



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO

Juan José Garzona Alvarez

Asesorado por el Ing. Harley William Jerónimo Morales

Guatemala, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y
TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN JOSÉ GARZONA ALVAREZ

ASESORADO POR EL ING. HARLEY WILLIAM JERÓNIMO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Juan Carlos Molina Jiménez |
| VOCAL V | Br. Mario Maldonado Muralles |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

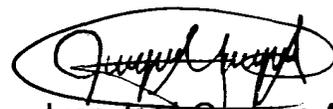
| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz |
| EXAMINADOR | Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga |
| EXAMINADOR | Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 9 de abril de 2010.



Juan José Garzón Álvarez.

Guatemala, 5 de abril de 2011

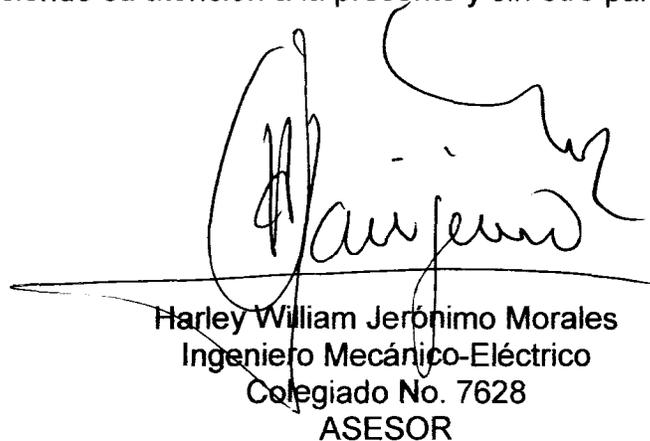
Ingeniero
Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted para someter a su consideración el Trabajo de Graduación del estudiante: JUAN JOSÉ GARZONA ALVAREZ, previo a obtener el título de Ingeniero Mecánico.

El trabajo en referencia se titula "PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO", el cual he asesorado y revisado; considerando que llena satisfactoriamente con los requisitos, recomiendo su aprobación.

Agradeciendo su atención a la presente y sin otro particular me suscribo,



Harley William Jerónimo Morales
Ingeniero Mecánico-Eléctrico
Colegiado No. 7628
ASESOR

Harley William Jerónimo Morales
Ingeniero Mecánico-Eléctrico
Colegiado No. 7628

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **Principios básicos de generación, almacenamiento y transmisión de energía en un automóvil híbrido**, del estudiante Juan José Garzona Alvarez, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área

Guatemala, abril de 2011.

/behdei.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado **PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO**, del estudiante **Juan José Garzona Alvarez**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, junio de 2011

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PRINCIPIOS BÁSICOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA EN UN AUTOMÓVIL HÍBRIDO**, presentado por el estudiante universitario Juan José Garzona Alvarez, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 14 de junio de 2011.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por mis triunfos, por ser mi fortaleza e inspiración en cada reto, por enseñarme que todo tiene su tiempo.
- Mi madre** Emixa Alvarez Santos, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, su motivación para hacer de mí una persona de bien.
- Mi padre** Juan José Garzona Guzmán, por sus enseñanzas, su apoyo, comprensión, y paciencia.
- Mi esposa** Nancy Toledo Eguizabal, por su amor sincero, la comprensión, apoyo y el ánimo que me brinda día a día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.
- Mi hija** Nancy Pamela, que me ha enseñado a ver la vida con otros ojos, a disfrutarla y valorarla.
- Mis hermanas** Magdy Evelyn y Andrea Maricruz, porque siempre he contado con ellas para todo, por la confianza que nos tenemos, por el apoyo y la amistad.
- Mis abuelos** Porque han sido ejemplo de dedicación, constancia, honestidad, perseverancia, pero sobre todo, de humildad y amor al prójimo.

Mi familia

Tíos, primos, sobrinos por su apoyo incondicional, este triunfo es gracias a cada uno de ustedes.

Mis amigos

Por el apoyo que siempre estuvieron dispuestos a darme y porque nuestra amistad es más fuerte cada día.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Amparo y fortaleza cuando más lo necesitamos, por darme la oportunidad de vivir y de rodearme de personas maravillosas en mi paso por el mundo.
- Mi madre** Emixa, que en su corazón guarda los sacrificios que realizó para que este triunfo fuera posible, este logro le pertenece, la quiero mucho.
- Mi padre** Juan José, por sus enseñanzas y consejos.
- Mi esposa** Nancy, por cambiar mi vida desde el momento que nos conocimos, por estar siempre a mi lado, por su apoyo y comprensión, te amo.
- Mi hija** Nancy Pamela, por enseñarme que las cosas más valiosas de la vida no se compran con dinero, que un abrazo lo cura todo y una sonrisa te cambia la vida.
- Mis hermanas** Magdy y Andreita, por su confianza, apoyo y sacrificios, las quiero.
- Mis abuelos** Jorge, Magdy y Andreita, que desde el cielo comparten mi alegría, y que junto a mi abuelito Juanito, me dieron su ejemplo de entereza, lucha y humildad.

| | |
|-------------------------------------|---|
| Mis suegros | Israel y Blanqui, por todo su apoyo y cariño. |
| Mis tíos, primos y sobrinos | Por su cariño y apoyo a lo largo de los años. |
| Las familias | Méndez Saravia, Solórzano Alvarez, Grave Pérez, González Ríos, Alvarez Berreondo, y a Marian y Mario Guzmán, por su importante apoyo durante mis años de estudio. |
| Mis amigos | Por todo su apoyo desinteresado, pero en especial a Carlos Méndez, Vinicio Solórzano, Antonio y Carlos González, Miguel Hernández Tavico, Miguel Reynoso, Hernán Figueroa, Nelson Pérez, los hermanos Edgar, César y Héctor Zapeta, Otto de León, Edgar Salguero, Luis Porres, Alex Herrera y Alfredo Alfaro por los momentos compartidos en la U, por abrirme las puertas de sus hogares, siempre los considero parte fundamental de este logro. |
| Mi asesor | Ing. Harley Jerónimo, por su disposición a ayudarme, que esto sea el inicio de una amistad. |
| Personal del INTECAP, Sololá | Lic. Mario Guzmán, Lic. Edwin Linares, Sra. Lucía Zuñiga, Sr. Ranulfo García, Sr. Edgar López, Sr. Mario de León, Sr. Noé Cujcuy, Sr. Leonel Cacacho, Sr. Leonardo Racancoj y Sr. Sergio Acuña por compartir, más que sus conocimientos, su amistad. |

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

En especial a la Facultad de Ingeniería por darme una formación profesional, pero sobretodo una formación de vida.

Y a mi Quiché

Lugar que me dio la oportunidad de crecer rodeado de personas maravillosas que forjaron mi carácter.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. IMPACTO AMBIENTAL PRODUCIDO POR EL TRANSPORTE MODERNO | 1 |
| 1.1 Contaminación del Aire | 2 |
| 1.1.1 Óxido nitroso | 3 |
| 1.1.2 Monóxido de carbono | 3 |
| 1.1.3 Hidrocarburo sin quemar | 4 |
| 1.1.4 Otros contaminantes | 5 |
| 1.2 Calentamiento global | 6 |
| 1.3 Recursos del petróleo | 11 |
| 1.4 Costos inducidos | 12 |
| | |
| 2. VEHÍCULO HÍBRIDO | 15 |
| 2.1 Historia de los vehículos híbridos | 16 |
| 2.2 Definición de un vehículo híbrido | 30 |
| 2.3 Clasificación y transmisión de fuerza | 31 |
| 2.3.1 Sistema híbrido en serie | 36 |
| 2.3.2 Sistema híbrido en paralelo | 41 |
| 2.3.3 Sistema híbrido serie/paralelo | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3. | TECNOLOGÍA EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA | 55 |
| 3.1 | Descripción de los motores de combustión interna convencionales | 55 |
| 3.1.1 | Motor a gasolina de 4 tiempos | 55 |
| 3.1.2 | Motor a compresión de 4 tiempos | 57 |
| 3.1.3 | Motor de 2 tiempos | 58 |
| 3.1.4 | Motor rotativo Wankel | 60 |
| 3.1.5 | Motor Stirling | 62 |
| 3.1.6 | Motor de turbina de gas | 64 |
| 3.2 | Tecnologías para aumentar la eficiencia | 67 |
| 3.2.1 | Parar y poner en marcha el motor | 68 |
| 3.2.2 | Recuperación de la energía térmica desechada por el escape y el radiador | 69 |
| 3.2.3 | Recuperación de la energía térmica desechada por partes electrónicas | 71 |
| 3.2.4 | Control variable de apertura de válvulas | 71 |
| 3.2.5 | Inyección directa estratificada | 73 |
| 3.2.6 | Inyección dual | 76 |
| 3.3 | Nuevos diseños | 77 |
| 3.3.1 | Cierre de todas las válvulas | 77 |
| 3.3.2 | Desactivación de cilindros | 79 |
| 3.3.3 | Motor de ciclo Atkinson | 83 |
| 3.3.4 | Motor de ciclo Miller | 86 |
| 3.3.5 | Ciclo Stirling | 87 |
| 3.3.6 | Motor Alvar | 88 |
| 3.3.7 | Cigüeñal de compensación | 89 |
| 3.3.8 | Motor de pistones libres | 91 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4. | SISTEMAS DE CONTROL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA | 93 |
| 4.1 | Historia del sistema de control automotriz | 93 |
| 4.2 | Ejemplo de control de los años 1980 | 94 |
| 4.3 | Función del sistema de control | 96 |
| 4.4 | Beneficios adicionales del sistema de control | 97 |
| 4.5 | Descripción de la Unidad de Control Electrónico (ECU) | 98 |
| 4.5.1 | ECU del sistema híbrido | 99 |
| 4.5.2 | ECU del motor | 100 |
| 4.5.3 | ECU del motor/generador | 100 |
| 4.5.4 | ECU de partes electrónicas | 100 |
| 4.5.5 | ECU de la batería o sistema de administración de batería | 100 |
| 4.5.6 | ECU de aire acondicionado | 103 |
| 4.6 | Red de área de control (CAN) | 104 |
| 4.7 | Variables de control | 106 |
| 4.8 | Administración de motor | 108 |
| 4.9 | Recirculación de gases de escape | 109 |
| 4.10 | Mapa de eficiencia del motor | 113 |
| 4.11 | Nivelación de carga | 115 |
| 4.12 | Control de complejidad y dificultad | 115 |
| 4.13 | Estrategia de control adaptable | 116 |
| 4.14 | Control de red neural NN para vehículos híbridos | 116 |
| 5. | SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA | 121 |
| 5.1 | Motor de corriente directa | 121 |
| 5.2 | Motor de inducción | 125 |
| 5.3 | Motor de imán permanente | 127 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 6. | ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA | 131 |
| 6.1 | Baterías electroquímicas | 132 |
| 6.1.1 | Reacción electroquímica | 136 |
| 6.1.2 | Voltaje termodinámico | 137 |
| 6.1.3 | Energía específica | 138 |
| 6.1.4 | Potencia específica | 138 |
| 6.1.5 | Eficiencia energética | 139 |
| 6.2 | Tecnologías de baterías | 139 |
| 6.2.1 | Baterías de ácido de plomo | 139 |
| 6.2.2 | Baterías a base de níquel | 141 |
| 6.2.2.1 | Sistema níquel hierro | 142 |
| 6.2.2.2 | Sistema níquel cadmio | 142 |
| 6.2.2.3 | Batería níquel e hidruro metálico (Ni-MH) | 144 |
| 6.2.3 | Baterías a base de litio | 145 |
| 6.2.3.1 | Batería de polímero de litio (Li-P) | 146 |
| 6.2.3.2 | Batería de ion de litio (Li-Ion) | 146 |
| 6.3 | Supercapacitores | 148 |
| 6.3.1 | Características de los supercapacitores | 149 |
| 6.3.2 | Principios básicos de los supercapacitores | 150 |
| 7. | FUNDAMENTOS DEL FRENADO REGENERATIVO | 153 |
| 7.1 | Consumo de energía en el frenado | 154 |
| 7.2 | Función del frenado regenerativo | 154 |
| 7.3 | Sistema de frenos en vehículos eléctricos e híbridos | 155 |
| 7.3.1 | Frenos en serie | 156 |
| 7.3.2 | Frenos en paralelo | 159 |
| 7.4 | Sistema de frenos antibloqueo | 160 |

| | |
|-----------------|-----|
| CONCLUSIONES | 163 |
| RECOMENDACIONES | 165 |
| BIBLIOGRAFÍA | 167 |
| ANEXO | 169 |

ÍNDICE DE ILUTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Efecto invernadero y calentamiento global | 8 |
| 2. | Reservas de petróleo crudo | 12 |
| 3. | Autobús La Cuadra | 18 |
| 4. | Híbrido Lohner-Porsche | 19 |
| 5. | Híbrido Voiturette | 20 |
| 6. | Híbrido Woods Interurban | 21 |
| 7. | Híbridos de 1969 | 23 |
| 8. | Prototipo híbrido sobre un Buick Skylar | 24 |
| 9. | Toyota GT Hybrid Concept | 25 |
| 10. | Toyota Prius y Honda Insight | 27 |
| 11. | Ford Escape Hybrid | 28 |
| 12. | Chevrolet Volt y Opel Ampera | 29 |
| 13. | Gráfica general del funcionamiento de un vehículo híbrido | 34 |
| 14. | Híbrido en serie, reposo | 39 |
| 15. | Híbrido en serie, conducción lenta | 39 |
| 16. | Híbrido en serie, aceleración | 40 |
| 17. | Híbrido en serie, velocidad de cruceo | 40 |
| 18. | Híbrido en serie, frenada regenerativa | 41 |
| 19. | Híbrido en paralelo, reposo | 43 |
| 20. | Híbrido en paralelo, puesta en marcha | 44 |
| 21. | Híbrido en paralelo, aceleración | 44 |
| 22. | Híbrido en paralelo, velocidad de cruceo | 45 |
| 23. | Híbrido en paralelo, frenada regenerativa | 45 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 24. | Transmisión de un híbrido serie/paralelo | 47 |
| 25. | Esquema del engranaje planetario | 48 |
| 26. | Esquema unidad repartidora de potencia | 50 |
| 27. | Híbrido serie/paralelo, reposo | 51 |
| 28. | Híbrido serie/paralelo, baja velocidad | 51 |
| 29. | Híbrido serie/paralelo, aceleración | 52 |
| 30. | Híbrido serie/paralelo, velocidad de cruceo | 52 |
| 31. | Híbrido serie/paralelo, frenada regenerativa | 53 |
| 32. | Cuatro tiempos, motor a gasolina | 56 |
| 33. | Motor de dos tiempos | 59 |
| 34. | Motor Wankel | 61 |
| 35. | Funcionamiento del motor Wankel | 61 |
| 36. | Esquema del motor Stirling | 64 |
| 37. | Motor de turbina de gas con intercambiador de calor | 67 |
| 38. | Esquema del Turbo-Steamer en un vehículo híbrido | 70 |
| 39. | Clasificación de sistemas de distribución variable | 73 |
| 40. | Inyección directa estratificada | 75 |
| 41. | Inyección dual | 76 |
| 42. | Cierre de todas las válvulas | 78 |
| 43. | Desactivación de cilindros | 82 |
| 44. | Esquema del motor MCE-5 VCRi | 83 |
| 45. | Esquema de motor Alvar | 89 |
| 46. | Cigüeñal desplazado | 90 |
| 47. | Motor de pistones libres | 92 |
| 48. | Administración del motor | 108 |
| 49. | Recirculación de gases de escape | 113 |
| 50. | Mapa de eficiencia del motor | 114 |
| 51. | Nivelación de carga | 115 |
| 52. | Motor de corriente directa | 122 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 53. | Sección transversal de un motor de inducción | 127 |
| 54. | Esquema del motor de imán permanente sin escobillas | 129 |
| 55. | Partes de una batería plomo/ácido | 134 |
| 56. | Principio de funcionamiento del ultracapacitor | 150 |
| 57. | Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en serie con sensación óptima | 157 |
| 58. | Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en serie con recuperación de energía | 158 |
| 59. | Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en paralelo | 159 |
| 60. | Esquema de freno regenerativo, funcionando como ABS | 160 |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------------|---|
| Actuador | Cualquier dispositivo de salida controlado por la computadora del automóvil, tal como un inyector de combustible. |
| Celda de combustible | Dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero con la diferencia que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos, es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento que posee una batería. |
| Cilindrada | Suma de los volúmenes unitarios de cada cilindro de un motor, se suele indicar en centímetros cúbicos o litros. Se obtiene de multiplicar la superficie de un cilindro por la carrera del pistón y por el número de cilindros. |
| Conmutador | Dispositivo eléctrico o electrónico que permite modificar el camino que deben seguir los electrones. |
| <i>Clean Air Act</i> | Ley Federal de los Estados Unidos diseñada para asegurar que todo ciudadano Americano tenga aire puro para respirar. |

| | |
|------------------------------|---|
| Freno de motor | Consiste en utilizar el par resistente del motor para reducir la velocidad del vehículo. |
| Imán de tierras raras | Se componen de mezclas de óxidos e hidróxidos de los elementos del bloque “f” de la tabla periódica de los elementos, y van del lantano al lutecio, además de escandio e itrio. |
| Par Motor | Es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. |
| Potencia al freno | Es la medida de potencia del motor sin las pérdidas provocadas por la caja de cambios, el generador, el diferencial, la bomba de agua y otros componentes auxiliares como el alternador, la bomba de dirección hidráulica, entre otros. Se puede medir mediante el uso del freno de Pony, y más recientemente se utiliza el dinamómetro para motores. |

RESUMEN

En la actualidad se ve con preocupación la situación ambiental del planeta. Los cambios climáticos y el calentamiento global son causados por la excesiva producción de gases contaminantes, que provienen en gran parte de los automóviles y del uso de combustibles derivados del petróleo.

En los últimos años, en varios países, se han implementado tecnologías alternativas que ayudan a mejorar las condiciones ambientales. Entre ellas se encuentran los vehículos híbridos.

Un vehículo híbrido es un vehículo alternativo que para propulsarse utiliza dos o más fuentes de energía, siendo las más comunes un motor térmico y un motor eléctrico. Este tipo de vehículo logra ser más eficiente que uno convencional debido a que alterna el uso del motor térmico y el motor eléctrico dependiendo de las condiciones del tránsito.

Utilizan una batería de gran capacidad donde se almacena la energía que utilizará el motor eléctrico. A diferencia de los vehículos completamente eléctricos, que requieren conectarse a la red eléctrica para recargar la batería, un híbrido utiliza el motor eléctrico como un generador, impulsado por el motor térmico, para recargar la batería sin tener la necesidad de detener el vehículo.

Los vehículos híbridos incluyen un sistema conocido como freno regenerativo. Cuando se desea detener el vehículo o disminuir su velocidad, se utiliza al motor eléctrico para que este oponga una resistencia al movimiento del vehículo, similar a como actúa el freno de motor en un vehículo convencional.

De esta forma el motor eléctrico funciona como un generador para recargar la batería, convirtiendo en energía eléctrica parte de la energía cinética del vehículo que de otro modo se perdería en forma de calor.

Pero el éxito de un vehículo híbrido está en la correcta administración de los sistemas que lo conforman. Un complejo sistema de control computarizado se encarga de mantener en perfecto equilibrio la relación existente entre los distintos sistemas del vehículo, administrando la energía, realizando los ajustes necesarios para minimizar el consumo de combustible y reducir la producción de gases contaminantes.

OBJETIVOS

General

Dar a conocer la definición de automóvil híbrido, su clasificación y la forma en que se genera, transmite y almacena la energía.

Específicos

1. Dar a conocer al lector la definición de automóvil híbrido.
2. Clasificar los automóviles híbridos, según su funcionamiento.
3. Determinar los métodos de generación, transmisión y almacenamiento de energía.

INTRODUCCIÓN

Existen algunos estándares que se utilizan para definir un automóvil como aceptable.

Debe ser capaz de moverse a una velocidad que le permita seguir el ritmo del tránsito a velocidades de autopista, y a la vez tener un rango de autonomía de al menos varios cientos de kilómetros sin recargar combustible, o en el caso de los automóviles eléctricos, sin recargar la batería.

Los automóviles alimentados con gasolina no tienen problemas para cumplir con los requerimientos mínimos de velocidad y distancia, pero generan problemas ambientales y de costos, debido a su dependencia a los combustibles a base de petróleo para su propulsión.

En la búsqueda de alternativas para los vehículos con motor a gasolina, la electricidad fue considerada como una opción. Varios modelos de vehículos de propulsión eléctrica fueron desarrollados, pero no pudieron superar el problema de la falta de autonomía. Las baterías eléctricas tienen una capacidad limitada de almacenamiento y necesitan ser recargadas con regularidad. Este proceso consume una gran cantidad de tiempo y hace que los viajes largos en vehículos eléctricos sean imposibles o tomen demasiado tiempo.

El vehículo híbrido es una fusión entre los dos tipos anteriormente mencionados. Consta de un motor eléctrico y un motor a gasolina con la capacidad para propulsar el vehículo, ya sea de forma independiente o en conjunto.

En la mayoría de casos el motor eléctrico funciona como un generador eléctrico, que al ser impulsado por el motor a gasolina, mantiene recargada la batería.

Los automóviles híbridos utilizan innovaciones tecnológicas, como el freno regenerativo, que utiliza al motor eléctrico para reducir la velocidad del vehículo, transformando la energía cinética en energía eléctrica que sirve para recargar la batería. En gran medida, la investigación actual está dirigida a desarrollar una estrategia de control más efectiva y realizar una elección correcta de los subsistemas para minimizar componentes, peso y costos de fabricación.

El capítulo uno da una idea de cómo el transporte moderno afecta directamente al medio ambiente, debido al uso que hace de combustibles derivados del petróleo.

El capítulo dos muestra la evolución que han experimentado los vehículos híbridos a lo largo de la historia, cómo son clasificados en la actualidad y sus características más importantes.

El capítulo tres presenta las distintas opciones que se consideran en la actualidad en cuanto al tipo de motor térmico que se puede utilizar en un vehículo híbrido, además de las mejoras tecnológicas que se han desarrollado para hacer más eficiente el motor, tanto en consumo de combustible como en emisiones contaminantes.

Un sistema de control es esencial para controlar y equilibrar el flujo de energía en todo el vehículo.

El capítulo cuatro presenta la evolución de los sistemas de control y su tendencia para un futuro próximo.

En el capítulo cinco se tratan los tipos y principios de funcionamiento de motores eléctricos que se tienen en cuenta como una opción, en los vehículos híbridos.

Una parte importante de los vehículos híbridos es la forma como almacenan la energía eléctrica, la principal opción es la batería.

En el capítulo seis se tratan los distintos tipos de batería que existen y que se perfeccionan para hacerlas más eficientes, aunque existen investigaciones sobre la posibilidad de usar ultracapacitores.

Finalmente, en el capítulo siete se presenta el modo de funcionamiento de una de las partes más importantes en cuanto a recuperación de energía se refiere, el freno regenerativo, característica única en los vehículos híbridos.

1. IMPACTO AMBIENTAL PRODUCIDO POR EL TRANSPORTE MODERNO

El desarrollo de vehículos de motor de combustión interna, en especial automóviles, es uno de los mayores logros de la tecnología moderna. Los automóviles han hecho grandes contribuciones al crecimiento de la sociedad al satisfacer muchas de sus necesidades de movilidad en la vida cotidiana.

El rápido desarrollo de la industria automotriz, a diferencia de la de cualquier otra industria, ha impulsado el progreso de la sociedad humana de primitiva a una sociedad industrial altamente desarrollada.

La industria del automóvil y otras industrias a su servicio constituyen la columna vertebral de la economía mundial porque emplean a la mayor parte de la población activa.

Sin embargo, el gran número de automóviles en uso en todo el mundo es la causa de graves problemas para el medio ambiente y la vida humana. La contaminación del aire, el calentamiento global, y el rápido agotamiento de los recursos petroleros de la Tierra son ahora problemas de interés primordial.

