléctricos. Editorial Reverte. 1997.**
- **LÓPEZ Llano, José. Circuitos Eléctricos Auxiliares GM 11 CF. Editorial Paraninfo. 2011.**
- **MILLER, John. Propulsion Systems For Hybrid Vehicles. IET. 2004.**
- **RIBBENS, William. Electrónica automotriz. Limusa. 2007.**
- **SERRANO, Evaristo. Circuitos Eléctricos Auxiliares Del Vehículo. Editex. 2006.**
- **VALDÉS Pérez, Fernando E. Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC. Marcombo. 2007.**

Índice de figuras

- Figura 1.1. Aportación de bióxido de carbono por los diferentes sectores en el Distrito Federal.
- Figura 1.2. Sensibilidad del punto de equilibrio ante descuentos en la tarifa eléctrica.
- Figura 2.1. Primer vehículo con motor de vapor de agua. (Carromato de Joseph Cugnot).
- Figura 2.2. Primer vehículo Daimler-Benz de gasolina.
- Figura 2.3. Esquema general de un motor de combustión interna.
- Figura 2.4. Esquema general del sistema de transmisión.
- Figura 2.5. Esquema del sistema de suspensión de un automóvil.
- Figura 2.6. Configuración básica del sistema de frenos ABS.
- Figura 2.7. Sistema de la dirección de un automóvil.
- Figura 3.1. Máquina de rotor bobinado.
- Figura 3.2. Máquina jaula de ardilla.
- Figura 3.3. Modulación de ancho de pulso.
- Figura 3.4. Circuito inversor común cuando se utiliza un motor asíncrono trifásico para la tracción eléctrica
- Figura 3.5. Esquema de un vehículo híbrido serie.
- Figura 3.6. Esquema de un vehículo híbrido paralelo.
- Figura 4.1. Señal analógica
- Figura 4.2. Muestreo de una señal continua.
- Figura 4.3. Diagrama de bloques que ejemplifica la operación de un controlador de ciclo abierto básico.
- Figura 4.4. Diagrama de bloques que ejemplifica la operación de un controlador de ciclo cerrado básico.
- Figura 4.5. Configuración básica general de una microcomputadora, la CPU es el microprocesador.
- Figura 4.6. Diagrama de bloques de un microcontrolador.
- Figura 4.7. Esquema básico de un perro guardián.
- Figura 4.8. Diagrama de bloques de la arquitectura von Neumann.
- Figura 4.9. Diagrama de bloques de la arquitectura Harvard.
- Figura 4.10. Esquema básico de una terminal E/S.
- Figura 4.11. Esquema general de los temporizadores.
- Figura 4.12. Secuencia desde que una variable física entra al ADC hasta que es transformada en una señal digital.
- Figura 4.13. Característica de la conversión para un ADC con $N=3$.
- Figura 4.14. Niveles del modelo OSI.
- Figura 4.15. Niveles eléctricos para baja velocidad.
- Figura 4.16. Niveles eléctricos para alta velocidad.
- Figura 4.17. Cambios de nivel lógico en la codificación NRZ.
- Figura 4.18. Implementación del Stuffing bit.
- Figura 4.19. Segmentos que conforman un bit en el bus CAN.
- Figura 5.1. Moto-generator.
- Figura 5.2. Batería de ácido-plomo.
- Figura 5.3. Configuración de pines del PIC18f2580.
- Figura 5.4. Configuración del transceptor MCP2551.
- Figura 5.5. Conexión del transceptor.
- Figura 5.6. Circuito de la fuente de alimentación.

Figura 5.7. Circuito empleado para la referencia de voltaje para el módulo de convertidor analógico digital.

Figura 5.8. Circuito de programación ICSP.

Figura 5.9. Configuración general de un divisor de voltaje.

Figura 5.10. Circuito para la medición del voltaje del banco de baterías.

Figura 5.11. Flotador y bomba de gasolina.

Figura 5.12. Circuito que mide el nivel de gasolina.

Figura 5.13. Diagrama del sensor de temperatura.

Figura 5.14. Circuito de la chispa y contador de RPM.

Figura 5.15. Diagrama de la activación de los elementos para el encendido del motor.

Figura 5.16. Diagrama del circuito completo del control.

Figura 5.17. Diagrama del circuito completo del control (Continuación).

Figura 5.18. Display que muestra el estado del vehículo al usuario.

Figura 5.19. Diagrama de flujo del programa completo.

Figura 5.20. Diagrama de flujo de la rutina Monitorea M-G.

Figura 5.21. Diagrama de flujo del encendido del moto-generator.

Figura 5.22. Diagrama de flujo de falla del moto-generator.

Figura 5.23. Display que muestra el estado de carga del banco de baterías.

Figura 5.24. Diagrama de flujo de la rutina de medición de voltaje.

Figura 5.25. Display que muestra el nivel de gasolina en el tanque.

Figura 5.26. Diagrama de flujo de la rutina de medición de gasolina.

Índice de tablas

Tabla 3.1. Principales características de los diferentes tipos de motores respecto a su uso en vehículos eléctricos.

Tabla 3.2. Criterios a considerar para elegir una batería para un vehículo eléctrico.

Tabla 3.3. Propiedades de las baterías empleadas actualmente en vehículos eléctricos y vehículos híbridos eléctricos

Tabla 4.1. Características de los temporizadores.

Tabla 5.1. Especificaciones eléctricas del moto-generator.

Tabla 5.2. Valores teóricos para cada nivel de voltaje.

Tabla 5.3. Valores teóricos para cada nivel de voltaje considerando solo la parte baja de la conversión analógica digital.

Tabla 5.4. Valores teóricos para cada nivel de gasolina en el tanque.