En la década presente, la investigación y el desarrollo de actividades relacionadas con el transporte han hecho hincapié en la necesidad de producir transporte de alta eficiencia, limpio y seguro.

Los vehículos eléctricos, eléctricos híbridos y vehículos de celdas de combustible han sido propuestos para sustituir a los vehículos convencionales en el futuro próximo.

1.1 Contaminación del aire

Los vehículos dependen de la combustión de hidrocarburos para obtener la energía necesaria para su propulsión.

La combustión es una reacción entre el combustible y el aire, que libera calor y desechos. El calor es convertido en potencia mecánica por un motor de combustión y los desechos son liberados a la atmósfera.

Un hidrocarburo es un compuesto químico con moléculas provenientes de átomos de carbono e hidrógeno.

Idealmente, la combustión de un hidrocarburo cede solamente dióxido de carbono y agua, lo cual no daña el ambiente. Es más, las plantas prácticamente digieren el dióxido de carbono mediante la fotosíntesis. El dióxido de carbono es un ingrediente necesario en la vida vegetal. Los animales no sufren por la inhalación de dióxido de carbono a menos que su concentración en el aire sea tal que el oxígeno sea casi inexistente.

Actualmente, la combustión de hidrocarburos en motores de combustión no es la ideal. Además de dióxido de carbono y agua, los productos de combustión contienen una cierta cantidad de óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos que no se quemaron (HC), todos los cuales son tóxicos para la salud humana.

1.1.1 Óxido nítrico

El óxido de nitrógeno (NO_x), resulta de la reacción entre el nitrógeno en el aire y el oxígeno. En teoría, el óxido de nitrógeno es un gas inerte. Sin embargo, las altas temperaturas y presiones en los motores crean condiciones favorables para la formación de óxido de nitrógeno. La temperatura es por mucho el parámetro más importante en la formación de óxidos de nitrógeno. El óxido de nitrógeno más común es el óxido nítrico (NO), le sigue el dióxido de nitrógeno (NO_2) y por último, el óxido nítrico (N_2O).

Una vez liberado en la atmósfera, el NO reacciona con el oxígeno para formar NO_2 , luego es descompuesto por la radiación ultravioleta volviéndolo NO y liberando átomos de oxígeno altamente reactivos que atacan las membranas de las células vivas. El dióxido de nitrógeno es en parte responsable del smog; su color marrón hace al humo visible. También reacciona con el agua de la atmósfera para formar ácido nítrico (HNO_3), que se diluye en lluvia. Este fenómeno se conoce como "lluvia ácida" y es responsable de la destrucción de los bosques en los países industrializados.

1.1.2 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono resulta de la combustión incompleta de hidrocarburos debido a la falta de oxígeno. Es un veneno para los seres humanos y animales que lo respiran. Una vez que el monóxido de carbono llega a las células sanguíneas, se fija a la hemoglobina en lugar del oxígeno, disminuyendo así la cantidad de oxígeno que llega a los órganos y provocando la reducción de las capacidades físicas y mentales de los seres vivos afectados.

El mareo es el primer síntoma de envenenamiento por monóxido de carbono, que puede conducir rápidamente a la muerte. El monóxido de carbono se une más firmemente a la hemoglobina que el oxígeno, tanto que las funciones normales de los órganos del cuerpo no los pueden separar.

Las personas intoxicadas por monóxido de carbono deben ser tratadas en centros hospitalarios, utilizando las cámaras de presión, donde la presión interior permite que el monóxido de carbono se separe de la hemoglobina.

1.1.3 Hidrocarburo sin quemar

Los hidrocarburos no quemados son el resultado de una combustión incompleta de hidrocarburos. Dependiendo de su naturaleza, los hidrocarburos no quemados pueden ser perjudiciales para los seres vivos. Los hidrocarburos no quemados son también responsables de la contaminación, las radiaciones ultravioleta del sol interactúan con los hidrocarburos no quemados y el NO en la atmósfera para formar ozono y otros productos.

El ozono es una molécula formada por tres átomos de oxígeno, es incoloro, pero muy peligroso, y venenoso, ya que ataca las membranas de las células vivas, lo que causa que envejezcan prematuramente o que mueran. Los niños pequeños, personas mayores y las personas con asma sufren en gran medida por la exposición a altas concentraciones de ozono.

1.1.4 Otros contaminantes

Las impurezas en los combustibles dan como resultado la emisión de otros contaminantes, el mayor de éstos es el azufre, se encuentra principalmente en el diesel y el combustible para aviones y también en la gasolina y del gas natural. La combustión de azufre (o compuestos de azufre como el sulfuro de hidrógeno) con oxígeno libera óxidos de azufre (SO_x).

El dióxido de azufre (SO_2), es el principal producto de esta combustión, en contacto con el aire forma el trióxido de azufre, que luego reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico, un componente importante de la lluvia ácida. Cabe señalar que si bien el dióxido de azufre procede de fuentes de transporte, en gran medida proviene de la combustión de carbón en las centrales eléctricas y fábricas de acero. Además, hay un debate sobre la contribución exacta de las fuentes naturales como los volcanes.

Las compañías petroleras añaden compuestos químicos a sus productos con el fin de mejorar el rendimiento y la vida útil de los motores. El tetraetilo de plomo, a menudo denominado simplemente como "plomo", es utilizado para mejorar la resistencia a la detonación de la gasolina y por lo tanto permitir un mejor rendimiento del motor.

Sin embargo, la combustión de este producto químico libera metales de plomo, los cuales son responsables de una enfermedad neurológica llamada "saturnismo". Su uso está prohibido en los países más desarrollados y ha sido sustituido por otros productos químicos.

1.2 Calentamiento global

El efecto invernadero es un efecto natural y útil, durante muchos años ha permitido que la tierra no se congele y mantenga una temperatura promedio ideal para el desarrollo de la vida.

Proceso del efecto invernadero:

- La luz del sol atraviesa la atmósfera, llega a la superficie terrestre y acuática, la utilizan las plantas y una parte se convierte en calor;
- La corteza terrestre refleja ese calor hacia la atmósfera;
- Parte de ese calor se refleja nuevamente hacia la corteza terrestre por los gases de efecto invernadero que están condensados en la atmósfera, la otra parte de ese calor regresa al espacio.

El calentamiento global es consecuencia del efecto invernadero incrementado por la presencia de dióxido de carbono y otros gases, como el metano, en la atmósfera. La actividad humana ha influido produciendo mayor cantidad de gas provocando que el efecto invernadero aumente considerablemente y provoque un incremento acelerado en las temperaturas de la atmósfera. Estos gases atrapan la radiación infrarroja del sol reflejada por el suelo, conservando así la energía en la atmósfera y aumentando la temperatura.

Un incremento en la temperatura de la tierra causa graves daños a los ecosistemas y muchos de los desastres naturales que afectan a la población mundial. Entre los daños ecológicos inducidos por el calentamiento global, podemos mencionar la desaparición de algunas especies lo que constituye una preocupación, ya que desestabiliza los recursos naturales que utilizan algunas poblaciones.

Ciertos fenómenos, como la disminución de los glaciares, la elevación del nivel de los mares y los cambios meteorológicos se han considerado consecuencias del calentamiento global que pueden influir en las actividades humanas y en los ecosistemas. Algunas especies pueden ser forzadas a emigrar de sus hábitats para evitar su extinción debido a las condiciones cambiantes, mientras otras especies pueden ampliar su territorio.

Proceso del calentamiento global:

- La luz del sol atraviesa la atmósfera, llega a la superficie terrestre y acuática, la utilizan las plantas y una parte se convierte en calor;
- La corteza terrestre refleja ese calor;
- La quema de combustibles, la deforestación, la ganadería, y otras actividades incrementan la cantidad de gases de efecto invernadero;
- La atmósfera así modificada, retiene más calor. Así se daña el equilibrio natural y aumenta la temperatura de la Tierra.

- El ganado vacuno, las zonas pantanosas y húmedas producen metano;
- Los vegetales que se pudren producen óxido de nitrógeno.

B. El efecto invernadero es alterado por las actividades humanas por:

- La deforestación
- La industrialización
- El combustible quemado por los automóviles y las plantas generadoras de energía eléctrica producen dióxido de carbono en gran cantidad.
- Las sustancias químicas producidas por fertilizantes y aerosoles perjudican el ambiente y producen óxido de nitrógeno.
- La basura mal manejada produce metano y otros gases
- Los incendios forestales producen dióxido de carbono

C. ¿Cómo afecta el calentamiento global a Guatemala?

- Las sequías que se han dado en lugares de Chiquimula como Jocotán, Camotán y Olopa provocan hambruna, como sucedió en los años 2001 y 2007;
- Las tormentas tropicales como Mitch (1998) y Stan (2001) causan inundaciones en el país y por lo tanto la destrucción de área de cultivo;
- Es posible que en lugares como Zacapa, Chiquimula, Quiché y otros de la costa sur incrementen las zonas de sequía, lo cual dificultaría los cultivos;
- Aumentan las lluvias y la intensidad de las tormentas;
- Los habitantes deben invertir en proteger a sus seres y sus viviendas;
- Surgen más problemas de salud, problemas de producción de granos básicos, de recursos hídricos y cobertura boscosa;
- Otra consecuencia a nivel mundial, es el deshielo de la Antártida, que continúa acelerándose. Esto aumentará el nivel del mar y afectará a muchas poblaciones cercanas a éste.

1.3 Recursos del petróleo

La gran mayoría de los combustibles utilizados para el transporte son los combustibles líquidos procedentes del petróleo, este es un combustible fósil, como resultado de la descomposición de organismos marinos y, en menor medida, los de organismos terrestres arrastrados al mar por los ríos o los de plantas que crecen en los fondos marinos, que fueron aprisionados hace millones de años en capas geológicas estables, (período Ordovícico, desde hace 600 hasta hace 400 millones de años).

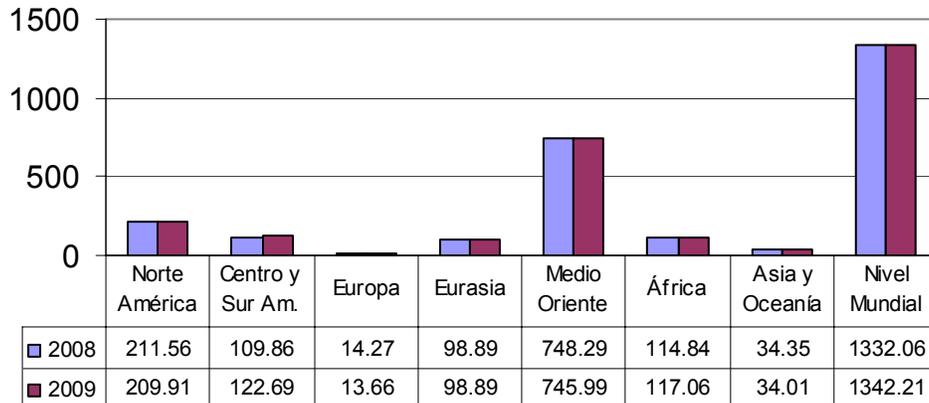
El proceso es el siguiente: la materia viva (en su mayoría plantas), mueren y son lentamente cubiertas por sedimentos. Con el tiempo, esta acumulación de sedimentos forma capas gruesas y transforman a la roca.

La materia viva se encuentra atrapada en un espacio cerrado, donde se encuentran altas presiones y temperaturas, y poco a poco se transforman en hidrocarburos o carbón, dependiendo de su naturaleza. Este proceso tomó millones de años para llevarse a cabo. Esto hace que los recursos de la Tierra, en cuanto a combustibles fósiles, sean finitos.

Si la extracción continúa al mismo ritmo que en el año 2002, salvo que se encontrasen nuevos yacimientos, las reservas mundiales durarían aproximadamente 42 años. Se calcula que quedan unas 143.000 millones de toneladas.

Figura 2. **Reservas de petróleo crudo**

Reservas comprobadas de petróleo
(en miles de millones de barriles)



Fuente: elaboración propia

1.4 Costos inducidos

Los problemas asociados con la frenética utilización de combustibles fósiles son muchos: la contaminación, el calentamiento global, y el previsible agotamiento de los recursos, entre otros.

Aunque es difícil de calcular los costos asociados con estos problemas, son enormes e indirectos, y pueden ser de manera financiera, humana, o ambos. Los costos derivados de la contaminación incluyen, gastos de salud, costo de la replantación de los bosques devastados por la lluvia ácida, y el costo de la limpieza y reparación de los monumentos corroídos por la lluvia ácida.

Los gastos en salud representan probablemente la mayor parte de estos costos, especialmente en los países desarrollados que tienen programas de medicina socializada o la salud de la población asegurada. Los costos asociados con el calentamiento global son difíciles de evaluar. Pueden incluir, además, el costo de los daños causados por los huracanes, la pérdida de cosechas debido a la sequedad, las propiedades dañadas por las inundaciones, y la ayuda internacional utilizada para aliviar a las poblaciones afectadas. La cantidad es potencialmente enorme.

La mayoría de los países productores de petróleo no son los más grandes países consumidores de petróleo. La mayor parte de la producción se encuentra en el Oriente Medio, mientras que la mayor parte del consumo se encuentra en Europa, Norteamérica y Asia-Pacífico.

Como resultado, los consumidores tienen que importar su petróleo y dependen de los países productores. Esta cuestión es particularmente sensible en el Oriente Medio, donde la inestabilidad política afectó la entrega de petróleo a los países occidentales en 1973 y 1977. La guerra del Golfo, la guerra Irán-Irak, y la vigilancia constante de la zona por los EE.UU. y las fuerzas aliadas tienen un costo que a la vez de humano, también es financiero.

La dependencia de las economías occidentales en un abastecimiento de petróleo fluctuante es potencialmente costosa. De hecho, la escasez en el suministro de petróleo provoca una grave desaceleración de la economía, resultando en daños a bienes percederos, la pérdida de oportunidades de negocios, y la eventual imposibilidad de funcionamiento de las empresas. En la búsqueda de una solución a los problemas asociados con el consumo de petróleo, hay que tener en cuenta los costes inducidos.

Las soluciones a estos problemas tendrán que ser económicamente sostenibles y comercialmente viables sin subvenciones del gobierno a fin de sostenerse a sí misma en el largo plazo. Sin embargo, queda claro que cualquier solución a estos problemas, incluso si es sólo una solución parcial, de hecho se traducirá en ahorros de costos y beneficiará a nuestro planeta.

2. VEHÍCULO HÍBRIDO

A pesar de que nos enfrentamos a retos como nunca antes, la respuesta positiva es que, existen soluciones a corto plazo como son el uso de combustibles alternativos, etanol, metanol, bio-diesel o gas licuado de petróleo (GLP), los cuales tienen propiedades inherentes que los hacen más limpios que la gasolina y que pueden funcionar en un motor convencional, realizándole, a este, algunas modificaciones en el sistema de alimentación de combustible, en dualidad con el combustible tradicional.

Se tienen soluciones a mediano plazo, como son los vehículos con sistemas de propulsión híbridos, que combinan un motor de combustión interna y un motor/generador eléctrico, por lo que logran bajar sus emisiones considerablemente, incluso pueden llegar a ser cero emisiones en los lapsos en los cuales funcionan de forma completamente eléctrica, además su consumo de combustible llega a ser bastante más bajo que el de un vehículo convencional, teniendo el mismo desempeño en cuanto a potencia, aceleración y velocidad se refiere.

Está en proceso de investigación y desarrollo, lo que la industria automotriz vislumbra como la solución definitiva: las celdas, células o pilas de combustible, que es un dispositivo que genera electricidad por una reacción química, utilizando al hidrógeno y al oxígeno como elementos principales.

El nombre de cada celda varía en relación al tipo de electrolito que use, la celda de combustible alcalina, usa una solución alcalina compuesta de hidróxido de potasio y agua, la celda de energía azul (*blue energy*), usa una membrana de polietileno y la celda de combustible de ácido fosfórico (*PAFC*, *phosphoric acid fuel cell*), por mencionar algunas.

2.1 Historia de los vehículos híbridos

Los vehículos híbridos son considerados como una tecnología de transición entre los autos actuales y los autos del futuro con celdas de combustible, desde finales de los años 90 hasta ahora solamente dos compañías fabricantes de vehículos se disputaban el mercado de híbridos, Honda con sus modelos Insight y Civic Hybrid y Toyota con su modelo Prius. Aunque en años recientes todas las compañías están desarrollándolos y pronto llevarán al mercado sus modelos híbridos.

Pero la idea de vehículo híbrido, mezclar un motor de combustión interna y un motor eléctrico, no es una maravilla concebida en el siglo XXI, de hecho es tan antigua como el automóvil mismo, y data de finales del siglo XIX.

Entre 1665 y 1680 el sacerdote jesuita y astrónomo Fernando Verbiest creó los planos para un auto en miniatura de cuatro ruedas no tripulado, impulsado por vapor, para el emperador chino Khan Hsi. En 1769, el francés Nicolas Cugnot construyó un vehículo de motor a vapor capaz de viajar a diez kilómetros por hora. En 1825 el inventor británico Goldsworthy Gurney construyó un vehículo de propulsión a vapor que completó con éxito un viaje de 137 kilómetros de ida y vuelta en un tiempo de diez horas. Los vehículos a vapor dominaron el panorama automovilístico hasta finales del siglo XIX.

En 1839 Robert Anderson, de Aberdeen, Escocia construyó el primer vehículo eléctrico, poco después Thomas Davenport y Robert Davidson perfeccionaron el concepto. La invención de la batería recargable consiguió eliminar el problema de las primeras, que al agotarse eran inútiles, en 1860 Gaston Planté construyó el primer modelo de acumulador de plomo-ácido con pretensiones de ser un aparato utilizable, pero no tuvo éxito.

A finales del siglo XIX; sin embargo, la electricidad se iba convirtiendo rápidamente en artículo cotidiano, Planté volvió a explicar las características de su acumulador, en 1879 tuvo una mejor aceptación, iniciándose un intenso y continuado proceso de desarrollo para perfeccionarlo. Entre 1890 y 1910 se dio un avance importante en la tecnología de las baterías, H. Tudor perfecciona la batería de plomo-ácido, los científicos suecos Waldmar Junger y Berg inventaron el acumulador de níquel-cadmio, y en 1903 basado en el trabajo de Junger, Thomas Alva Edison patentó la batería de hierro-níquel.

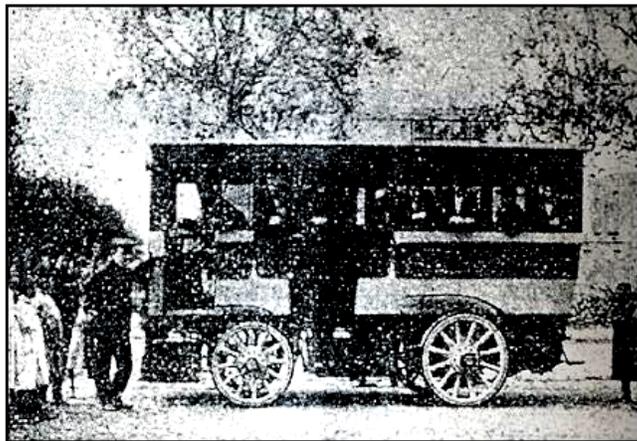
A finales del siglo XIX los motores eléctricos movían la mayoría de vehículos, esto se debe a que los motores de combustión interna estaban en desarrollo. Fue en 1890 cuando W. H. Patton tuvo la idea de hacer un tranvía con propulsión híbrida en serie, con un motor de gas y uno eléctrico.

En 1896 los británicos H. J. Dowsing y L. Epstein patentaron ideas sobre hibridación en paralelo, que posteriormente fueron utilizadas en Estados Unidos para mover vehículos grandes, como camiones y autobuses. Dowsing llegó a montar en un vehículo Arnold un dínamo que ponía en funcionamiento el motor gasolina, propulsaba el vehículo o bien recargaba las baterías, tal vez fue el primer híbrido de la historia.

El español, Emilio de la Cuadra, fundó en 1898 una empresa, Compañía General Española de Coches Automóviles E. de la Cuadra Sociedad en Comandita, para fabricar vehículos junto a los suizos, Carlos Vellino y Marc Charles Birkigt Anen. En 1899 la gama inicial de cuatro modelos constaba de un carruaje de dos asientos, una camioneta, un camión y un autobús. Opcionalmente podían tener un motor gasolina unido a un generador que se encargaba de recargar las baterías constantemente (híbrido en serie).

Los acumuladores eléctricos dieron problemas y no tuvo éxito su presentación comercial. Históricamente no se les ha reconocido.

Figura 3. **Autobús La Cuadra**



Fuente: <http://www.vehiculoclasico.es/images/marcas/pioneras/lacuadra/omnibus.jpg>

En 1899 un empleado de la vienesa Jacob Lohner & Co. hace su primer diseño, un automóvil híbrido con motor eléctrico y a gasolina, su nombre era Ferdinand Porsche, quien en ese entonces tenía 24 años. Su diseño consistía en un motor a gasolina que giraba a velocidad constante, alimentando un dínamo para cargar las baterías. Además, el arranque del motor de gasolina se hacía mediante el mismo dínamo.

La energía eléctrica se utilizaba para alimentar los motores eléctricos contenidos en los cubos de las ruedas delanteras, la energía excedente se almacenaba. Este automóvil es considerado el primer híbrido de producción del mundo y a su vez el primer vehículo de tracción delantera. Tenía una autonomía de 64 Km. sólo con baterías, similar al Chevrolet *Volt* que salió a la venta en el año 2010.

El nombre de este vehículo era Lohner-Porsche, también conocido como *Semper vivus* (siempre vivo) y fue presentado por primera vez el 14 de abril de 1900 en la exposición mundial de París, se fabricaron 300 unidades, el éxito de este diseño catapultó al Dr. Ferdinand Porsche a la fama como ingeniero. Existió una versión de carreras e incluso una 4x4 en 1903, es decir, el primer auto con tracción en las cuatro ruedas fue un híbrido, los Lohner-Porsche se dejaron de fabricar en 1906.

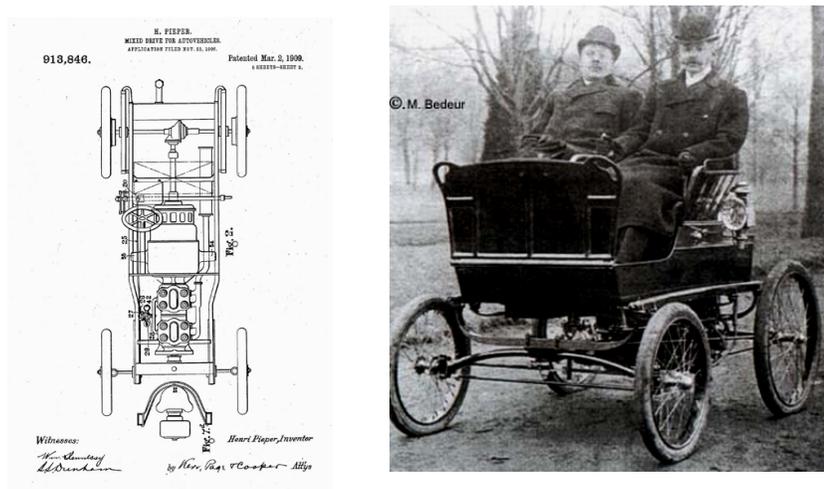
Figura 4. **Híbrido Lohner-Porsche**



Fuente: <http://www.autowallpaper.de/Wallpaper/Porsche/Lohner-Porsche-Elektromobil/bilder/Lohner-Porsche-Elektromobil-4.jpg>

También en 1899 Henri Pieper, inventor de origen alemán y armero en Bélgica, junto con su hermano Nicolás Pieper construyeron un vehículo llamado Voiturette, con un motor gasolina unido a uno eléctrico colocado bajo el asiento. A velocidad de crucero el motor eléctrico generaba electricidad para cargar las baterías, para luego dar potencia extra al subir pendientes o acelerar. Henri Pieper presentó su solicitud para patentar su invento el 23 de noviembre de 1905, y se le concedió la primera patente, de los Estados Unidos, para un vehículo híbrido el 2 de marzo de 1909. Los vehículos basados en la patente de Pieper se fabricaron por la empresa de Henry Pescatore con el nombre de *Auto-Mixte* en Lieja (Bélgica) de 1906 a 1912.

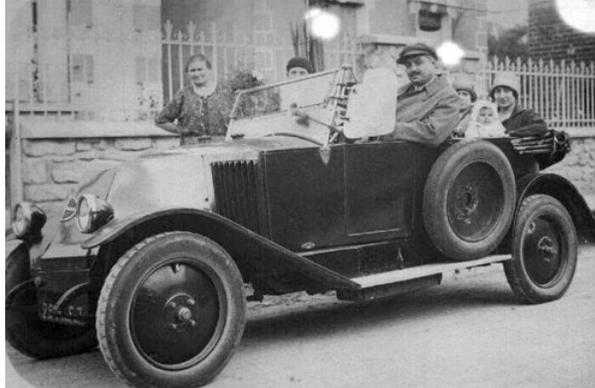
Figura 5. **Híbrido Voiturette**



Fuente: <http://img.motorpasion.com/2009/06/1900-pieper-voiturette.jpg>

En 1905 aparece el Woods Interurban, el primer híbrido puro. Podía funcionar con electricidad o con su motor gasolina bicilíndrico, pero el cambio de un modo a otro necesitaba de unos quince minutos, fue un fracaso comercial. En la actualidad ese cambio se hace instantáneamente y sin intervención del conductor.

Figura 6. **Híbrido Woods Interurban**



Fuente: <http://img.motorpasion.com/2009/06/1905-woods-interurban.jpg>

Con la mejora en los motores de combustión interna, la facilidad creciente para recargar combustible y la invención en 1913 del motor de arranque, jubilandando la manivela, prácticamente en este año se exterminan los vehículos propulsados por vapor y electricidad, las ventas de vehículos eléctricos se redujo a 6000 mientras que el modelo T de Ford vendió 182809 vehículos con motor gasolina. El mayor problema de estos primeros híbridos radicaba en el control de la parte eléctrica, recordemos que los componentes electrónicos no estuvieron disponibles, sino hasta mediados de la década de 1960, antes los motores eléctricos eran controlados por interruptores mecánicos y resistencias.

Aunque los primeros híbridos entraron en decadencia desde antes de la primera guerra mundial hasta finales del siglo XX, podemos mencionar algunos modelos que se fabricaron en este período. La canadiense Galt Motor Company lanzó en 1914 el Galt Gas Electric. La Woods Motor Vehicle Company de Chicago lanza al mercado en 1917 el Woods Dual Power, el primer híbrido puro con frenada regenerativa.

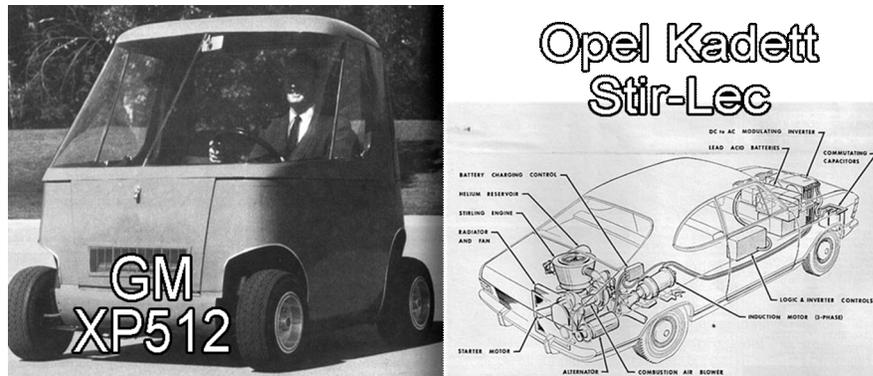
En 1921 aparece el Owen Magnetic Model 60, cuyo motor gasolina se utiliza como generador para alimentar de energía la propulsión eléctrica, alojada en el tren trasero (híbrido en serie), carecía de cambio de marchas al tener tracción totalmente eléctrica. Otros fabricantes que sacaron híbridos hasta 1940 fueron General Electric, Siemens-Schukert y Walker Vehicle Company (entre otros).

Hay que esperar hasta mediados de los años 60, cuando empieza la humanidad a darse cuenta de las consecuencias de la contaminación y que ésta se está volviendo incontrolable. En 1966 el Congreso de Estados Unidos recomendó el uso de vehículos eléctricos para reducir la contaminación ambiental. La industria empieza a moverse tímidamente.

El ingeniero Victor Wouk examinó el problema y llegó a una solución: combinar los beneficios de bajas emisiones de un automóvil eléctrico con la potencia de un motor de gasolina para producir un vehículo híbrido, esto le valió bastantes críticas. El Dr. Wouk y su colega Charles L. Rosen, formaron una nueva compañía, Petro-Electric Motors, para desarrollar su idea. El Dr. Victor Wouk es reconocido como el investigador moderno del movimiento de los vehículos híbridos.

En 1969 General Motors muestra tres prototipos de micro-vehículo, uno eléctrico, otro híbrido y otro sólo a gasolina, los XP512, no fueron más que demostradores tecnológicos. En el mismo año sacaron un prototipo de vehículo normal, el Opel Kadett Stir-Lec.

Figura 7. Híbridos de 1969



Fuente: <http://img.motorpasion.com/2009/06/1969-gm-xp512.jpg>

http://img.motorpasion.com/2009/06/opel_kadett_stir-lec_i.jpg

En 1970 se emite el *Clean Air Act* en Estados Unidos, que pide reducir las emisiones un 95% para 1976. Poco después se produce un incentivo muy grande para la investigación de la propulsión alternativa, la crisis del petróleo de 1973.

Las imágenes de filas kilométricas para recargar combustible dieron la vuelta al mundo y los gobiernos de Occidente notaron que dependían demasiado del petróleo y debían buscar las formas de ser más autosuficientes y reducir su inmenso gasto.

Entre 1968 y 1971 tres científicos investigaron sobre combinaciones de sistemas híbridos. Baruch Berman, George H. Gelb y Neal A. Richardson desarrollaron y patentaron un sistema de transmisión electromecánica que conseguía más eficiencia utilizando un motor pequeño de combustión interna. Muchas de sus ideas se han utilizado en híbridos modernos.

La alemana Volkswagen desarrolló en 1973 el Volkswagen Taxi, que se mostró en salones de Estados Unidos. El Taxi tenía la habilidad de funcionar tanto con gasolina como con motor eléctrico alternativamente o a la vez. Recorrió casi 13000 kilómetros en pruebas.

En 1973 Victor Wouk y Charles Rosen construyen un prototipo de híbrido sobre un Buick Skylark 1972 cedido por General Motors. Se eligió ese modelo por el gran volumen que tenía su motor, dentro alojaron un motor eléctrico de 15 kW y un motor rotativo del Mazda RX-2. No llegó a superar los 136 km/h en las pruebas debido a unos traqueteos estructurales.

El vehículo se probó en la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency EPA*), pero uno de los encargados, Eric Stork, canceló el proyecto y no se consideraron los resultados. Wouk consiguió la mitad de consumo que el modelo convencional y una reducción de emisiones del 9%. Stork dijo que la tecnología híbrida no era práctica.

Figura 8. **Prototipo híbrido sobre un Buick Skylark**



Fuente: <http://img.motorpasion.com/2009/06/1974-buick-skylark.jpg>

Victor Wouk intentó mostrar las bondades de la tecnología durante años, en General Motors el desarrollo continuó a pequeños pasos. En Japón, Toyota, empieza el desarrollo de híbridos, mostrando en 1976 un prototipo deportivo híbrido en serie movido por una turbina de gas (*GT*) y un motor eléctrico. Se llamaba Toyota GT Hybrid Concept, basado en el Toyota Sports 800 de 1969.

Figura 9. **Toyota GT Hybrid Concept**



Fuente: <http://img.motorpasion.com/2009/06/1976-toyota-gt-hybrid.jpg>

A finales de la década de 1980 se presenta el Audi Duo, basado en el Audi 100 Avant quattro. Tenía un motor eléctrico de 9.4 kW para el eje trasero y un motor 2.3 de cinco cilindros para el eje delantero, con baterías de níquel-cadmio (NiCD).

En 1993 Volvo muestra un prototipo denominado *Environmental Concept Car*, equipado con 349 kilogramos de baterías NiCD. Es un adelanto del *ReCharge Concept* presentado en 2007, pues un motor térmico era utilizado para recargar la energía de las baterías, pero no tenía conexión física con las ruedas (híbrido en serie y de rango extendido).

En 1997 Audi lanza al mercado el Audi Duo III, con un motor 1.9 *TDI* de 90 CV y un motor eléctrico de 22 kW, en configuración paralela y tracción delantera. Fue el primer híbrido europeo moderno de producción, aunque solamente se vendieron 60 unidades, fue un fracaso comercial por su elevado precio. Se debe esperar hasta el año 2009 para ver otro híbrido europeo, el Mercedes Benz S 400 Blue Hybrid.

En 1993, durante el gobierno de Bill Clinton en Estados Unidos, se creó una iniciativa federal denominada Alianza para una Nueva Generación de Vehículos (*Partnership for a New Generation of Vehicles, PNGV*), un consorcio del gobierno y la industria automotriz estadounidense, el *PNGV* había fijado el objetivo de desarrollar un vehículo con niveles de contaminación muy bajos, que tendría una economía de combustible de 129 Km/gal para el año 2003. Las compañías que integraron este programa fueron Daimler Chrysler, Ford Motor Company y General Motors Corporation. La exclusión de Honda y Toyota del programa estadounidense las obliga a intensificar sus investigaciones sobre los vehículos híbridos.

Toyota crea un proyecto llamado G21 (*Global Car for the Twenty-first Century*), que dio lugar al primer híbrido de Toyota, casi un siglo después que el híbrido de Porsche fuera diseñado, el 10 de diciembre de 1997 Toyota se arriesga y lanza al mercado japonés el Toyota Prius (en latín, pionero) modelo NHW10, justo antes del acuerdo internacional llamado Protocolo de Kioto sobre el cambio climático, es el primer híbrido de producción masiva del mundo. Es un híbrido puro, con una cantidad elevada de soluciones técnicas innovadoras, el primer año de ventas fue un éxito, 18000 unidades.

En el 2001 sale a la venta el Prius modelo NHW11 en Estados Unidos, es el segundo híbrido producido en serie en el mercado americano luego de que la empresa japonesa Honda sacara el modelo Insight en 1999, un semihíbrido, de reducido tamaño y peso, aerodinámica optimizada y un consumo de combustible bastante bajo.

Figura 10. **Toyota Prius y Honda Insight**



Fuente: http://www.ecologiaverde.com/wp-content/2008/05/toyota_prius_.jpg
http://www.automedia.com/NewCarBuyersGuide/photos/2006/Honda/Insight/Hatchback/2006_Honda_Insight_ext_1.jpg

Gracias a la buena aceptación de estos modelos, aparecen sus sucesores, Toyota Prius II modelo NHW20 y Honda Civic Hybrid, que son modelos totalmente nuevos. Mientras Honda apuesta por el esquema semihíbrido, Toyota apuesta por el híbrido puro y lo lleva al segmento de lujo por primera vez con la gama de híbridos Lexus RX400h, Lexus GS 450h y Lexus LS 600h, y en 2010 sale a la venta la tercera generación del Prius modelo ZVW30.

La tecnología Toyota se ha vendido a fabricantes como Ford, a cambio de sus conocimientos en otras áreas como motores Diesel. En 2004 aparece el primer híbrido de comercialización masiva americano, Ford Escape Hybrid.

Figura 11. **Ford Escape Hybrid**



Fuente: http://pictures.topspeed.com/IMG/crop/200801/2009-ford-escape-hybrid_460x0w.jpg

En noviembre de 2010 salió a la venta al mercado estadounidense el Chevrolet Volt, hermano del Opel Ampera que se comercializará en Europa, es un vehículo híbrido eléctrico enchufable desarrollado por General Motors, funciona con un motor a gasolina y un motor eléctrico.

La particularidad de este vehículo radica en que el motor de gasolina no mueve al auto de forma directa, sino que está unido a un generador que carga la batería cuando se está agotando, por lo que siempre es propulsado por el motor eléctrico. No obstante, la compañía ha evitado el uso del término “híbrido”, prefiriendo llamarlo “vehículo eléctrico” con “rango extendido” debido a su diseño.

Figura 12. **Chevrolet Volt y Opel Ampera**



Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/2011_Chevrolet_Volt_-_2010_DC.jpg http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Opel_Ampera.JPG

En Estados Unidos los híbridos aparecen como transformación de modelos existentes, no son diseños pensados desde cero para conseguir consumos bajos, similar a lo que pasa con los Lexus. Los Prius e Insight son modelos diseñados desde cero, no tienen versiones convencionales a la venta.

Japoneses y americanos piensan únicamente en híbridos gasolina, pero en Europa se están investigando soluciones híbridas con motor diesel en Citroën, Opel y Peugeot, principalmente. Estos modelos aparecerán a medio plazo en el mercado.

2.2 Definición de un vehículo híbrido

Vehículo o automóvil híbrido, es un vehículo de propulsión alternativa, que para su propulsión utiliza una combinación de dos sistemas de generación de energía:

- Un motor eléctrico movido por energía eléctrica proveniente de baterías, y
- Un motor de combustión interna.

La energía eléctrica que lo impulsa proviene de baterías y, alternativamente, de un motor de combustión interna, diesel o gasolina, que mueve un generador eléctrico. Normalmente, el motor de combustión interna también puede impulsar las ruedas en forma directa.

En el diseño de un automóvil híbrido, el motor térmico es la fuente de energía que se utiliza como última opción, y se dispone un sistema electrónico para determinar qué opción usar y cuándo hacerlo.

En el caso de híbridos gasolina - eléctricos, cuando el motor de combustión interna funciona, lo hace con su máxima eficiencia. Si se genera más energía de la necesaria, el motor eléctrico se usa como generador y carga las baterías del sistema. En otras situaciones, funciona sólo el motor eléctrico, alimentándose de la energía guardada en la batería. En algunos es posible recuperar la energía cinética al frenar, convirtiéndola en energía eléctrica.

La combinación de un motor de combustión operando siempre a su máxima eficiencia, y la recuperación de energía del frenado (útil especialmente en la ciudad), hace que estos vehículos alcancen mejores rendimientos que los vehículos convencionales.

2.3 Clasificación y transmisión de fuerza

Tradicionalmente, los motores que han propulsado a los automóviles convencionales han sido sobredimensionados con respecto a lo estrictamente necesario para un uso habitual. La nota dominante ha sido, y es aún, equipar con motores capaces de dar una potencia bastante grande, pero que sólo es requerida durante un mínimo tiempo en la vida útil de un vehículo.

La energía eléctrica todavía está muy lejos de resultar viable para mover con total autonomía un automóvil, pero no por ello su aportación deja de ser importante. Los fabricantes la utilizan en sus nuevos vehículos para minimizar sus emisiones contaminantes, para optimizar su consumo de combustible o para ambas cosas a la vez. En combinación con motores de combustión interna, unas veces asume un papel de protagonista y otras como auxiliar.

Los híbridos se equipan con motores de combustión interna (motor térmico), diseñados para funcionar con su máxima eficiencia. Si se genera más energía de la necesaria, el motor eléctrico se usa como generador y carga las baterías del sistema. En otras situaciones, funciona sólo el motor eléctrico, alimentándose de la energía guardada en la batería. En los híbridos es posible recuperar la energía cinética al frenar, que suele disiparse en forma de calor en los frenos, convirtiéndola en energía eléctrica. Este tipo de acción suele llamarse "frenada regenerativa".

Atendiendo a su principio de funcionamiento se pueden clasificar en tres tipos:

- Híbrido en serie: el motor térmico no tiene conexión mecánica con las ruedas, sólo se usa para generar electricidad. Dicho motor funciona a un régimen óptimo y recarga la batería hasta que se completa su carga, momento en el cual se desconecta temporalmente. La tracción es siempre eléctrica.
- Híbrido en paralelo: tanto el motor térmico como el eléctrico se utilizan para dar fuerza a la transmisión a la vez. Es una solución relativamente sencilla, pero no es la más eficiente.
- Híbrido mixto o serie/paralelo: cualquier combinación de los dos motores sirve para impulsar al vehículo, es como un híbrido en serie pero con conexión mecánica a las ruedas. Es una solución muy eficiente pero mucho más compleja a nivel mecánico y electrónico.

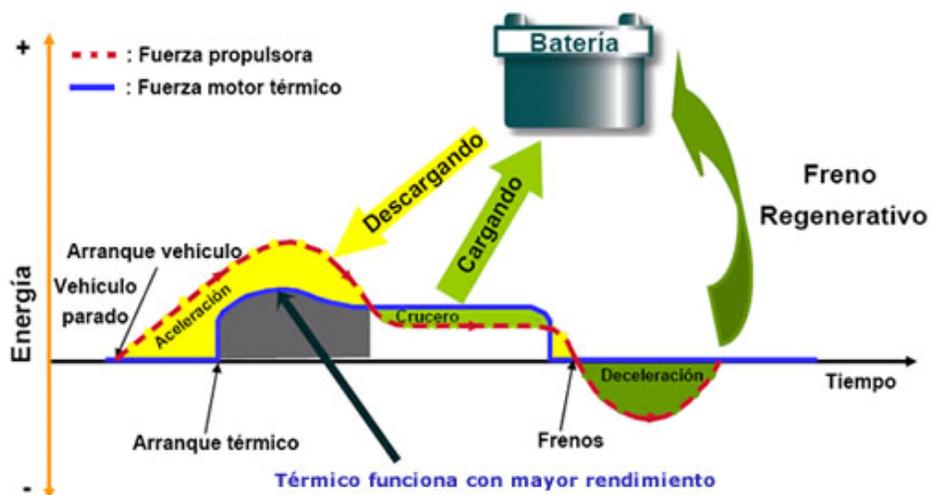
Así, según esta clasificación, los Chevrolet Volt u Opel Ampera son híbridos en serie, mientras que los Honda Civic Hybrid e Insight son híbridos en paralelo. Todos los híbridos Toyota y Lexus son de configuración combinada. El sistema más eficiente es en serie, y el menos eficiente es el paralelo.

Existe otra forma de clasificar a los híbridos:

- Microhíbrido: en las detenciones se apaga el motor térmico para evitar el ralentí. Cuando se quiere reanudar la marcha, un alternador reversible arranca el motor utilizando energía recuperada previamente a la detención. Sólo ahorra en ciclo urbano y no hay un motor eléctrico que impulse al vehículo.
- Semihíbrido o *mild-hybrid*: el motor eléctrico se utiliza como una asistencia al motor térmico y además es generador de energía en las frenadas y retenciones, pero no puede impulsarse de forma 100% eléctrica (motor térmico apagado), aunque sí con el motor térmico sin consumir combustible pero moviendo sus piezas mecánicas.
- Híbrido puro o *full-hybrid*: se puede circular en determinadas condiciones sólo con el motor eléctrico, mientras el térmico está totalmente apagado y no mueve sus piezas. Este cambio puede ser de forma automática o voluntaria.
- Híbrido enchufable o *PHEV (Plug-in hybrid electric vehicle)*: pertenece a este grupo si sus baterías son recargables mediante la red de energía eléctrica convencional, es decir, enchufándolo, y recorre al menos 32 kilómetros sin necesidad de otro sistema de propulsión.
- Híbrido de rango extendido o *REHEV (Range extended hybrid electric vehicle)*: como el caso anterior, pero si además es un híbrido en serie. Esto significa que cuando se acaba la carga de las baterías, el motor térmico se usa sólo para generar electricidad a un régimen constante para aumentar la autonomía, a un costo por kilómetro muy bajo.

Según esta clasificación, los microhíbridos son los BMW y Mini con *Efficient Dynamics*, los Honda son semihíbridos y los Toyota/Lexus, híbridos puros. Cualquier vehículo con el sistema *Start & Stop* se considera microhíbrido, es una tecnología que se implantará a mediano plazo en casi todos los modelos convencionales. Un ejemplo de híbrido enchufable es un *Toyota Prius* con modificación de terceros para recargar sus baterías con la red eléctrica, pero que funciona como un híbrido normal. El Volt/Ampera o Volvo ReCharge Concept son de rango extendido.

Figura 13. **Gráfica general del funcionamiento de un vehículo híbrido**



Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-hibridos/grafica-funcionamiento.jpg>

Sabemos que la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma, pero cuando hablamos de automoción, aunque sea físicamente incorrecto, podemos contemplar pérdidas. Al aplicar el freno convertimos energía cinética en calor, los rozamientos mecánicos, resistencia aerodinámica, consumo al ralentí, producen pérdidas, incluso el sonido del motor podemos considerarlo como tal, esto supone que del combustible que cargamos al depósito se aprovecha menos de la mitad en movimiento útil. Los vehículos híbridos tratan de minimizar estas pérdidas todo lo que sea posible.

Los vehículos híbridos tienen varios componentes comunes, independientemente de la arquitectura (híbrido en serie, paralelo o mixto). Si fuese un vehículo 100% eléctrico simplemente no tendría motor térmico, y el resto es igual.

Estos componentes son:

- Motor térmico: suele ser a gasolina (ciclo Otto, Atkinson o Miller) o diesel. También podría funcionar con combustibles alternativos como GLP o biocombustibles. Tiene poca cilindrada respecto a un modelo equivalente de motor convencional y es más importante el par máximo que la potencia.
- Motor eléctrico: puede haber más de uno y siempre va conectado a la transmisión o empuja directamente a las ruedas, como es el caso de los motores *in-wheel* o dentro de la rueda. Su sonoridad es prácticamente nula y dan casi todo el par en un régimen muy bajo de revoluciones.

- Generador: no es tanto una pieza sino una función. Recupera energía en las frenadas, retenciones y aceleraciones en las que el motor térmico genere más potencia de la requerida. Lo normal es que el motor eléctrico desempeñe esta función, siempre que no esté impulsando al vehículo.
- Baterías: suelen ser de plomo-ácido (Pb), níquel-metal híbrido (NiMH), níquel-cadmio (NiCd) o ión litio (Li-Ion), en orden de menor a mayor eficiencia. Se almacenan normalmente en la parte trasera y añaden bastante peso al vehículo. Necesitan de un sistema de refrigeración, pero no de un mantenimiento por parte del usuario. Van aparte de la batería de 12V usada comúnmente.
- Sistema de gestión: independientemente de un modelo manual (muy raro) o de uno automático, para que un híbrido sea más eficiente, debe estar gestionado por una computadora con múltiples sensores, que se encarga de decidir qué combinación es más eficiente en cada momento.

2.3.1 Sistema híbrido en serie

Los híbridos en serie han sido llamados como vehículos eléctricos de rango extendido (*REHEV*) para enfatizar que son vehículos eléctricos con asistencia de un motor térmico. Sin embargo, el rango extendido se puede dar tanto en híbridos en serie como en paralelo.

Los híbridos en serie son conducidos únicamente con tracción eléctrica. A diferencia de los motores de combustión interna, los motores eléctricos son eficientes con una potencia excepcional en relación al peso, brindando un par adecuado en un amplio rango de velocidades, tampoco requieren de una transmisión entre el motor y las ruedas. Las transmisiones agregan peso, volumen y disminuyen la potencia del motor, además de ser complejas.

En un sistema híbrido en serie, el motor térmico pone en funcionamiento un generador eléctrico en vez de propulsar directamente las ruedas, este arreglo no es nuevo, de hecho es muy común en barcos y locomotoras diesel-eléctricas. Ferdinand Porsche utilizó este arreglo a principios del siglo 20 en vehículos de carrera, inventando lo que hoy conocemos como configuración en serie. Porsche nombró a este sistema, Sistema Mixto.

El arreglo consistía en utilizar un motor dentro del cubo de rueda en cada una de las ruedas delanteras, marcó récords de velocidad en esos años. A este diseño se le llamó algunas veces como una transmisión eléctrica, puesto que el generador y los motores en las ruedas reemplazaban a la transmisión mecánica. El vehículo no podía moverse hasta que el motor de combustión interna estuviera en funcionamiento.

Esta configuración nunca demostró ser idónea para su producción masiva, al no poder sincronizar los motores eléctricos de las ruedas con el conjunto de generación de energía, dando como resultado mayor consumo de combustible. Pero la tecnología ha avanzado, con los modernos sistemas informáticos de gestión del motor, optimizando el funcionamiento del sistema de generación para que coincida con la potencia necesaria para la tracción eléctrica. Los motores eléctricos han llegado a ser más pequeños, ligeros y eficientes a través de los años.

Estos avances le han dado ventaja a la transmisión eléctrica en condiciones de operación normales, frente a un motor de combustión interna convencional y transmisión automática mecánica. Una de las ventajas es el aumento progresivamente suave de la velocidad. La transmisión eléctrica actualmente es viable para reemplazar a la transmisión mecánica.

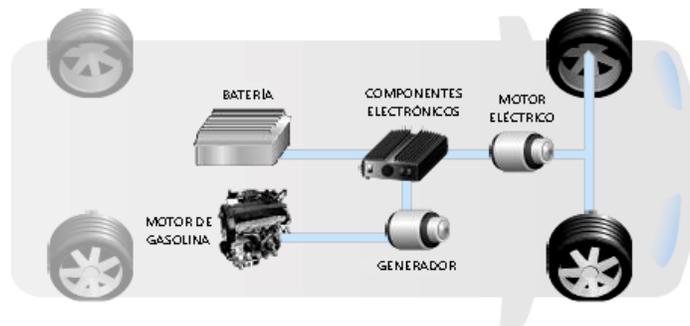
El motor eléctrico puede funcionar alimentándose completamente por electricidad a través de la batería o mediante el generador, o por ambos. Estos vehículos se asemejan a una locomotora diesel-eléctrica, agregando una batería de gran tamaño que sea capaz de mantenerlo en funcionamiento sin necesidad de usar el motor de combustión. El generador a su vez puede recargar la batería y darle energía al motor eléctrico para mover el vehículo al mismo tiempo. La batería actúa como un acumulador de energía. Una ventaja de este sistema es que cuando el vehículo se detiene, el motor de combustión es apagado, y cuando se mueve puede hacerlo usando solo la energía de la batería. Esto reduce las emisiones contaminantes especialmente en semáforos, en conducción lenta o en detenciones propias del tránsito.

Algunos prototipos como el Volvo ReCharged y los Ford Serie-F tienen motores eléctricos en los cubos de las ruedas, reduciendo la necesidad de usar un diferencial, disminuyendo peso, ganando espacio y minimizando pérdidas de energía. También pueden ser equipados con un supercondensador o un volante de inercia para almacenar energía generada en la frenada regenerativa, mejorando la eficiencia al recuperar energía, que de otra forma se perdería, siendo disipada a través de calor por el sistema de frenado.

A continuación se presentan esquemas de flujo de energía en un vehículo en serie, en distintas condiciones de manejo.

En reposo: la energía no fluye a través del sistema, pero la parte electrónica está preparada para obtener energía desde la batería, otorgársela al motor eléctrico y éste a su vez enviarla a las ruedas para iniciar el movimiento del vehículo y conducirlo a una velocidad bastante baja.

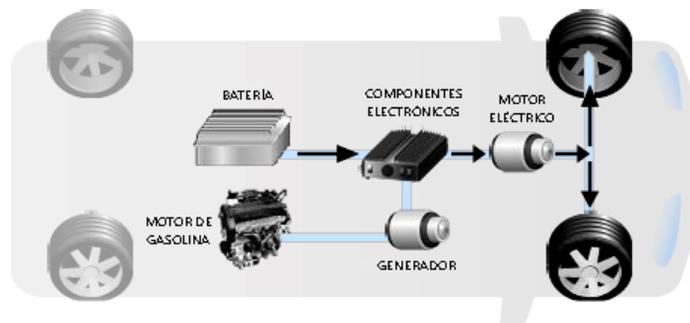
Figura 14. **Híbrido en serie, reposo**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Conducción lenta: mientras se conduce a baja velocidad, la parte electrónica simplemente toma energía de la batería para poner a funcionar el motor eléctrico, operando al vehículo como uno completamente eléctrico.

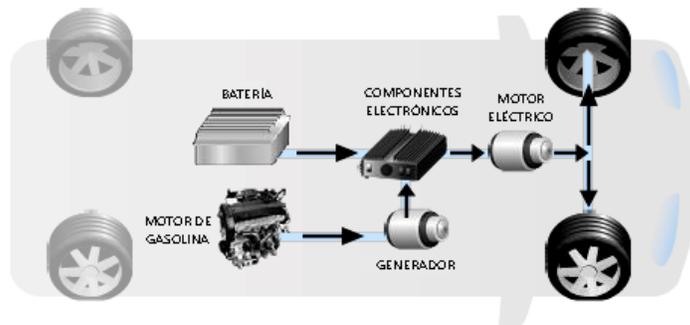
Figura 15. **Híbrido en serie, conducción lenta**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Aceleración: durante la aceleración, el motor térmico pone a funcionar el generador, el cual va a proporcionar energía al motor eléctrico, adicional a la que se obtiene de la batería.

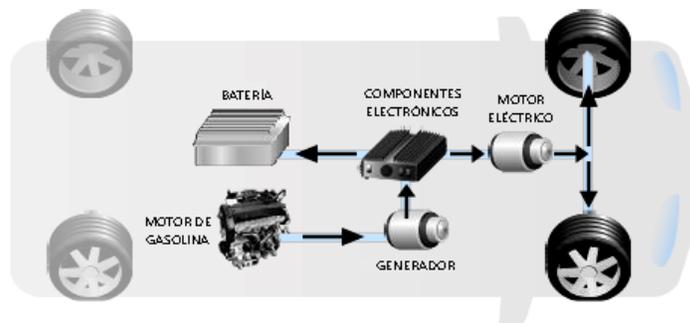
Figura 16. **Híbrido en serie, aceleración**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Velocidad de crucero: mientras se conduce a velocidad de crucero constante, el motor térmico hace funcionar al generador, este provee de energía al motor eléctrico, y si las condiciones son las adecuadas, parte de la energía que se origina en el generador es enviada a la batería para recargarla.

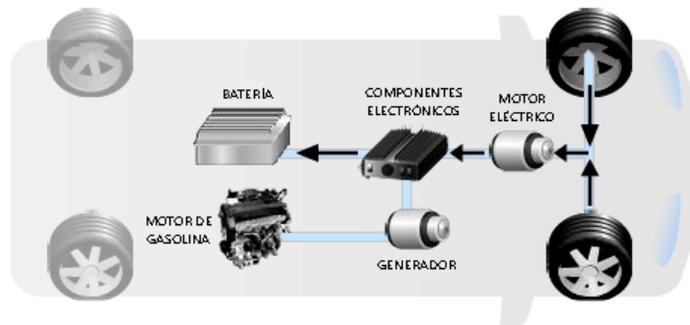
Figura 17. **Híbrido en serie, velocidad de crucero**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Frenada regenerativa: durante una frenada, la energía de rotación que se produce en las ruedas es aprovechada por el motor eléctrico, haciéndolo funcionar como un generador que proporciona energía para recargar la batería.

Figura 18. **Híbrido en serie, frenada regenerativa**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

2.3.2 Sistema híbrido en paralelo

Sistema híbrido en paralelo, es el que más se ha producido en la actualidad, tiene tanto un motor térmico como un motor eléctrico que van conectados a la transmisión. La mayoría de los diseños, combinan un gran generador y un motor eléctrico en una sola unidad, colocada a menudo entre el motor térmico y la transmisión, reemplazando al motor de arranque y al alternador convencional. Para almacenar la energía, un híbrido utiliza una gran batería con un voltaje mucho más alto que los 12 voltios de una batería en un automóvil convencional. Los accesorios como la dirección asistida y el aire acondicionado son impulsados por el motor eléctrico en vez de estar acoplados al motor térmico.

Esto permite una mayor eficiencia, los accesorios pueden funcionar a velocidad constante sin importar el número de revoluciones a las que esté girando el motor térmico.

Los híbridos en paralelo pueden ser clasificados por la forma en que sus dos fuentes de poder son acopladas mecánicamente, la primera es, si están unidos por un eje realmente en paralelo, entonces las velocidades a este eje deben ser idénticas y los pares suministrados se suman. La mayoría de bicicletas eléctricas son en efecto de este tipo. La segunda es cuando solo una de las dos fuentes de poder está siendo utilizada, mientras la otra se mantiene girando en ralentí o se conecta por un embrague unidireccional o un embrague de rueda libre (*freewheel o overrunning clutch*).

Con los automóviles es común unir las dos fuentes de poder a través de un engranaje diferencial. Así los pares suministrados deben ser los mismos y las velocidades se suman, la proporción exacta va a depender de las características del diferencial. Cuando solo una de las dos fuentes está siendo usada, la otra aun debe abastecer gran parte de la torsión, o estar equipado con un embrague de reversa unidireccional o de sujeción automática.

Los híbridos en paralelo pueden ser clasificados también en función de cómo equilibran la porción de energía que usan para proporcionar energía motriz. En algunos casos, el motor térmico es la parte dominante y el motor eléctrico se enciende únicamente cuando se necesita más potencia, en otros se utiliza predominantemente el motor eléctrico para operar y el motor térmico como una ayuda, pero debido a que los híbridos en paralelo actuales son incapaces de proporcionar una propulsión completamente eléctrica, a menudo son clasificados como semi-híbridos (*mild hybrids*).

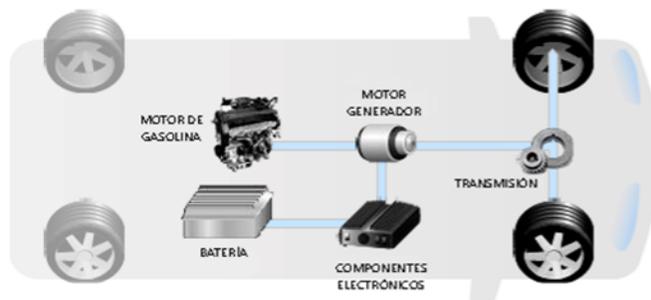
Debido a que los híbridos en paralelo pueden usar una batería más pequeña por el hecho que dependen en gran medida de la función de frenada regenerativa y el motor térmico es usado como generador para lograr una recarga adicional de la batería, son mucho más eficientes en condiciones de conducción en carretera comparados con su eficiencia en conducción en ciudad.

El Insight, el Civic y el Accord híbrido de Honda son ejemplos de híbridos en paralelo de producción masiva. Los automóviles de General Motors conocidos como *PHT (Parallel Hybrid Truck)* y los híbridos *BAS (Belt Alternator Starter)* como el Saturn VUE y el Aura Greenline y el Chevrolet Malibu híbrido se consideran como híbridos con arquitectura en paralelo sin llegar a serlo por completo.

A continuación se presentan esquemas de flujo de energía en un vehículo en paralelo, en distintas condiciones de manejo.

En reposo: la energía no fluye a través del sistema, pero la parte electrónica está preparada para obtener energía desde la batería llevarla a través del motor/generador y poner en funcionamiento el motor térmico.

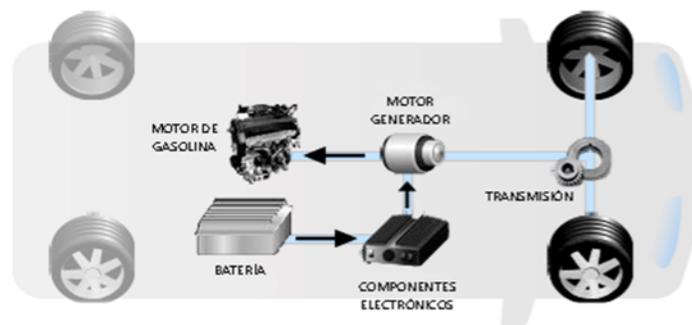
Figura 19. **Híbrido en paralelo, reposo**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Puesta en marcha: este tipo de vehículo no tiene un motor de arranque convencional para poner en funcionamiento al motor térmico, ya sea al inicio o después de realizar una parada, para este fin se utiliza la unidad de motor/generador, el cual toma energía de la batería para poner en funcionamiento el motor térmico.

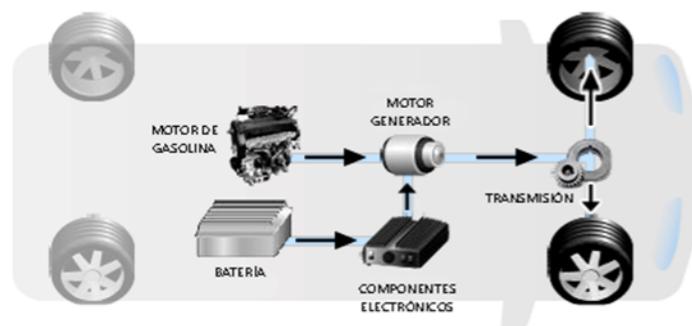
Figura 20. **Híbrido en paralelo, puesta en marcha**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Aceleración: durante la aceleración, el motor térmico es el encargado de impulsar las ruedas, auxiliado, cuando se necesita, por el motor eléctrico que toma energía de la batería.

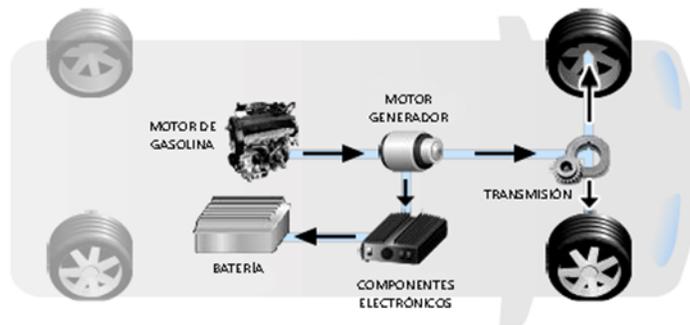
Figura 21. **Híbrido en paralelo, aceleración**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Velocidad de crucero: mientras se conduce a velocidad constante el motor térmico es el encargado de impulsar las ruedas, la potencia extra que el motor pueda generar es utilizada por el generador para recargar la batería.

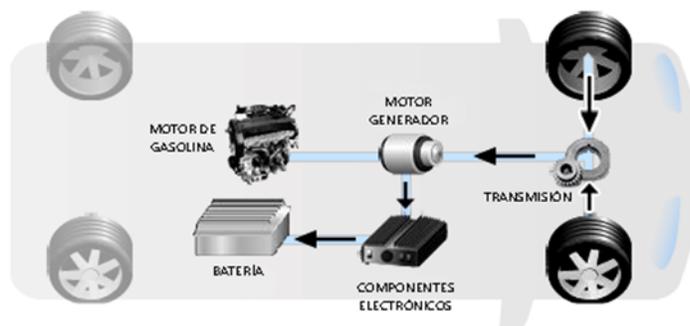
Figura 22. **Híbrido en paralelo, velocidad de crucero**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Frenada regenerativa: en esta situación, la energía de frenado de las ruedas se usa para activar el generador, creando energía que es utilizada para recargar la batería.

Figura 23. **Híbrido en paralelo, frenada regenerativa**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

2.3.3 Sistema híbrido serie/paralelo

Este tipo de configuración combina las ventajas y complicaciones de los híbridos en serie y en paralelo. Mediante la combinación de los dos diseños, el motor térmico puede impulsar las ruedas de manera directa, como en los híbridos en paralelo, y ser efectivamente desconectado para que sea el motor eléctrico el único que impulse a las ruedas, como en los híbridos en serie.

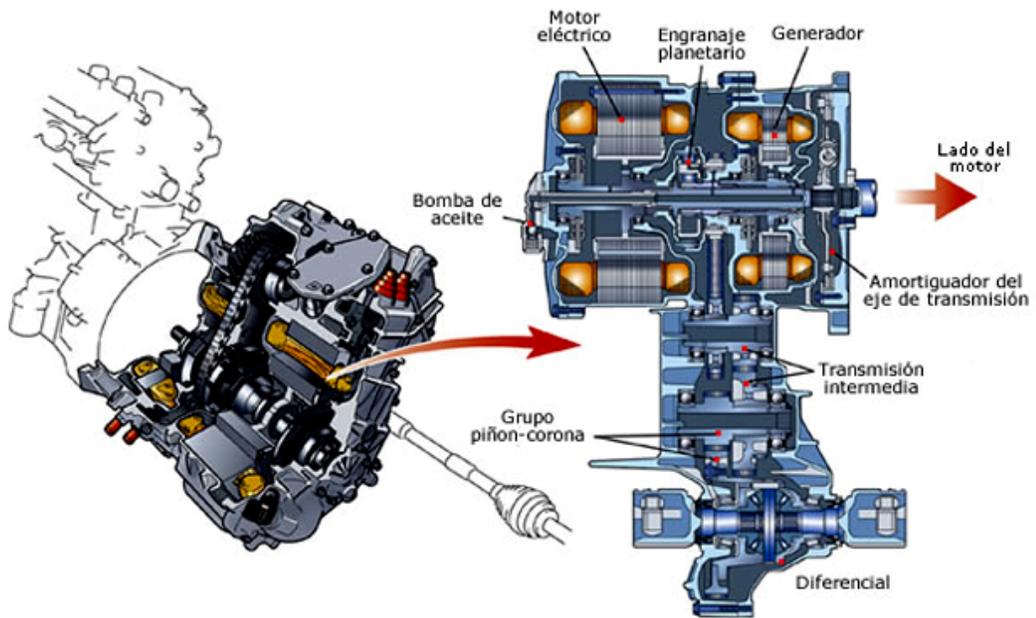
El Toyota Prius ha hecho popular este concepto, una tecnología bastante similar es utilizada por Ford en su modelo Escape híbrido. Como resultado de esta combinación de sistemas, el motor térmico funciona lo más cercano a una eficiencia óptima con más frecuencia. A bajas velocidades opera como un vehículo híbrido en serie, mientras que a altas velocidades, donde un vehículo en serie es menos eficiente, utiliza el motor térmico para impulsarse y la pérdida de energía se reduce al mínimo.

Este sistema es más costoso que un híbrido en paralelo puro, pues debe contar con una batería más grande, un generador, y un sistema de control electrónico más potente, capaz de controlar el sistema dual sin embargo tiene un mejor desempeño.

Este tipo de vehículo se caracteriza por incorporar un dispositivo conocido como *Power Split* (repartidor de energía), que sustituye al sistema de transmisión convencional permitiendo elegir si la energía que va a las ruedas será mecánica o eléctrica. Esta transmisión, utilizada en el Toyota Prius no tiene una caja de cambios convencional con distintos engranajes, ni una caja automática de variador continuo con correa, dispone de un engranaje planetario para transmitir el movimiento a las ruedas.

No tener una caja de cambios normal aporta ventajas notables y especialmente necesarias en un vehículo como éste: menos peso, más espacio y menos pérdidas por rozamiento.

Figura 24. Transmisión de un híbrido serie/paralelo



Esquema interno de la transmisión

Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-hibridos/transmision-prius.jpg>

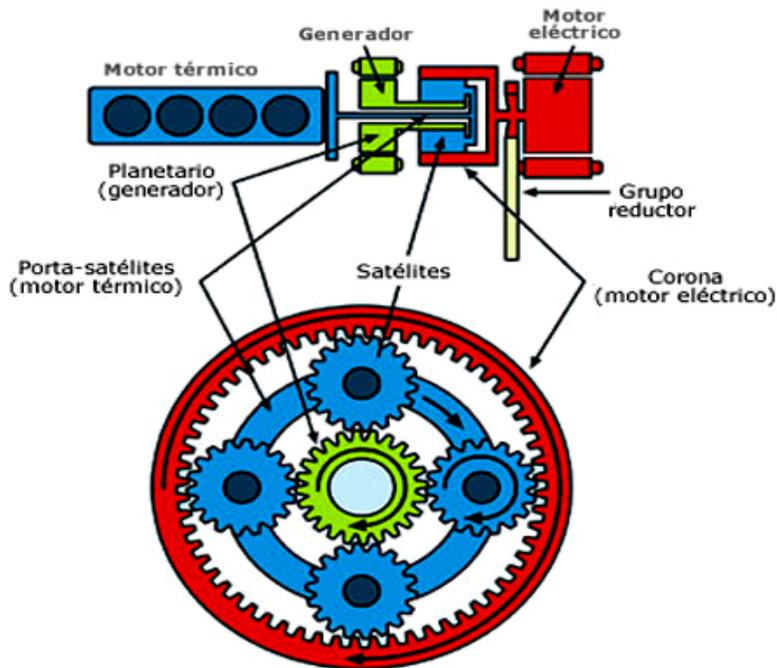
Dado que el motor térmico funciona casi siempre a plena carga y con un margen de revoluciones no muy amplio, se necesitó de un dispositivo, dadas estas condiciones, que permitiera al vehículo ir en marcha lenta o ir a gran velocidad, la solución fue incorporar un engranaje planetario comercialmente conocido como unidad repartidora de potencia (*Power split device*).

La unidad repartidora de potencia contiene tres elementos:

- Un engranaje central o planeta,
- Engranajes secundarios o satélites que giran alrededor de él, y
- Un engranaje externo o corona con un dentado interior.

El engranaje central está unido al generador eléctrico, el porta satélite está unido al motor térmico y la corona esta unida al motor eléctrico.

Figura 25. **Esquema del engranaje planetario**



Esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión

Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-hibridos/power-split-device.jpg>

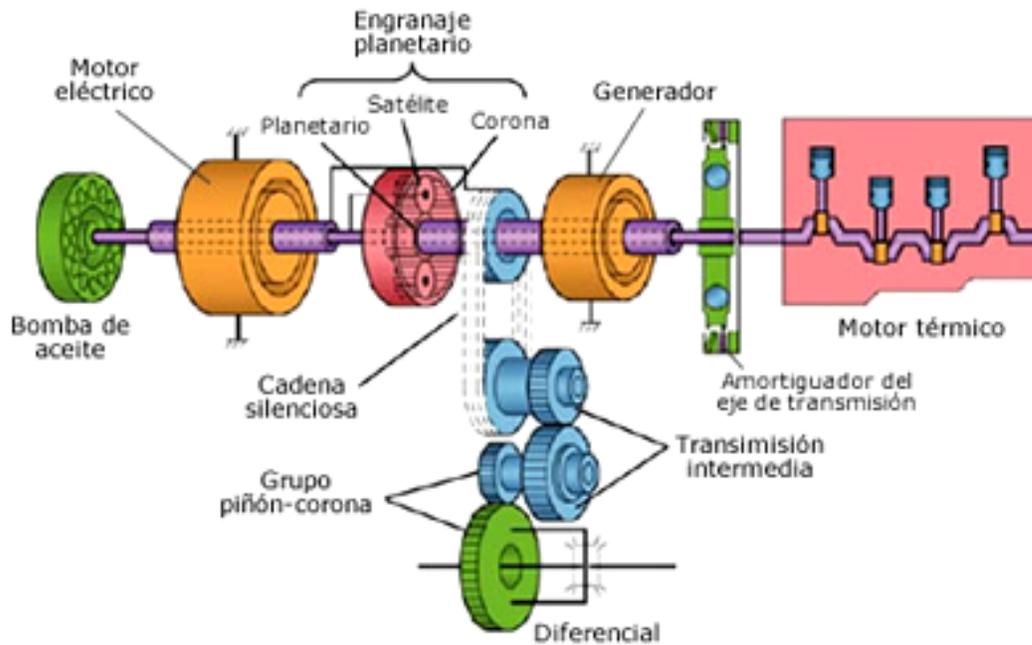
A uno de estos elementos está engranado el motor térmico, a otro el generador eléctrico y el otro está directamente conectado con las ruedas del vehículo. La clave del sistema es que el giro del generador eléctrico puede ser mayor o menor, en función de la resistencia que oponga.

Si es preciso un desarrollo corto, el generador eléctrico opone una gran resistencia al movimiento, como consecuencia toma fuerza del motor térmico y la envía al motor eléctrico, que también impulsa las ruedas. Mediante este método, el engranaje planetario o epicicloidal tiene el desarrollo corto que hace falta al iniciar la marcha por ejemplo y largo para cuando se conduzca a alta velocidad, siempre con el mismo régimen del motor.

A medida que el vehículo obtiene velocidad, el generador eléctrico opone menos resistencia y su giro aumenta. A causa de ello el desarrollo se hace más largo. Si la batería no interviene en la aceleración, toda la potencia de la que dispone el vehículo proviene del motor térmico, pero puede llegar a las ruedas a través del motor eléctrico, alimentado por el generador, o bien directamente del motor térmico, si el generador no actúa.

Este tipo de transmisión no dispone de marcha atrás (reversa), de esta función se encarga el motor eléctrico que puede girar en ambos sentidos, por lo tanto la marcha atrás se hará siempre con el motor eléctrico, para esta función no se utiliza el motor térmico.

Figura 26. **Esquema unidad repartidora de potencia**



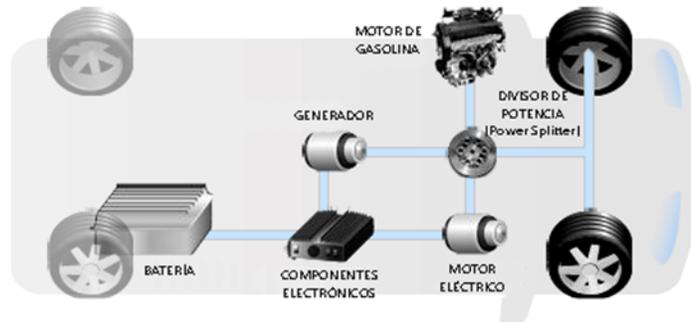
Esquema de componentes del sistema de transmisión

Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-hibridos/power-split-device-components.jpg>

A continuación se presentan esquemas de flujo de energía en un vehículo serie/paralelo, en distintas condiciones de manejo.

En reposo: la energía no fluye a través del sistema, pero la parte electrónica está preparada para obtener energía desde la batería, llevarla a través del motor eléctrico hasta las ruedas para iniciar la marcha.

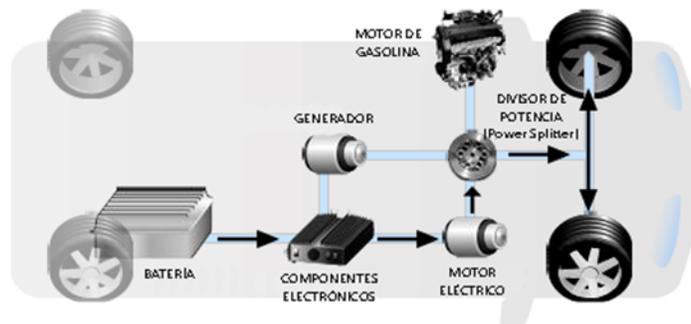
Figura 27. **Híbrido serie/paralelo, reposo**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Baja velocidad: mientras se conduce a baja velocidad, el sistema simplemente toma energía de la batería para poner en funcionamiento el motor eléctrico, impulsando con él las ruedas, operando como un vehículo completamente eléctrico.

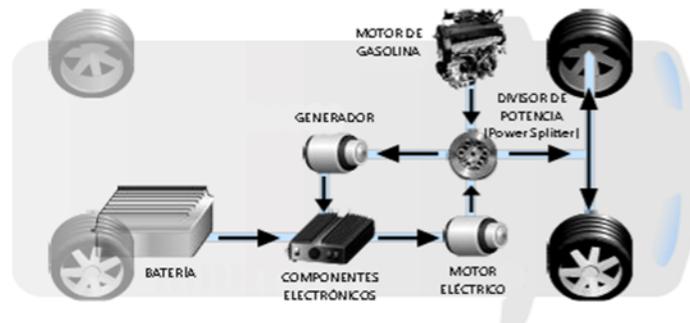
Figura 28. **Híbrido serie/paralelo, baja velocidad**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Aceleración: durante la aceleración, la energía proveniente del motor térmico es direccionada por el dispositivo repartidor de potencia a través del generador para complementar la energía que se extrae de la batería.

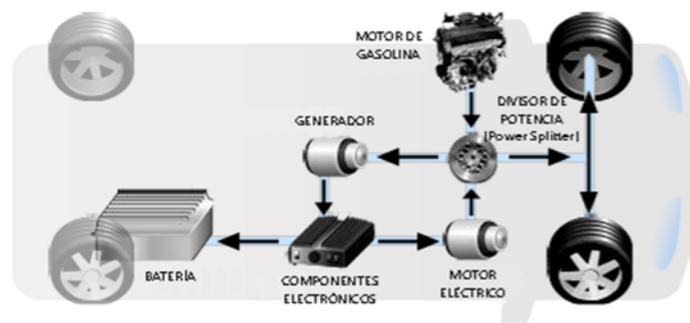
Figura 29. **Híbrido serie/paralelo, aceleración**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Velocidad de crucero: mientras se conduce a una velocidad constante, el motor térmico pone en funcionamiento el generador, el cual provee de energía al motor eléctrico. Si se necesita, energía adicional puede ser llevada del generador para recargar la batería.

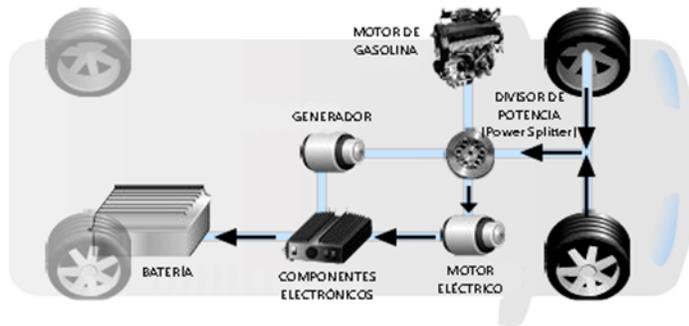
Figura 30. **Híbrido serie/paralelo, velocidad de crucero**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

Frenada regenerativa: mientras se frena, la energía producida por la inercia del vehículo es utilizada por las ruedas para hacer girar el motor eléctrico, para que funcione como un generador que se encargará de recargar la batería.

Figura 31. **Híbrido serie/paralelo, frenada regenerativa**



Fuente: <http://hybridcenter.org/hybridcenter/powertrain10.swf>

3. TECNOLOGÍA EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

3.1 Descripción de los motores de combustión interna convencionales

El motor de combustión interna o motor térmico es un conjunto de piezas que están preparadas para transformar la energía química del combustible, mediante un ciclo térmico, en energía mecánica; el combustible empleado puede ser gasolina, diesel o gasoil, gas natural o propano, bio-diesel entre otros.

El motor térmico es la fuente de generación de energía más popular en los automóviles y al parecer seguirá teniendo un lugar dominante en el futuro próximo. En los vehículos híbridos eléctricos el motor de combustión interna es la primera selección como la fuente primaria de energía, sin embargo su funcionamiento difiere del motor en un vehículo convencional ya que funciona a una potencia óptima y no requiere que esta sea cambiada con frecuencia. Mientras no se desarrolle un motor de combustión interna diseñado y controlado específicamente para ser usado en un vehículo híbrido, se seguirán utilizando los motores que existen en la actualidad pero realizándoles algunas mejoras.

3.1.1 Motor a gasolina de 4 tiempos

También conocido como motor de encendido por chispa, está basado en principios teóricos enunciados hacia 1862 por el francés Alphonse Beau de Rochas, según los cuales la combustión se lleva a cabo a volumen constante, realizado prácticamente por el alemán doctor Nikolaus August Otto, en 1875.

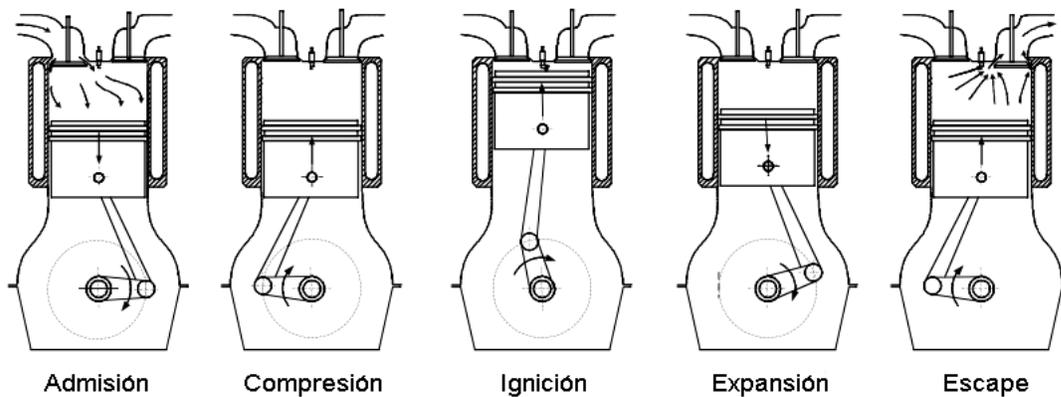
El combustible utilizado es la gasolina, que es un hidrocarburo ligero de elevado poder calorífico, que se evaporan fácilmente.

Pueden usarse también combustibles gaseosos o asimismo gas licuado, pero su empleo es menos práctico y, por ello, mucho menos difundido.

El ciclo de cuatro tiempos en un motor a gasolina se conoce como ciclo Otto, es un ciclo termodinámico ideal que se aplica en los motores de combustión interna de encendido provocado o encendido por chispa.

A continuación se detallan los tiempos del ciclo y sus características:

Figura 32. **Cuatro tiempos, motor a gasolina**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 63

Tiempo de admisión: al inicio de esta fase el pistón se encuentra en el Punto Muerto Superior (PMS), en su descenso va creando un vacío dentro de la cámara de combustión por lo cual prácticamente aspira la mezcla de aire combustible, la válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está completamente abierta. En el primer tiempo el cigüeñal gira 180°, el árbol de levas 90° y la carrera del pistón es descendente.

Tiempo de compresión: cuando el pistón llega al Punto Muerto Inferior (PMI), el árbol de leva, que gira en sincronía con el cigüeñal y que ha mantenido abierta hasta este momento la válvula de admisión para permitir el ingreso de la mezcla de combustible y aire, la cierra. El pistón inicia su movimiento ascendente comprimiendo la mezcla que se encuentra dentro del cilindro. En el segundo tiempo el cigüeñal ha girado 360° y el árbol de levas 180° .

Tiempo de ignición o fuerza: una vez que el pistón alcanza el PMS y la mezcla aire-combustible ha alcanzado el máximo de compresión, se produce una chispa eléctrica en el electrodo de la bujía, que inflama dicha mezcla y hace que explote. La fuerza de la explosión obliga al pistón a descender bruscamente haciendo un movimiento rectilíneo que se transmite por medio de la biela hacia el cigüeñal, donde se convierte en movimiento giratorio y trabajo útil. El cigüeñal ha girado 540° y el árbol de levas 270° .

Tiempo de escape: en esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto máximo de carrera superior, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo.

3.1.2 Motor a compresión de 4 tiempos

El motor de encendido por compresión también llamado motor Diesel, está basado en los trabajos del ingeniero alemán Rudolph Diesel, que realizó sus primeros motores alrededor del año 1892. Fue diseñado inicialmente y presentado en la feria internacional de 1900 en París como el primer motor para biocombustibles, utilizando aceite puro de palma o de coco.

Los motores de encendido por compresión son similares, en importancia y variedad de aplicaciones, a los motores de encendido por chispa.

El funcionamiento de este motor es bastante similar al motor a gasolina, los cuatro tiempos que consta su ciclo son admisión, compresión, ignición o fuerza y escape, siendo la característica de autoencendido la principal diferencia respecto del motor a gasolina.

Tiempo de admisión: solamente ingresa al cilindro aire puro y no una mezcla de combustible-aire.

Tiempo de compresión: se comprime el aire entre 30 y 55 bar con lo que se calienta de 700 a 900 °C, esta temperatura es suficiente para el autoencendido del combustible inyectado, se alcanza cerca del punto muerto superior del émbolo, poco antes del final de la compresión.

Tiempo de ignición o fuerza: se inyecta combustible casi pulverizado inflamándose automáticamente debido a la alta temperatura lograda en el tiempo de compresión.

Tiempo de escape: se liberan los gases quemados al exterior a través de la válvula de escape.

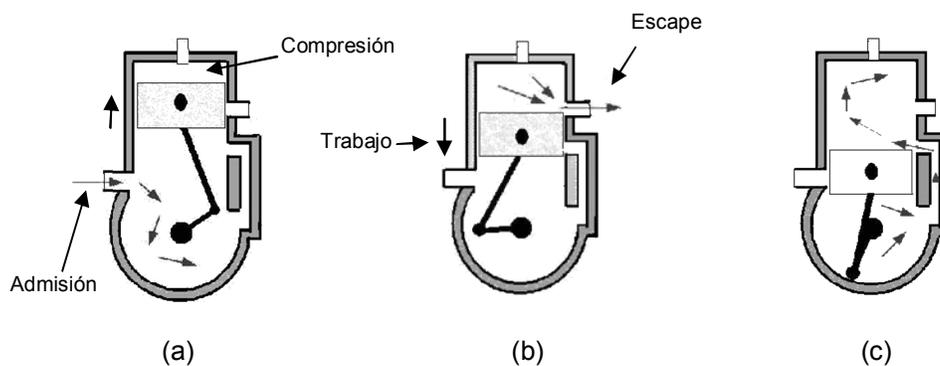
3.1.3 Motor de 2 tiempos

Los motores de dos tiempos, a diferencia del de cuatro tiempos, realizan las cuatro etapas del ciclo de trabajo en una sola vuelta del cigüeñal. Estos motores pueden ser tanto Diesel como gasolina, siendo éste último el más común.

Su mayor campo de aplicación está en las pequeñas potencias: motocicletas, máquinas manuales a gasolina (sopladores, fumigadoras, motosierras, etc.), y en los pequeños motores de aeromodelismo y similares.

Durante la carrera ascendente del pistón, se comprime la mezcla de aire y gasolina, previamente introducida en el cilindro. Al mismo tiempo y debido al movimiento del pistón, se produce vacío en el cárter del motor, obligando a entrar mezcla nueva de aire y gasolina procedente del carburador, por un conducto provisto de una válvula de apertura por la propia succión.

Figura 33. **Motor de dos tiempos**



Fuente: <http://www.sabelotodo.org/automovil/imagenes/motor/escapedos.gif>

De manera entonces, que durante esta carrera ascendente se producen dos etapas del ciclo de trabajo, es decir: compresión y admisión, figura 33 (a). Una vez que el pistón llega al punto muerto superior, tendremos la mezcla completamente comprimida, y lista para la aparición de la chispa en la bujía y además, el cárter del motor lleno con mezcla fresca procedente del carburador. En ese momento se produce el salto de la chispa en la bujía y se inflama la mezcla, produciendo la carrera descendente del pistón y generando trabajo.

Cuando el pistón realiza su carrera de descenso, impulsado por la fuerza de los gases de la combustión, y éstos han perdido ya suficiente energía, el propio pistón descubre un agujero lateral conocido como lumbrera de escape, que comunica al exterior. La presión remanente aun en los gases, hace que estos escapen del cilindro. En este momento se producen las etapas de trabajo y escape, figura 33 (b).

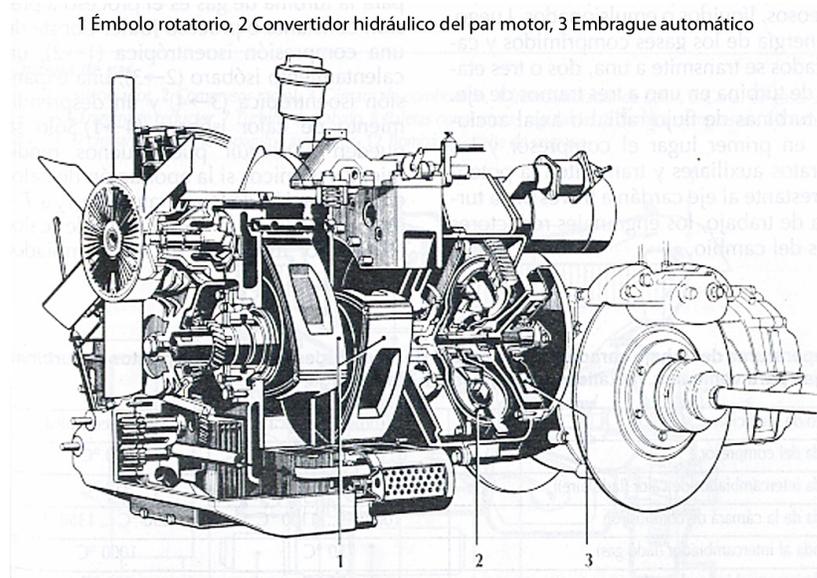
Con el constante movimiento descendente, el pistón termina por descubrir otra lumbrera inferior, que comunica con el carter, y permite la entrada de la mezcla fresca al interior del cilindro, para comenzar un nuevo ciclo de compresión y admisión, figura 33 (c).

3.1.4 Motor rotativo Wankel

El motor de pistón rotativo o motor Wankel, nombrado así por su inventor el Dr. Felix Wankel quien concibió su motor en 1924 y recibió su patente en 1929, genera energía por la compresión, ignición y expansión de una mezcla de aire y gasolina en un ciclo de 4 tiempos similar al de un motor convencional de combustión interna. Su diseño mecánico permite a todas las partes móviles tener un movimiento de rotación continua en lugar de un movimiento reciprocante.

El rotor o pistón tiene una forma aproximadamente triangular, girando sobre un engranaje en el eje de salida dentro de una cubierta de forma epitrocoidal. En este tipo de motor, el pistón triangular divide el espacio interior en tres cámaras de volumen variable, en donde se desarrollan simultáneamente tres ciclos de cuatro tiempos desfasados un tercio de vuelta del rotor. Los cuatro tiempos del motor ocurren en una sola revolución del cigüeñal.

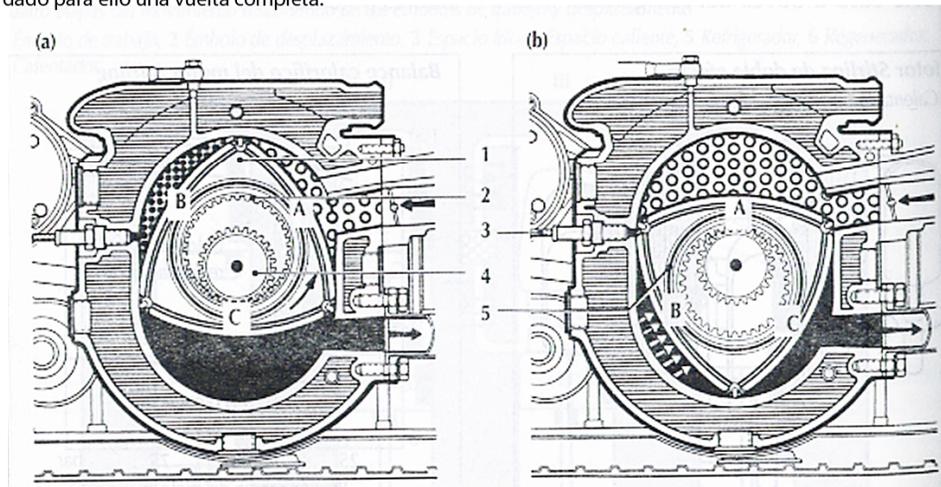
Figura 34. **Motor Wankel**



Fuente: Bosch, Manual de la técnica del automóvil. Pág. 415

Figura 35. **Funcionamiento del motor Wankel**

1 Émbolo, 2 Dentado en el interior del émbolo, 3 Bujía, 4 Piñón fijo, 5 Superficie de rodadura de la excéntrica
(a): La cámara A aspira, la cámara B comprime, de la cámara C escapan los gases quemados. **(b)**: La cámara A está llena de gas nuevo, en la cámara B se expanden los gases en combustión y hacen girar el eje por medio del émbolo, de la cámara C siguen saliendo los gases quemados. La fase siguiente corresponde de nuevo a la parte "a" del dibujo, sólo que en vez de la cámara A se presenta la cámara C. El émbolo ha realizado pues un tercio de giro (120°) de sus tres lados, todo el proceso de los cuatro tiempos, por lo que el eje excéntrico ha dado para ello una vuelta completa.



Fuente: Bosch, Manual de la técnica del automóvil. Pág. 414

Entre las ventajas de este motor podemos mencionar el uso de menos piezas móviles con lo cual se obtiene una mayor fiabilidad, suavidad de marcha, menor velocidad de rotación, menores vibraciones. Entre sus desventajas podemos decir que es más complicado ajustarse a las normas de emisiones contaminantes, al no ser tan difundido su costo de mantenimiento es elevado, difícil lograr una buena estanqueidad, entre otras.

Tras un uso ocasional en automóviles, como el Citroën GS Bimotor o el Mercedes Benz C-111, la compañía japonesa Mazda ha sido la que ha hecho un mayor uso de los motores Wankel. Mazda lanzó sus primeros autos con motor rotativo en 1970, aunque fueron bien aceptados llegaron en una época de grandes esfuerzos para reducir las emisiones y aumentar el ahorro de combustible, algo que no era posible en ese momento.

Mazda abandonó el uso del motor Wankel casi por completo usándolo únicamente en su mítico deportivo RX-7 hasta el fin de su producción en 2002. Pero en 2003 se relanzó el motor Wankel con el Mazda RX-8 que cuenta con una versión atmosférica birrotor, teóricamente más fiable y con menores consumos tanto de combustible como de lubricante.

3.1.5 Motor Stirling

Es un motor inventado en 1816 por el reverendo escocés Robert Stirling, luego de una serie e intentos por simplificar las máquinas de vapor consideradas riesgosas debido a que aún no se había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad. Es considerado un motor de combustión externa y de proceso adiabático, ya que no requiere quemar combustible en su interior y al operar no transfiere calor al entorno.

El principio de funcionamiento es el trabajo realizado por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) contenido en un lugar sellado. La calefacción hace que el gas se expanda y el enfriamiento hace que se contraiga, generando una fluctuación en la presión que actúa sobre el pistón para producir energía. Al ser necesaria una fuente de calor externa es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas (energía solar, todo tipo de combustibles, uso de la biomasa, energía geotérmica, etcétera).

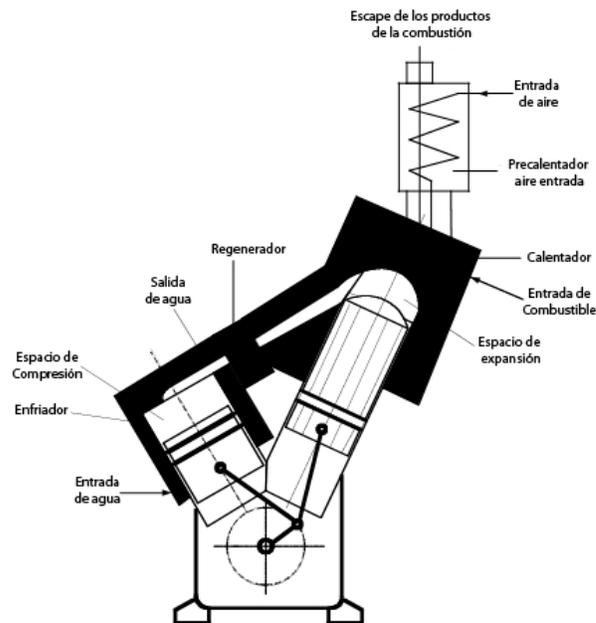
Existe un elemento adicional al motor, llamado regenerador, que aunque no es indispensable, permite alcanzar mayores rendimientos, se trata de un intercambiador de calor interno que tiene la función de absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo, consiste en un medio poroso con conductividad térmica despreciable, que contiene un fluido.

El motor Stirling es silencioso y no produce más sustancias contaminantes que las de la fuente de alimentación original. Dentro del motor se encuentra el gas en un compartimiento estanco, dividido en dos zonas, una caliente y otra fría, que corresponden con los dos ciclos de cada revolución. El calor hace expandirse al gas que se encuentra en la zona caliente, que presiona de esa forma un pistón que a su vez mueve una manivela a la cual se encuentra acoplado un volante. Al aumentar de volumen, el aire accede a la cámara fría, donde se contrae debido a la disminución de temperatura. Este hecho acciona el segundo pistón.

El motor Stirling es el único capaz de aproximarse (teóricamente lo alcanza) al rendimiento máximo teórico conocido como rendimiento de Carnot, aunque su rendimiento es superior, su potencia es inferior y el rendimiento óptimo sólo se alcanza a velocidades bajas.

Aunque en principio esta tecnología vio su fin con el invento de los motores Otto y Diesel, renació a inicios del siglo XX traído por la compañía Philips de Holanda. La segunda guerra mundial puso fin al desarrollo de este motor, y no fue sino hasta hace unos 25 años que volvieron a iniciar nuevas iniciativas y desarrollos. Hoy en día se utilizan motores Stirling para generar calor, para impulsar submarinos y se espera que puedan ser utilizados como motores en automóviles híbridos.

Figura 36. **Esquema del motor Stirling**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 89

3.1.6 Motor de turbina de gas

El motor de turbina de gas es un motor rotativo que realiza la combustión dentro de la máquina, donde se suministra combustible a un quemador, inflamándose con un exceso de aire comprimido (mezcla pobre).

Si bien es considerada como un motor de combustión interna y su ciclo tiene puntos en común con los ciclos Otto o Diesel, tiene una diferencia fundamental, se trata de una máquina de funcionamiento continuo, es decir, en régimen permanente cada elemento de ella está en condición estable, el ciclo de la turbina de gas es el ciclo Joule o Brayton, el cual se realiza normalmente como ciclo abierto, aunque es posible realizarlo como ciclo cerrado.

En las turbinas de gas para vehículos, el aire aspirado continuamente a través del filtro y un silenciador se comprime por lo general en un compresor radial y a continuación se recalienta más en un intercambiador de calor. En las actuales turbinas de gas para vehículos se realiza esto casi siempre en un regenerador rotatorio.

El aire comprimido y precalentado fluye entonces a la cámara de combustión, donde se calentará directamente por inyección y combustión de combustibles gaseosos, líquidos o emulsionados. Luego, la energía de los gases comprimidos y calentados se transmite a una, dos o tres etapas de turbina en uno a tres ramos de eje. Las turbinas de flujo radial o axial accionan en primer lugar el compresor y los aparatos auxiliares y transmiten la potencia restante al eje cardán a través de la turbina de trabajo, los engranajes reductores y los del cambio.

Para disminuir el consumo a carga parcial y en vacío, así como para mejorar el comportamiento en aceleración, la turbina de trabajo está provista, por lo general, de paletas conductoras regulables. Los gases enfriados parcialmente en la turbina por efecto de la expansión, fluyen por el lado del intercambiador de calor, donde ceden al aire la mayor parte de su calor residual. A continuación se expulsan al canal de escape, pudiendo ceder todavía calor a la calefacción del vehículo.

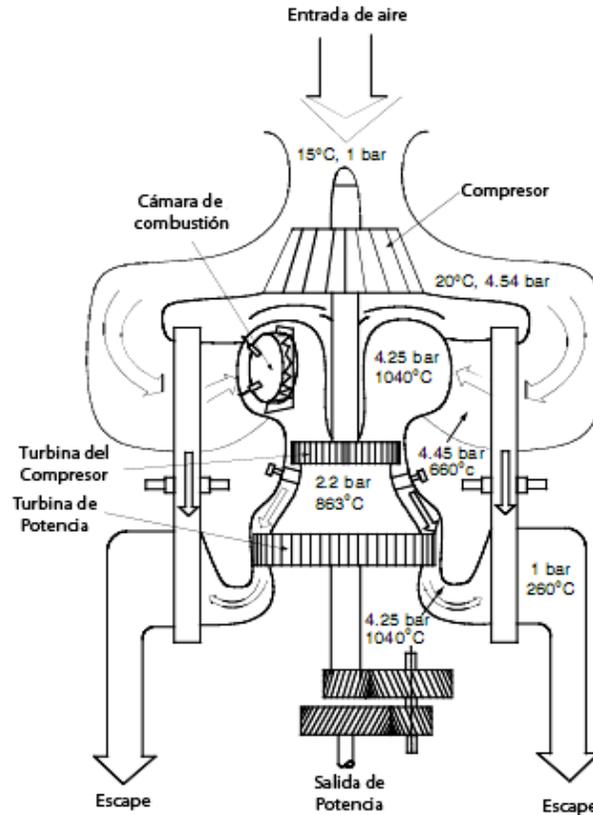
Entre las ventajas que tiene el uso de la turbina de gas están las siguientes:

- Es un motor compacto con alta velocidad de rotación
- Su operación es libre de vibraciones debido al movimiento de rotación
- Puede operar con una amplia variedad de combustibles
- Produce bajas emisiones de HC y CO comparado con un motor de combustión interna

Sus desventajas para aplicaciones automovilísticas serían:

- Altos niveles de ruido
- Alto consumo de combustible
- Se requieren altas velocidades de rotación para operar a su máxima eficiencia (en turbinas pequeñas)
- Es costosa debido a los materiales sofisticados necesarios para soportar las exigencias mecánicas y las altas temperaturas

Figura 37. **Motor de turbina de gas con intercambiador de calor**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 95

3.2 Tecnologías para aumentar la eficiencia

Los motores de combustión interna están siendo analizados desde dos puntos de vista. El primero considerándolo como la única fuente de propulsión y potencia en un vehículo convencional y el segundo considerándolo como un componente de un vehículo híbrido.

Toda tecnología aplicada al motor de combustión interna que esté destinada a hacerlo más eficiente y menos contaminante, se utiliza automáticamente tanto en un vehículo convencional como en un vehículo híbrido.

3.2.1 Parar y poner en marcha el motor

Es un sistema conocido como *Start & Stop*, o como sistema *ISG* (*Integrated starter/generator system*), desarrollado por los ingenieros de Bosch, está diseñado para que al detener el vehículo en vez de tener el motor en ralentí, este automáticamente se apaga, con esto se logra un ahorro de combustible y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ entre un 5% y un 8%.

Su funcionamiento es sencillo, cuando el conductor pisa el freno y el auto se detiene, el motor deja de funcionar. Cuando se suelta el freno, el motor arranca nuevamente, esto ocurre, por ejemplo, en un semáforo. Varias marcas de gama alta han incorporado este sistema, y se espera que lo adopten todos los vehículos en un futuro cercano.

El motor puede desgastarse, pues entre el apagado y el encendido prácticamente cesa el flujo de aceite en algunos elementos, dado que la bomba de aceite se detiene, esto es crítico en motores con turbo, el cual depende del aceite para la lubricación del eje y además, sigue girando por inercia cuando el motor se detiene, también puede existir un daño debido a la fluctuación de temperaturas, se pueden crear depósitos en las válvulas y verse afectado el catalizador entre otros, aunque los fabricantes aseguran que son sistemas diseñados, reforzados y probados para cumplir esta tarea.

El sistema se activa hasta que el motor llega a su temperatura óptima de funcionamiento, aunque en algunos vehículos lo hace cuando el vehículo supera los 10 Km/h. A partir de su activación la computadora del vehículo podrá apagar el motor cuando lo considere necesario. El motor se detiene cuando se pisa el freno y el vehículo disminuye su velocidad a menos de 5 Km/h y se enciende cuando se suelte el pedal de freno y se disponga a iniciar la marcha.

Aunque no se inicie la marcha, el sistema puede arrancar el motor automáticamente si el vehículo supera cierta velocidad por inercia, el aire acondicionado permanece encendido cierto tiempo o está a la máxima potencia, la batería se descarga por debajo de un mínimo determinado.

El sistema consta de una batería altamente resistente a los ciclos de carga y descarga, sensor de la batería, en algunos casos el motor de arranque se utiliza únicamente para el arranque en frío aunque en la mayoría se ha sustituido por un alternador reversible, que se encarga de poner en marcha el motor y de generar corriente como lo hace el alternador convencional, la ventaja de usarlo es que permite un funcionamiento más silencioso pues no utiliza engranaje sino que gira el motor utilizando la misma correa que luego mantiene en movimiento, además de una mayor rapidez de encendido (tan solo son necesarias 400 rpm contra 800 rpm de un motor de arranque convencional).

El complemento perfecto para un óptimo funcionamiento es el uso de una caja de cambios robotizada como es el caso de la caja SensoDrive en el Citroën C3.

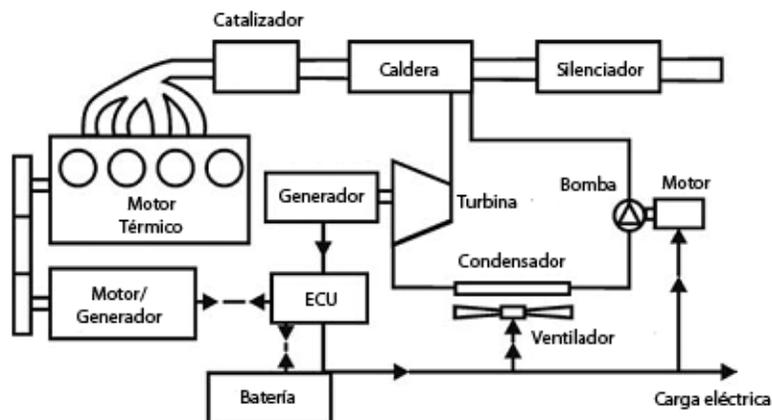
3.1.2 Recuperación de la energía térmica desechada por el escape y el radiador

Las leyes de la termodinámica no permiten que un motor pueda transformar íntegramente el calor generado por la combustión en energía cinética, y una parte de este calor es desechado al ambiente por medio de el radiador y el tubo de escape, lo que a su vez tiene un impacto ambiental.

El fabricante de autos BMW, es pionero en la investigación de un sistema que permita recuperar y aprovechar el calor desechado, están en desarrollo de un generador termoeléctrico (*TEG*) basado en el efecto Seebeck, que es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck, este efecto provoca la conversión de una diferencia de temperatura en electricidad y hacer uso de está para alimentar algunos elementos del vehículo, desde el radio hasta la iluminación.

BMW también ha diseñado cómo aprovechar el calor para producir vapor y utilizarlo para transmitir energía mecánica al cigüeñal, su nombre es Turbo-Steamer, y utiliza el ciclo Rankine para recuperar energía de los gases de escape. Con este sistema calculan poder recuperar casi el 80% del calor que se pierde por el escape. La disminución del consumo de combustible rondaría el 15%, se espera que esta tecnología este disponible para producción en serie a partir del año 2015.

Figura 38. **Esquema del Turbo-Steamer en un vehículo híbrido**



Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág. 381

3.2.3 Recuperación de la energía térmica desechada por partes electrónicas

La eliminación de calor residual de los microchips y otros componentes electrónicos, representa un desafío de ingeniería importante, haciendo necesario el uso de ventiladores y disipadores para poder deshacerse del calor. Algunos investigadores sugieren la idea de que es posible utilizar este calor residual y convertirlo en energía eléctrica reutilizable. Aunque admiten que el porcentaje puede ser mínimo, en conjunto con otros sistemas para la reutilización de la energía pueden lograr una mejor eficiencia.

3.2.4 Control variable de apertura de válvulas

Cuanto mayor es la cantidad de aire que penetra en el cilindro, mayor será la potencia que desarrolla el motor, para ello se cuenta con un sistema encargado de regular los tiempos de funcionamiento del motor, conocido comúnmente como la distribución del motor y que está compuesto por el árbol de levas junto con las válvulas. Cuanto más rápido gira un motor, más difícil resulta llenar los cilindros, puesto que las válvulas abren y cierran rápidamente. Lo ideal es que la válvula de admisión se abra un poco antes del inicio de la carrera de admisión, y la de escape lo haga un poco antes de iniciarse la carrera de escape, para ayudar así al vaciado y llenado de los cilindros.

El momento óptimo de apertura de las válvulas es diferente para cada régimen de giro del motor, por lo que resulta casi obligado sacrificar rendimiento en todos los regímenes de giro para obtener un resultado aceptable en todo momento.

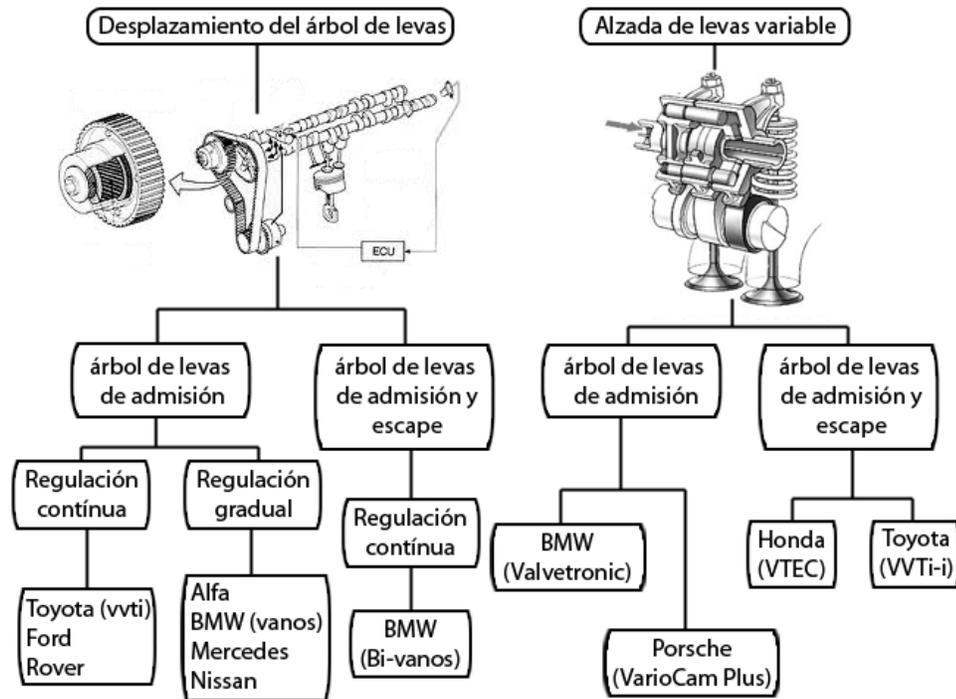
La función de la distribución variable es aumentar la potencia de un motor sin el uso de un turbocompresor, mejorando el llenado de los cilindros sin importar el régimen del motor, para ello cambia el momento de apertura y cierre de las válvulas de admisión y, en algunos modelos, las válvulas de escape. En sistemas más sofisticados puede controlar el tiempo que la válvula permanece abierta.

Hay dos sistemas fundamentales a la hora de variar la distribución:

- A. Desplazamiento del árbol de levas con respecto del cigüeñal
- B. Variación de la alzada de válvula, con ello se consigue modificar simultáneamente el avance y cierre de la válvula

En algunos vehículos se hace un uso combinado de estos sistemas con lo que se logran un mejor resultado. Cada fabricante de vehículos decide el sistema que más les conviene y que mejores resultados presenta.

Figura 39. **Clasificación de sistemas de distribución variable**



Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-distribucion/diagrama-bloques-distibucion.jpg>

3.2.5 Inyección directa estratificada

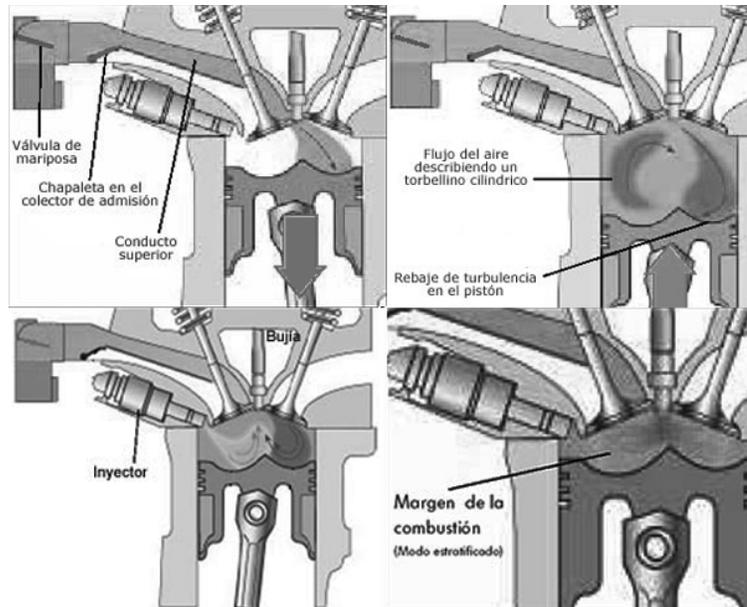
En la actualidad algunos fabricantes utilizan el sistema de inyección directa de gasolina, con presiones de inyección altas, los inyectores no se ubican en las toberas de admisión, sino que están incorporados de forma estratégica con un determinado desplazamiento lateral, por encima de las cámaras de combustión.

Los motores con este sistema funcionan con dos tipos de mezcla según sea la carga del motor: mezcla estratificada y mezcla homogénea, con lo que se reduce el consumo de combustible. La mezcla homogénea se utiliza en cargas y regímenes altos, la relación de aire y combustible es de $\lambda = 1$ hasta $\lambda = 1.55$. En este modo el combustible se inyecta en el cilindro durante el ciclo de admisión y se mezcla allí uniformemente con el aire aspirado, como se hace en los sistemas de inyección en el colector de admisión (*MPI, Multi-point fuel injection*).

El motor funciona en modo estratificado en regímenes medios de carga y revoluciones, este modo permite que el motor trabaje con un valor $\lambda = 1.6$ hasta $\lambda = 3$. Para que el motor inicie el modo estratificado tiene que encontrarse en el régimen de carga y revoluciones que le corresponde, no existir ningún fallo de relevancia en el sistema de gases de escape, la temperatura del líquido refrigerante debe superar los 50 °C y la temperatura del catalizador estar entre los 250 °C y 500 °C. En el modo estratificado se abre la mariposa lo más posible, para mantener reducidas las pérdidas por estrangulamiento.

La chapaleta en el colector de admisión cierra el conducto inferior en la culata. Debido a ello el aire de admisión se acelera y fluye describiendo un torbellino cilíndrico (conocido como efecto *tumble*) a través del conducto superior hacia el cilindro.

Figura 40. **Inyección directa estratificada**



Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/images-inyecc-direc/estratif-camara.jpg>

La inyección del combustible se realiza en el último tercio del ciclo de compresión. Comienza unos 60° y finaliza unos 45° antes del punto muerto superior. El momento de la inyección ejerce una influencia importante sobre la posición que adopta la nube de la mezcla en la zona de la bujía. Tras el posicionamiento exacto de la mezcla de combustible y aire en la zona de la bujía es cuando se produce el encendido. Durante esa operación sólo se inflama la nube de mezcla, mientras que los gases restantes actúan como aislantes. Esto hace que se reduzcan las pérdidas de calor en las paredes y aumente el rendimiento térmico del motor.

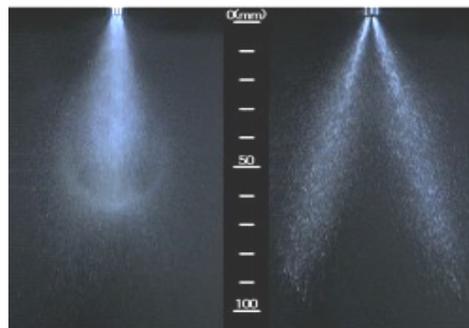
3.2.6 Inyección dual

El fabricante de vehículos Nissan ha sido pionero en el uso de este sistema en sus autos. La inyección dual o sistema de doble inyección de combustible hace uso de dos puertos de inyección por cilindro en vez de uno y funciona mediante la vaporización del combustible y reducción del diámetro de las gotas de combustible, reduciendo notablemente el diámetro de la aguja de inyección (hasta un 60% de reducción), por lo que las piezas son más pequeñas y fáciles de ubicar en el interior del motor.

Una de las ventajas del uso de este sistema es que se puede aumentar la eficiencia de combustible hasta un 4 por ciento, además, no necesita hacer uso de una bomba de combustible de alta presión por lo que se reducen los costos de producción y de mantenimiento.

En la siguiente figura, podemos notar una comparación entre la forma de la inyección en un sistema dual y la tradicional. La imagen de la izquierda muestra la inyección que produce el sistema dual, se puede apreciar una aspersión más compacta y un menor diámetro en la aguja de inyección.

Figura 41. **Inyección dual**



Fuente: <http://static.blogio.it/automocionblog/nuevo-sistema-de-inyeccion-dual-de-nissan/02.jpg>

3.3 Nuevos diseños

Con la introducción al mercado automotriz de los vehículos híbridos, los fabricantes han realizado diseños específicos en cuanto a la gestión de la energía se refiere, haciendo que estos vehículos sean más eficientes.

3.3.1 Cierre de todas las válvulas

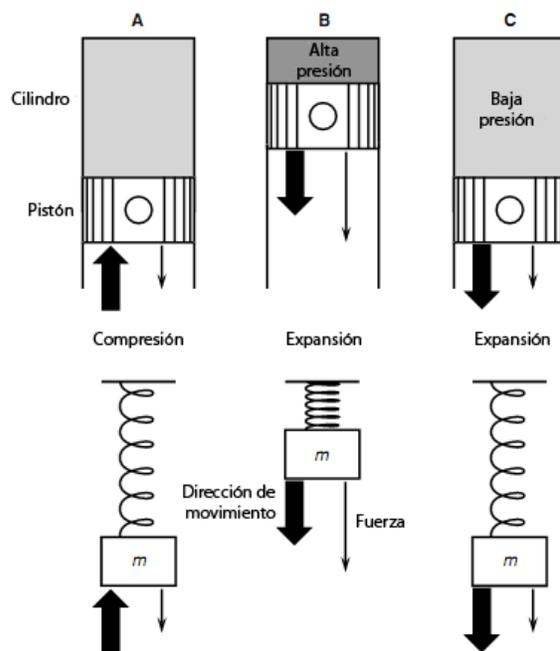
En los vehículos híbridos se cuenta con el sistema de freno regenerativo, que es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica que será almacenada, para un uso futuro, en las baterías. El par generado durante la frenada regenerativa se utiliza para impulsar el generador, pero en los híbridos en paralelo debe impulsar también al motor térmico debido al modo en que están contruidos. El par generado por la frenada regenerativa se divide entonces de la siguiente forma:

$$(\text{Par de frenado}) = (\text{Par del motor térmico}) + (\text{Par del generador})$$

El par del motor térmico es usado solamente para mantenerlo en movimiento, pues en este vehículo está directamente acoplado con el generador, mientras el par del generador es el responsable de impulsar al generador para devolver energía a la batería. Si el par del motor es grande, entonces el par del generador será pequeño, produciéndose un desperdicio de la energía. Por lo tanto, el objetivo es hacer el par que impulsa al motor lo más pequeño posible.

El fabricante de autos Honda, utiliza en el Civic Hybrid desde el 2006 una función en el motor térmico que cierra todas las válvulas durante la función de frenada regenerativa. Al cerrar todas las válvulas se captura el gas dentro de los cilindros. El resultado es que el gas se comporta de modo similar a un resorte, en un sistema de masa y resorte como se muestra en la figura siguiente.

Figura 42. Cierre de todas las válvulas



Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág. 384

La flecha gruesa muestra la dirección de movimiento de el pistón o masa, m . La flecha delgada muestra la fuerza que actúa sobre el pistón. Cuando las flechas están en dirección opuesta, figura A, la energía es removida del motor. Cuando las flechas están en la misma dirección, figuras B y C, la energía es devuelta al motor.

Con todas las válvulas cerradas, no ocurren pérdidas por bombeo. En una revolución, muy poca energía se pierde, lo que significa que en promedio, el par del motor será pequeño, por lo tanto, el par del generador será más grande.

3.3.2 Desactivación de cilindros

También llamada cilindrada múltiple (*multiple displacement*), cilindrada a petición (*displacement on demand, DOD*) o gestión variable de cilindros (*variable cylinder management*), es una tecnología que desactiva algunos de los cilindros del motor, variando así la cilindrada nominal del motor, para mejorar la economía de combustible, principalmente utilizada en motores de gran cilindrada y varios cilindros. Muchos fabricantes de automóviles la han adoptado a partir de 2005, aunque el concepto existe desde mucho tiempo atrás.

El predecesor más antiguo de este sistema, desarrollado a finales del siglo XIX, fue un motor estacionario que utilizaba un regulador centrífugo que cortaba la operación del cilindro cuando el motor alcanzaba una velocidad predeterminada, lo hacía manteniendo abierta la válvula de escape.

Los primeros experimentos con múltiples cilindros fueron realizados durante la segunda guerra mundial, aunque fueron retomados hasta 1981 por el fabricante de automóviles General Motors en su Cadillac, con motor V8-6-4 (L62), en asociación con Eaton Corporation, que a su vez se convirtió en el primer motor de la industria en utilizar una Unidad de Control del Motor (*ECU*), la cual se encargaba de cambiar el modo de operación del motor de 8 a 6 o de 6 a 4 cilindros, dependiendo de la cantidad de potencia requerida.

Mitsubishi le siguió los pasos, en 1982 desarrolló su propio sistema de desplazamiento variable, llamándolo Desplazamiento Modulado (*MD*), aplicándolo en un motor de 4 cilindros, el L4G112 de 1.4L, para luego ser usado en motores V6. El uso de ese sistema duró poco, principalmente debido a la falta de respuesta de los compradores.

En 1993, un año después que Mitsubishi desarrolló su tecnología de control variable de válvulas (*vvt*), utilizó una variante del *MD*, llamada MIVEC-MD, dependiendo de las condiciones podía reducir entre 10% y 20% el consumo de combustible; aunque gran parte de esta ganancia se debía al sistema *vvt*, este sistema fue abandonado en 1996. Luego solamente Mercedes-Benz experimentó con su Desplazador-Múltiple en un V12 a finales de la década de 1990.

Este tipo de tecnología no fue aceptada hasta el 2004 cuando Daimler Chrysler lo incorpora en su famoso motor Hemi. Otros sistemas aparecieron en 2005 cuando General Motors lanzó el *Active Fuel Management* y Honda el sistema *Variable Cylinder Management (VCM System)*.

Básicamente en los motores de gran cilindrada trabajando en carga ligera, por ejemplo a velocidad de crucero, cerca del 30% del potencial de energía es usado. Bajo estas circunstancias, la válvula de mariposa está ligeramente abierta y el motor tiene que forzarse para lograr un buen flujo de aire. El resultado es una condición conocida como pérdida por bombeo. La desactivación de los cilindros obliga a la válvula de mariposa a abrirse completamente para tener una potencia constante y a la vez permitir que el motor respire mejor, reduciendo la resistencia de los pistones y las consiguientes pérdidas por bombeo.

La desactivación de los cilindros consiste simplemente en mantener cerradas las válvulas de admisión y escape durante un ciclo en un conjunto particular de cilindros en el motor. Dependiendo del diseño del motor, el movimiento de las válvulas puede ser controlado con uno de los dos métodos comunes siguientes:

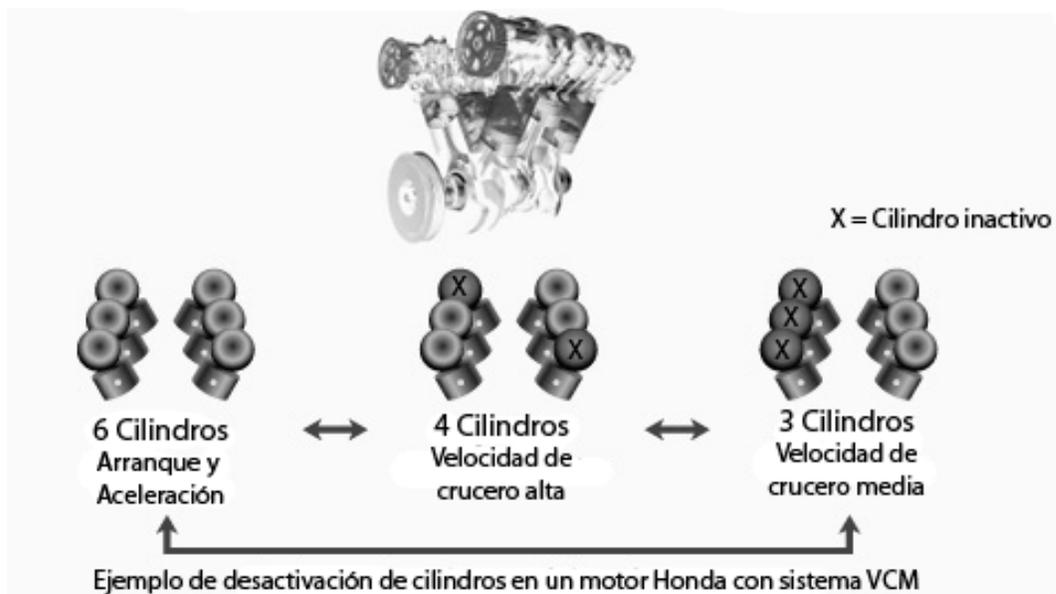
Para los diseños de motor con varilla de empuje, cuando se desactiva el cilindro, los elevadores o taques hidráulicos se bloquean, utilizando un solenoide para alterar la presión de aceite que les es entregada. Los elevadores, entonces, son incapaces de elevar las varillas de empuje, con lo cual no se activan los balancines, dando como resultado que las válvulas permanezcan cerradas.

Para los diseños de motor con eje de levas a la cabeza, generalmente se utilizan un par de balancines, unidos y bloqueados por un pasador, por cada válvula. Uno de los balancines sigue el perfil de la leva mientras el otro actúa sobre la válvula. Cuando el cilindro es desactivado, un solenoide que controla la presión del aceite libera el pasador de bloque que une los dos balancines, en este momento uno de los balancines sigue moviéndose con el perfil de la leva pero el otro permanece inmóvil e incapaz de accionar la válvula.

Para completar el proceso, el suministro de combustible de cada cilindro inactivo es desactivado electrónicamente desconectando los inyectores. La transición entre el funcionamiento normal y la desactivación de cilindros es suave gracias a los cambios sutiles en el encendido y la sincronización del árbol de levas, así como la posición del acelerador, todo ello gestionado por sofisticados sistemas de control electrónico.

En el caso del sistema que utiliza Honda funciona desactivando un grupo de cilindros específicos, mientras que el sistema usado en el motor Hemi de Chrysler desactiva los cilindros de forma intercalada, es decir uno activo el siguiente desactivo, siguiendo el orden de encendido.

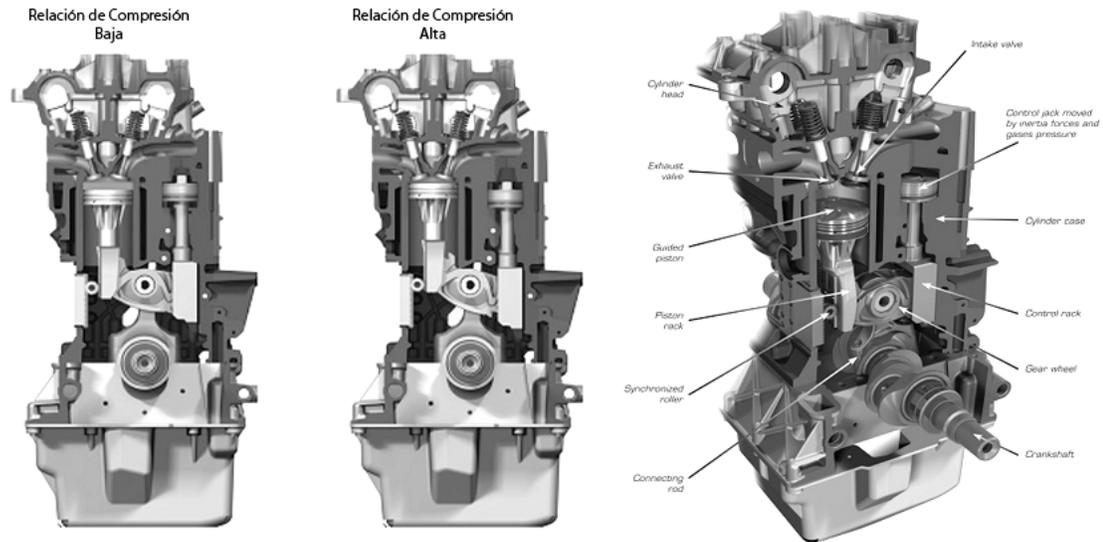
Figura 43. **Desactivación de cilindros**



Fuente: http://hondaoldies.de/Korbmacher-Archiv/Technik/accord08_VCM.jpg

Existe otra forma en que se puede modificar la cilindrada del motor por el acortamiento o alargamiento de la carrera del pistón, variando así la cilindrada nominal sin desactivar los cilindros, aunque aún no existen vehículos que utilicen este método, el fabricante de autos Peugeot, en estrecha cooperación con la empresa MCE-5 Development han estado desarrollando esta tecnología que lleva gestándose desde el año 1997 y consiste en un motor con una relación de compresión variable desde 7:1 hasta 20:1, controlado por un sistema computarizado altamente avanzado.

Figura 44. Esquema del motor MCE-5 VCRI



Fuente: <http://www.spiegel.de/images/image-189784-galleryV9-gwdg.jpg>

3.3.3 Motor de ciclo Atkinson

El motor de ciclo Atkinson es un tipo de motor de combustión interna, inventado en 1882 por el ingeniero inglés James Atkinson, su ciclo está diseñado para aumentar la eficiencia aunque eso implique obtener una menor cantidad de potencia.

El ciclo Atkinson original permitía completar las carreras de admisión, compresión, fuerza y escape en una sola vuelta del cigüeñal haciendo uso de una mecánica compleja entre el pistón y el cigüeñal, se diseñó así para evitar infringir algunas patentes de las muchas variantes que existían del motor de ciclo Otto. Aunque el motor de Atkinson quedó como dato histórico, su ciclo de funcionamiento está siendo aplicado en algunos de los motores usados en vehículos híbridos.

En los motores con ciclo Otto, el volumen de la carrera de compresión es prácticamente idéntico al volumen de la carrera de expansión. El ciclo Atkinson es más eficiente, ya que consigue relaciones de compresión más altas logrando un rendimiento termodinámico superior. Un problema clásico en los motores a gasolina es que este combustible cuando se encuentra demasiado comprimido tiende a detonar, lo que se conoce como autoencendido.

El ciclo Atkinson logra aumentar la relación de compresión y a la vez evitar que la gasolina detone antes de tiempo, retrasando el cierre de las válvulas de admisión, esto se hace por dos motivos, por un lado mientras la válvula de admisión no esté completamente cerrada no existe una compresión real, por lo tanto no existe riesgo de detonación. Por otro lado permite que la presión que genera el pistón en su carrera ascendente llene el colector de admisión, que se encuentra a una presión inferior a la atmosférica, logrando aumentar la presión en el colector para los próximos llenados minimizando así las pérdidas por bombeo.

Prácticamente la carrera de compresión se divide en dos pasos, el primero con la válvula de admisión aun abierta y el segundo con la válvula cerrada, por esta razón algunos denominan al ciclo Atkinson como un ciclo de cinco tiempos:

- admisión
- reflujo de gases
- compresión
- expansión
- escape.

La relación de compresión real para estos motores puede ser de 9:1 o 10:1, pero la de expansión puede ser 12:1 o 13:1, generando más trabajo y rendimiento térmico. Con menos mezcla en el cilindro es posible subir la relación de compresión sin riesgos de detonación y lograr una combustión más eficiente, aunque con ello se genere menos potencia.

Los vehículos híbridos han retomado el uso de este ciclo en sus motores y han logrado buenos resultados al combinarlo con nuevas tecnologías. Por ejemplo, no es conveniente retrasar el cierre de las válvulas de admisión en todos los regimenes del motor, la solución la ha dado el uso del control variable de válvulas, y la disminución de potencia que ocasiona el uso de este ciclo no es problema en los vehículos híbridos, al momento de necesitarla es otorgada por el motor eléctrico.

3.3.4 Motor de ciclo Miller

El ciclo Miller fue el resultado de alguien que deseó ir más allá de lo conseguido por Atkinson. Fue patentado por el ingeniero norteamericano Ralph Miller, en la década de los años 1940. Este ciclo sigue los pasos del Atkinson, hasta el punto que los motores que lo aplican son llamados en ocasiones Atkinson-Miller.

El ciclo Miller permite trabajar con altas relaciones de compresión sin peligro de producirse una detonación anticipada del combustible. Esto se consigue por medio de un cilindro muy grande con respecto al volumen de la cámara de combustión. La ventaja de estos motores viene de la variación de volumen disponible para realizar la expansión. Al ser el volumen del cilindro tan grande, los gases consiguen expandirse completamente. En el momento de abrir la válvula de escape no existe presión residual en el interior del cilindro.

Hace uso de un compresor y un *intercooler* en la admisión para mejorar el llenado debido a que tiene un tiempo muy limitado de apertura de la válvula de admisión, aumenta su efectividad en la medida en que el compresor volumétrico pueda comprimir la mezcla empleando menos energía que la requerida en un motor Otto para hacer el mismo trabajo.

El aire de admisión primero es comprimido por el compresor volumétrico y luego es enfriado por el *intercooler*, esta temperatura de entrada de aire más baja en el interior del cilindro, junto con la mayor densidad del aire debida a la precompresión, hace que la temperatura que alcanza la mezcla al final de la carrera de compresión sea considerablemente más baja, evitando con esto que la mezcla detone antes de tiempo.

Mazda utilizó este ciclo, limitando el llenado del cilindro al prolongar la apertura de la válvula de admisión durante una parte de la carrera de compresión del pistón, lo denominó M-Miller, y que se produjo en serie a partir de 1993 en el vehículo Mazda Millenia, conocido también como Xedos 9 en Europa y como Eunos 800 en Japón, convirtiéndose en el único vehículo en producción en el mundo en utilizar un motor con ciclo Miller, actualmente el Mazda 2 tiene esta característica.

3.3.5 Ciclo Stirling

Una de las mayores dificultades para utilizar motores Stirling en vehículos convencionales (no híbridos) es que resulta difícil construir un motor que logre buena rapidez de respuesta, una ventaja que tiene el motor de combustión interna de ciclo Otto, si presionamos el acelerador, el aumento de potencia será inmediato y si lo soltamos, la reducción también será casi instantánea. En el motor Stirling esta respuesta es demasiado lenta, por tal razón el vehículo acelerará y decelerará muy despacio.

A pesar de estas limitaciones Ford, General Motors (GM) y American Motors Corp. (AMC) emplearon millones de dólares desarrollando motores Stirling para sus autos antes de la década de 1970.

Muchos prototipos fueron construidos y probados. Luego el precio del petróleo descendió en la década de 1980 y las personas compraron autos de dimensiones grandes sin preocuparse por su rendimiento. A pesar de ello no hay aparentemente una buena razón para construir un motor que sea más eficiente que el motor de combustión interna, pero que no parta de forma instantánea.

Dadas las características del motor Stirling, en la actualidad se están desarrollando investigaciones para analizar la conveniencia de utilizarlo como fuente motriz en vehículos híbridos, ya que la falta de respuesta inmediata que presenta este motor puede ser suplida en estos vehículos por el motor eléctrico y dentro de esta área, se piensa más apropiado su uso en vehículos híbridos de configuración en serie.

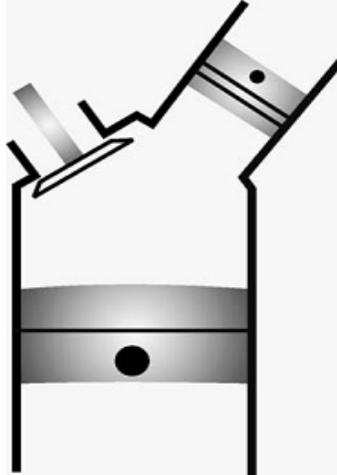
El fabricante de automóviles estadounidense General Motors Company, está actualmente desarrollando y construyendo motores Stirling, como parte de un contrato con el Departamento de Energía de Estados Unidos, haciendo uso del hidrógeno como fluido de trabajo.

3.3.6 Motor Alvar

El motor Alvar es un invento del Sr. Alvar Gustafsson de Skärblacka, Suecia. Utiliza una relación de compresión variable y cilindrada variable. Se trata de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, con cuatro cilindros, cada uno de los cuales se comunican con su cilindro auxiliar correspondiente. La relación de compresión puede variarse por medio de los cilindros auxiliares, que están en comunicación con las cámaras de combustión principal, y que contienen pistones impulsados por un cigüeñal, diferente del cigüeñal principal, que es impulsado por un motor eléctrico.

Este motor puede o no, tener impacto sobre los vehículos híbridos en el futuro, aún se encuentra en desarrollo e investigación, existe la posibilidad que logre disminuir en buena medida las emisiones y aumenta la eficiencia en el consumo de combustible.

Figura 45. **Esquema de motor Alvar**

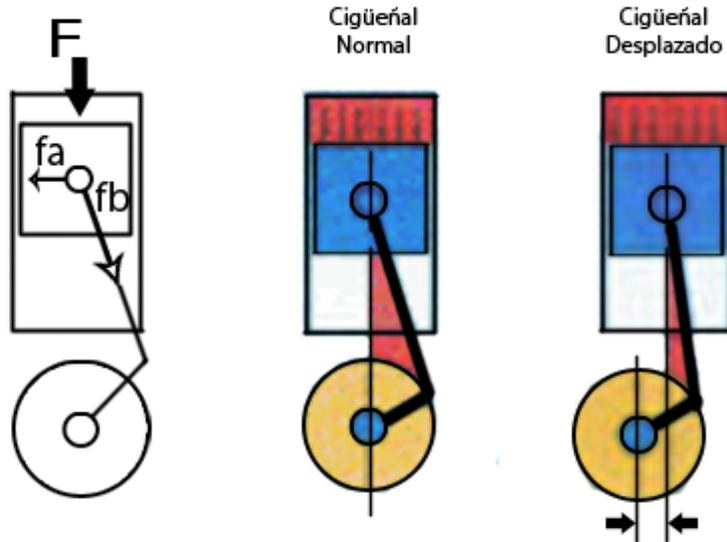


Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág.389

3.3.7 Cigüeñal de compensación

También conocido como cigüeñal desplazado. En un caso normal el eje del cilindro interseca el eje del cigüeñal. El eje cigüeñal puede ser desplazado lateralmente de tal forma que los dos ejes no se intersecten. Esto se hace con el fin de reducir la fricción en el cilindro, a su vez se cambia el tiempo que el pistón se encuentra cerca del punto muerto superior logrando un mayor tiempo de combustión.

Figura 46. Cigüeñal desplazado



Fuente: <http://www.todomotores.cl/competicion/images/desplazado.jpg>

Cuando la biela de un motor se inclina, produce una descomposición de la fuerza generada por la combustión, representada por la letra F , en una componente f_b que ejerce la fuerza a través de la biela, y la otra componente f_l que ejerce la fuerza en forma perpendicular a la fuerza F , produciendo una carga lateral del pistón sobre el cilindro.

Para contrarrestar esta fuerza, de manera que el cilindro no sufra desgaste excesivo, se dispone el cigüeñal desplazado, permitiendo así, disminuir la componente de fuerza lateral durante la carrera de expansión (trabajo).

3.3.8 Motor de pistones libres

Es un diseño poco convencional de motor que actualmente atrae la atención como alternativa a los motores de pila de combustible. El motor de pistón libre no es un invento nuevo, data de los años 1920, fue propuesto por el abogado argentino e inventor especializado en hidroaviones, helicópteros, motores y compresores, Raúl Pateras Pescara de Castelluccio y su aplicación original fue en un compresor de aire de un solo pistón.

A diferencia de los motores de combustión tradicionales, en este motor no existe una conexión entre el pistón y el cigüeñal, de allí su nombre de pistón libre. Al existir menos fricción, el motor trabaja con más eficiencia que los generadores convencionales o los de pila de combustible.

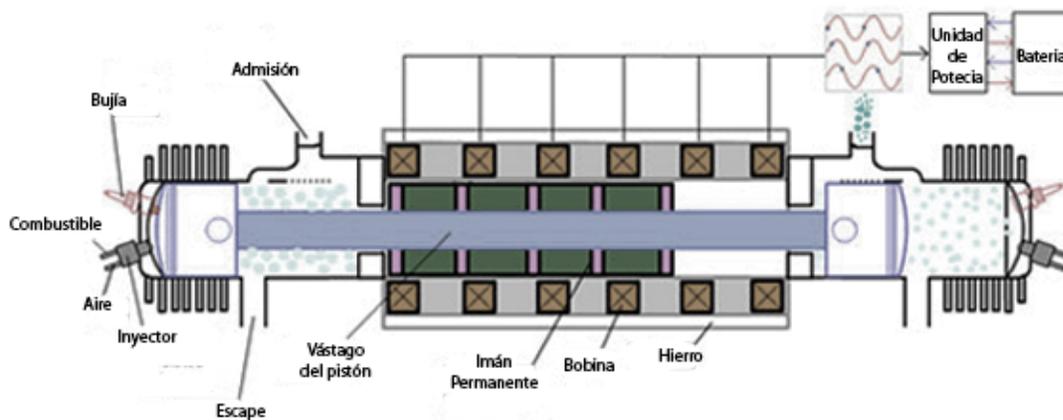
El motor de pistón libre tiene un eje recto que se mueve hacia adelante y hacia atrás con un pistón en ambos extremos. La porción central del eje tiene imanes que se mueven con él, lo que origina que a su paso reaccione con bobinas para generar electricidad.

El motor puede llegar a ser un 50% más eficiente generando electricidad que los generadores convencionales, en gran parte, porque utilizan menos partes móviles. Puede hacer uso de una gran variedad de combustibles, como hidrógeno, gas natural, etanol, gasolina o diesel, dándole así una ventaja sobre las células de combustible, de manera que los consumidores podrían usar el combustible más económico disponible. Entre sus desventajas podemos mencionar que son ruidosos, generan mayor contaminación y son difíciles de controlar.

Los fabricantes de automóviles General Motors, Lotus y Volvo, realizan investigaciones sobre su posible instalación en futuros vehículos, aunque la mayoría de investigadores solamente realizan simulaciones por computadora, el grupo de investigación de Sandia National Laboratory han llegado a probar físicamente los componentes en motores de pistón libre.

Uno de sus principales objetivos es el de amortiguar el ruido producido por las explosiones más aceleradas. Aunque el mayor reto reside en el control, ya que se hace necesario algún tipo de mecanismo activo de control que asegure que cada ciclo sea igual al anterior, pues las variaciones pueden ocasionar una pérdida de rendimiento y un aumento en las emisiones.

Figura 47. **Motor de pistones libres**



Fuente: <http://thekneeslider.com/images/freepistonengine.gif>

4. SISTEMAS DE CONTROL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Desde su concepción, los motores de combustión interna han tenido la necesidad de utilizar un sistema de control capaz de regular la mezcla combustible y aire que ingresa en el cilindro, la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, el momento preciso de activación de la chispa en la bujía, entre otras cosas.

Con el tiempo las exigencias tanto en rendimiento y potencia hicieron necesario el uso de un control más preciso y flexible, aunando posteriormente la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes y mejorar la eficiencia en el consumo de combustible, el uso de controles electrónicos se han convertido en una parte indispensable en los vehículos.

4.1 Historia del sistema de control automotriz

En la primera parte del siglo XX los automóviles necesitaban la intervención del conductor, desde el arranque mismo que se hacía a través de una manivela que se acoplaba directamente al cigüeñal. Este método fue sustituido formalmente en 1914 por el motor de arranque eléctrico inventado por Robert Bosch.

En algunos vehículos, como el Ford modelo T de 1920, el conductor tenía el control sobre el tiempo de encendido, utilizaba una palanca para modificar el avance o retardo de la chispa, lo cual fue sustituido por un control centrifugo para el avance de la chispa.

La composición de la mezcla (relación aire/combustible), también era controlada por el piloto, los avances en los carburadores eliminaron la tarea de controlar de forma manual la mezcla.

En la década de 1950 un nuevo tipo de contaminación, conocida como *smog* fotoquímico, fue descrita por primera vez luego que científicos tomaran muestras de aire en Los Ángeles, California. El *smog* fotoquímico es la reacción química de la luz solar con óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos volátiles en la atmósfera. Los automóviles fueron considerados entre los principales culpables. Fue entonces que los gases de escape fueron agregadas como nuevas variables a controlar por los ingenieros, lentamente, el *smog* introdujo una nueva dimensión en el control de emisiones en los automóviles.

Control en los gases de escape fueron requeridos en todos los modelos del año 1966 puestos a la venta en el estado de California (Estados Unidos), siendo requerido en todos los estados a partir de 1968. Los controles en el motor en la década de 1980 evolucionaron para lograr dominar la economía de combustible y el nivel de emisiones contaminantes.

4.2 Ejemplo de control de los años 1980

Reducir contaminantes era obligado para los fabricantes de automóviles, pero en la década de 1980 se había convertido en algo bastante complejo, haciendo necesario el uso de sistemas de control electrónico. El modelo híbrido digital fue popular en la mitad de esta década, utilizaba técnicas analógicas para tomar medidas y procesaba los parámetros de entrada del motor, luego usaba una tabla almacenada en una memoria de solo lectura para obtener los valores de salida. La desventaja de este sistema es que los valores preprocesados son sólo óptimos para un motor nuevo, ideal.

El balance entre la economía de combustible y los niveles de contaminación se llevó a cabo mediante:

- Control de la sincronización del encendido
- Control optimizado de la relación aire/combustible
- Recirculación de los gases de escape (*EGR*)
- Prevención del golpeteo en el motor
- Diagnóstico de fallas en el motor y en los sensores

Para obtener y mantener la relación estequiométrica aire/combustible, era necesario utilizar sensores de:

- Temperatura
- Contenido de oxígeno
- Caudal de combustible
- Presión
- Posición de la mariposa

4.3 Función del sistema de control

Las principales funciones del sistema de control del automóvil son mejorar el consumo de combustible y minimizar las emisiones de gases de escape. Como funciones secundarias se incluye el monitoreo de componentes y su protección.

En principio los sistemas de control se dedicaron a obtener y procesar solo los parámetros del motor para variar los valores de salida, sistemas posteriores procesarían estas salidas de forma dinámica logrando mejores resultados utilizando una mayor cantidad de sensores y actuadores.

Los sistemas de control se volvieron cada vez más sofisticados, los modernos utilizan un microprocesador que procesa las entradas de los sensores del motor en tiempo real, ya que reciben entradas de otras fuentes, controlando más partes del motor; como por ejemplo, los sistemas de control del tiempo de distribución de válvulas son controladas electrónicamente, al igual que el turbocompresor.

Posteriormente, la electrónica llegó a ser utilizada en sistemas de seguridad, asistencia y confort del vehículo; el uso de una sola unidad para controlar las variables era complicado, se decidió por utilizar una unidad de control por sistema, es así como los vehículos cuentan con unidad de control para el motor, unidad de control de transmisión, unidad de control para sistemas de seguridad como: frenos antibloqueo, control de tracción, bolsas de aire, entre otros. Y en los vehículos híbridos debemos agregar que se debe controlar el estado de carga de la batería, temperatura de la batería, sobrecalentamiento del motor eléctrico, por mencionar algunos.

4.4 Beneficios adicionales del sistema de control

Otra función del sistema de control, que si bien tiene un costo bajo en la producción, pero que es casi invaluable en la práctica, es la capacidad de diagnóstico, lo que permite una comunicación directa con la unidad de control para poder determinar fallas en los componentes del sistema. Al conjunto de actuadores, sensores y software de diagnóstico se le denomina sistema de diagnóstico a bordo, *OBD*, por sus siglas en inglés.

Uno de los principales propósitos de los sistemas *OBD* es asegurar un adecuado funcionamiento en los sistemas de control de emisiones durante toda la vida útil del vehículo. Son capaces de detectar problemas que afectan el nivel de emisiones que generalmente pudieran ser pasados por alto en una inspección tradicional, fundamentalmente por el hecho de que muchas de las causas asociadas a altos niveles de emisiones son de naturaleza eléctrica o química.

Cuando el sistema de diagnóstico a bordo determina que existe un problema, un correspondiente código de falla es almacenado en la memoria de la unidad de control (computadora) y una luz en el tablero informa al conductor que un problema ha sido detectado y que el vehículo requiere ser revisado. Una vez en el taller, técnicos entrenados con herramientas adecuadas pueden extraer de la memoria del computador los códigos de falla y asociarlos a problemas específicos, aumentando la rapidez y eficiencia en la solución de problemas.

4.5 Descripción de Unidad de Control Electrónico (ECU)

Al inicio era utilizada exclusivamente para controlar el motor por lo que se le llamó Unidad de control de motor, *ECU (Engine Control Unit)*, comúnmente conocida como centralita o computadora del vehículo, es la encargada de administrar varios aspectos de la operación del motor de combustión interna. Las unidades de control más antiguas solamente controlan la cantidad de combustible que es inyectado en cada cilindro en cada ciclo del motor. Las más avanzadas controlan el punto de ignición, el tiempo de apertura/cierre de las válvulas, el nivel de impulso mantenido por el turbocompresor, entre otros parámetros.

En la actualidad, las unidades de control pueden llegar a tener unos cincuenta microprocesadores entre sus componentes, esto, lejos de complicar la tarea al trabajar en el vehículo, hacen más sencillo su mantenimiento.

Algunas de las razones para aumentar el número de microprocesadores son:

- La necesidad de sofisticados controles de encendido, para lograr alcanzar los estándares de emisiones y de la economía de combustible
- Diagnóstico avanzado
- Simplificación de la manufactura y del diseño de los vehículos
- Reducción del cableado en los vehículos
- Nuevos dispositivos de seguridad y confort

En los vehículos híbridos actuales es necesario utilizar varias unidades de control electrónico (también llamadas *ECU*, *Electronic Control Unit*), debido a la importancia de los sistemas que debe mantener vigilados.

4.5.1 ECU del sistema híbrido

La *ECU* del sistema híbrido detecta la cantidad de esfuerzo aplicado al pedal del acelerador de acuerdo con las señales procedentes del sensor de la posición del pedal del acelerador, recibe la señal de la posición de cambios procedente del sensor de la posición de cambios, determina las condiciones de marcha del vehículo de acuerdo con estas piezas de información, y controla óptimamente las fuerzas motrices del motor eléctrico y del motor térmico.

Adicionalmente, controla óptimamente la salida y el par de estas fuerzas motrices para conseguir un bajo consumo de combustible y unas emisiones de escape más limpias, además del estado de carga y la temperatura de la batería.

Cuando la posición de la palanca de cambios está en “N” (Neutro), la *ECU* efectúa el control de desconexión para detener el motor eléctrico. El control de asistencia en cuestas evita que el vehículo ruede hacia atrás cuando se suelta el freno durante el arranque en una cuesta pronunciada. Si las ruedas motrices giran sin tracción, efectúa el control de la tracción del motor que proporciona una restricción en la rotación del motor eléctrico para proteger la unidad de engranajes planetarios y evitar que genere demasiada electricidad.

4.5.2 ECU del motor

La *ECU* del motor térmico recibe los datos de la velocidad del motor propuesta y de la fuerza motriz del motor requerida, enviados desde la *ECU* del sistema híbrido y controla el volumen de la inyección del combustible, la distribución de encendido, el sistema de distribución variable y, en el caso de Toyota, el sistema *ETCS-i* (*Electronic Throttle Control System with intelligence*).

La *ECU* del motor transmite la condición de operación del motor a la *ECU* del sistema híbrido, también es la encargada de parar el motor al recibir la señal de parada procedente de la *ECU* del sistema híbrido de acuerdo a los requerimientos de potencia y energía del vehículo. Cuando ocurre un mal funcionamiento en el sistema es la encargada de encender la luz de aviso de comprobación del motor.

4.5.3 ECU del motor/generador

Es la encargada de proporcionar seguridad y fiabilidad al motor/generador basado en la medición de su temperatura y de las revoluciones a las que gira. Responde a los comandos de la *ECU* del sistema híbrido para cambiar de motor eléctrico a generador y viceversa.

4.5.4 ECU de partes electrónicas

No basta con tener energía almacenada en una batería, dicha energía debe ser administrada ya sea llevándola al motor eléctrico con el voltaje y la corriente necesaria, o haciendo que el generador acepte la energía proveniente del sistema de freno regenerativo para utilizarla en el motor eléctrico o almacenarla en la batería.

Esta administración de energía se lleva a cabo por un complejo sistema electrónico conocido como: Electrónica de potencia, que está comandada por su propia unidad de control, que en el caso particular de Toyota le ha llamado *IPM (Integrated Power Module – Módulo de alimentación integrado)*.

La electrónica de potencia puede ser costosa, voluminosa y generar una cantidad considerable de calor. Cuanto menor sea la eficiencia de sus componentes electrónicos, mayor es la necesidad de enfriamiento. La *ECU* de las partes electrónicas tiene como función recibir comandos de la *ECU* del sistema híbrido para controlar el cambio en el flujo de energía en ambos sentidos, para controlar la conmutación entre el motor eléctrico y el generador, y para controlar la secuencia de arranque del motor térmico.

A pesar de tener una eficiencia alta, la electrónica de potencia genera un calor considerable, haciendo esencial que la *ECU* vigile y proteja los transistores de alta potencia.

4.5.5 ECU de la batería o sistema de administración de batería

La unidad de control electrónico de la batería, también conocida como *BMS (Battery Management System)*, es la encargada monitorear, calcular, reportar, proteger, controlar y/o balancear el conjunto de batería recargable.

A. Monitorea variables como:

- Voltaje: total, periódico o individual de cada celda
- Temperatura: promedio, de aire de entrada, de aire de salida o individual de cada celda

- Estado de carga: conocido como *SOC (State Of Charge)* o *DOD (Depth Of Discharge)*, el cual se calcula estimando el amperaje de carga y descarga
- flujo de aire: utilizado para el enfriamiento de la batería
- corriente: que circula dentro y fuera de la batería

B. Calcula valores basándose en las siguientes variables:

- Máxima corriente de carga: conocida como Límite de Corriente de Carga (*Charge Current Limit, CCL*)
- Máxima corriente de descarga conocida como Limite de corriente de descarga (*Discharge Current Limit, DCL*)
- Energía total entregada desde su fabricación
- Tiempo total de funcionamiento desde su fabricación.

C. Puede informar de todos los datos anteriores a un dispositivo externo, utilizando vías de comunicación, comúnmente en automóviles se hace uso de la red de área de control (*Controller Area Network, CAN*), por cableado directo, comunicación en serie o por comunicación inalámbrica entre otros métodos.

D. Protege la batería, evitando que opere fuera del área de operación segura, como por ejemplo casos de:

- Exceso de corriente
- Exceso de voltaje (durante la carga)
- Bajo voltaje (durante la descarga) esto especialmente es importante para las baterías de ácido de plomo y de celdas de Li-Ion
- Exceso de temperatura
- Baja temperatura
- Exceso de presión, en especial en el caso de las baterías NiMH. Incluye un interruptor interno (por ejemplo, un relé o un dispositivo de estado sólido) que se abre si la batería se encuentra fuera de su área de operación segura. Solicita a los dispositivos que están conectados a la batería que reduzcan o incluso que terminen el consumo de energía.

4.5.6 ECU de aire acondicionado

Es la encargada de evaluar las señales de los sensores para determinar las condiciones de funcionamiento, controla actuadores para mover compuertas y válvulas que controlan el volumen, la temperatura y la dirección del aire suministrado por el sistema.

En el caso de los vehículos híbridos, que en algunos el compresor es accionado por el motor eléctrico y en otros es accionado por el motor térmico, la *ECU* del aire acondicionado se encargada de comunicarse con la *ECU* principal y pedirle que ponga en funcionamiento el motor térmico o el eléctrico, según sea el caso, para mantener en funcionamiento el aire acondicionado aunque por las condiciones de manejo, uno de ellos o ambos, deban estar detenidos.

4.6 Red de área de control CAN

La Red de Área de Control, o *CAN (Controller Area Network)* nace como un sistema para compartir información entre las diferentes unidades de control del vehículo, con lo cual se ha logrado reducir el cableado, reducir el número de sensores, reducir el tiempo en la detección y reparación de fallas, facilita la ampliación de la electrónica en nuevas funciones y en definitiva reduce el costo de fabricación y peso del vehículo.

Este sistema fue desarrollado por Robert Bosch en 1985 para redes de vehículos, antes de esto, los fabricantes automotrices conectaban dispositivos electrónicos en los vehículos utilizando sistemas de cableado punto a punto. Sin embargo, conforme los fabricantes iniciaron a utilizar más dispositivos electrónicos en los vehículos, los arneses de estos aumentaban el peso y el costo general. Al reemplazar el cableado por redes de comunicación se logró reducir el costo del cable, su complejidad y su peso.

CAN, un sistema de bus serial de alta integridad destinado para comunicar dispositivos inteligentes, emergió como la red estándar para vehículos. La industria automotriz adoptó rápidamente *CAN* y, en 1993, se convirtió en el estándar internacional conocido como ISO 11898. Desde 1994, se han estandarizado varios protocolos de alto nivel a partir de *CAN*, como *CANopen* y *DeviceNet*, y su uso se ha extendido a otras industrias.

El sistema *CAN* tiene diferentes capas físicas que puede utilizar. Estas capas clasifican ciertos aspectos de la red, como lo son los niveles eléctricos, esquemas de señales, impedancia en los cables, tasa máxima de transmisión, y más. Las capas físicas más ampliamente utilizadas y más comunes se describen a continuación:

CAN de alta velocidad: es la capa física más común. Las redes de *CAN* de alta velocidad están implementada con dos cables y permiten la comunicación con tasas de transferencia de hasta 1Mb/s. otros nombres para *CAN* de alta velocidad incluye *CAN C* e *ISO 11898-2*, los dispositivos típicos *CAN* de alta velocidad incluyen los sistemas de frenos anti-bloqueo, módulos de control del motor y sistemas de emisión de gases.

Hardware CAN de baja velocidad/tolerante a fallas: también están implementadas con dos cables, pueden comunicarse con dispositivos a una tasa de 125 kb/s, y cuenta con transceptores con capacidades de tolerancia a fallas. Otros nombres para esta versión de *CAN* son *CAN B* e *ISO 11898-3*. Algunos ejemplos de dispositivos típicos en automóviles que incluyen esta versión de protocolo son dispositivos de confort o la luz de freno.

Hardware CAN de un solo cable: pueden comunicarse con dispositivos a una tasa de hasta 33.3 kb/s (88.3 kb/s en modo de alta velocidad). Otros nombres para *CAN* de un solo cable incluyen *SAE-J2411*, *CAN A* y *GMLAN*. Los dispositivos de un solo cable típicos dentro de un automóvil no requieren de un alto desempeño, como por ejemplo los ajustadores de asientos y espejos retrovisores.

Hardware CAN seleccionable por *software*: con los productos de *hardware CAN* de National Instruments, usted puede configurar las interfaces *CAN* mediante *software* para utilizar cualquiera de los transceptores incluidos (de alta velocidad, de baja velocidad/tolerante a fallas o de un sólo cable). Contar con múltiples transceptores es una solución perfecta para aplicaciones que requieren una combinación de diferentes estándares. Adicionalmente, estos dispositivos de *hardware CAN* permiten elegir su propio transceptor de *CAN* externo.

Como se declaró anteriormente, *CAN* es una red uno a uno. Esto significa que no hay un maestro que controle el acceso de lectura o escritura de datos en el bus por parte de los nodos individuales. Cuando un nodo *CAN* está listo para transmitir datos, verifica si el bus se encuentra ocupado, y después simplemente escribe un marco de *CAN* en la red. Los marcos de *CAN* transmitidos no contienen direcciones del nodo transmisor o de ninguno de los probables nodos receptores. Solo se cuenta con un número de identificación único.

Todos los nodos en la red reciben el marco, y dependiendo del número de identificación (*ID*) cada nodo decide si aceptar o no el marco. Si varios nodos intentan transmitir un mensaje al bus al mismo tiempo, el nodo con la mayor prioridad (número de *ID* menor) automáticamente tendrá acceso al bus. Los nodos con menor prioridad deben esperar hasta que el bus vuelva a estar disponible antes de iniciar nuevamente su transmisión.

4.7 Variables de control

Las unidades de control (*ECU*) se conectan y comunican entre si, los datos que se transmiten a través del cable de conexión se conocen como una cadena digital de unos y ceros. Las variables de control que se transfieren de una unidad de control a otra pueden clasificarse en una de tres categorías: mecánicas, eléctricas y discretas.

Las variables de control mecánicas son las que se obtienen de unidades de control que monitorean elementos mecánicos, y transmiten valores como el par del motor térmico, relación de transmisión en cajas de transmisión variable continua y las revoluciones por minuto de cada componente.

Las variables de control eléctricas son las que se obtienen de las unidades de control que monitorean elementos eléctricos y transmiten valores como el par del motor eléctrico, la corriente en amperios y el voltaje en voltios.

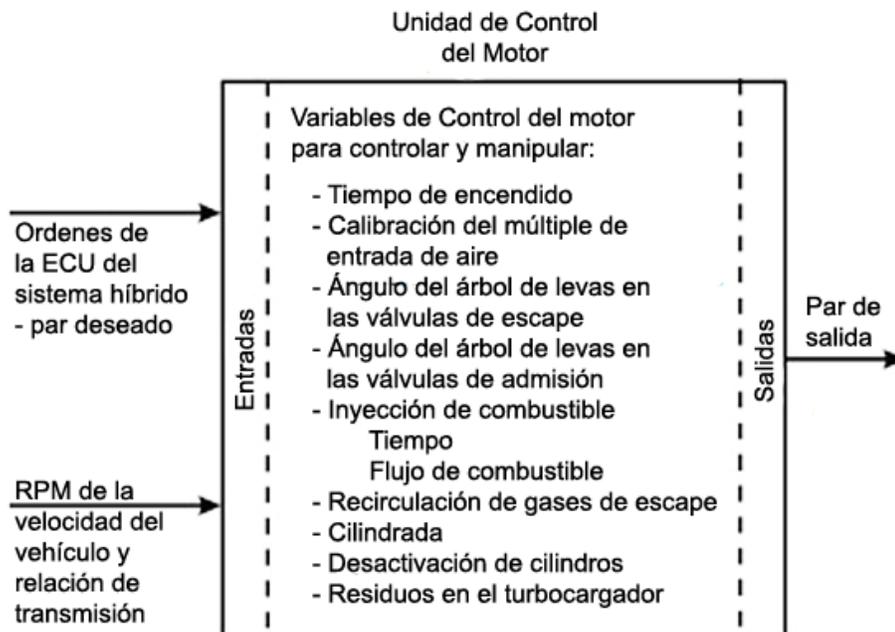
Por último, las variables de control discretas son las que dan por resultado Si/No o Encendido/Apagado. En los híbridos encontramos solo algunas de estas variables discretas, por ejemplo: modo del motor/generador: motor o generador, posición de palanca de transmisión: que velocidad está activa, embrague: activado o desactivado.

4.8 Administración del motor

Todas las exigencias que se hacen a la *ECU* del motor térmico están basadas primordialmente en el par, tanto el que solicita la *ECU* del sistema híbrido, como el par de salida del motor. Pero el alcance de control va mucho más allá que solo la inyección de combustible y la sincronización del encendido.

Muchos sensores y sistemas son necesarios para tener un control preciso de la relación aire-combustible, mantener los niveles de emisión y el ahorro de combustible, en la siguiente figura vemos que variables controla y manipula la *ECU* del motor.

Figura 48. **Administración del motor**



Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág. 192

4.9 Recirculación de gases de escape

El sistema de recirculación de gases de escape (*EGR, Exhaust Gas Recirculation*), está diseñado para reducir la cantidad de óxidos de nitrógeno (NO_x) creados en la cámara de combustión. Los óxidos de nitrógenos se forman en altas concentraciones cuando las temperaturas de combustión superan los $1300\text{ }^\circ\text{C}$. El sistema *EGR* reduce la producción de NO_x al recircular pequeñas cantidades de gases de escape en el múltiple de admisión donde se mezcla con la carga entrante de aire y combustible.

Al combinar un gas inerte con la mezcla aire/combustible bajo estas condiciones, las temperaturas pico de combustión y las altas presiones dentro de la cámara se reducen, lo cual resulta en una reducción general de la producción de gas NO_x .

Para que el funcionamiento sea óptimo, el flujo de gas del sistema *EGR* debe ser alto durante velocidades de crucero y en aceleraciones de medio rango, que es cuando las temperaturas de combustión son más elevadas, el flujo de gas del sistema *EGR* debe ser bajo durante las velocidades y condiciones de baja carga de trabajo sobre el motor. No se necesita ningún flujo de gas del sistema *EGR* durante condiciones en que la operación de la válvula *EGR* podría afectar severamente la eficiencia de operación del motor o la manejabilidad del vehículo (calentamiento inicial del motor, ralentí, aceleración total).

Existen dos clases de recirculación de los gases de escape: interna y externa. En la recirculación interna de los gases de escape, la mezcla entre los gases de escape y la mezcla fresca se realiza en la cámara de combustión.

Esto se logra en todos los motores de cuatro tiempos mediante el traslape de válvulas, condicionado por el sistema, de la válvula de admisión y de la válvula de escape. Condicionada por la construcción, la tasa de recirculación de los gases de escape es muy reducida y sólo se puede modificar de forma limitada. Solamente desde el desarrollo del control variable de las válvulas se puede influir activamente en la tasa de recirculación de los gases de escape en función de la carga y el número de revoluciones.

La recirculación externa de los gases de escape se realiza mediante un conducto adicional entre el colector/tubo de escape y el colector de aspiración, así como la válvula *EGR*.

Los primeros sistemas se controlaban mediante una válvula de platillo, que se abría o cerraba mediante una caja de presión negativa (impulsión neumática). Al mismo tiempo, la presión del tubo de aspiración servía de magnitud de control de la caja de presión negativa. Así, la posición de la válvula de platillo dependía del estado de funcionamiento del motor. Para obtener una mayor influencia sobre la tasa de recirculación de los gases de escape se utilizaron válvulas neumáticas de retención y de limitación de la presión, así como válvulas de retardo. Algunos sistemas tienen presente, además, la contrapresión de los gases de escape como presión de regulación para la caja de presión negativa.

En algunos estados de funcionamiento, la recirculación de los gases de escape se desconecta completamente. Esto se posibilita mediante el montaje de válvulas de conmutación eléctricas en el conductor de control. A pesar de esta opción, el sistema era siempre dependiente del estado de carga del motor y de la presión negativa del tubo de aspiración para el control de la caja de presión negativa.

Para satisfacer los requerimientos de los motores modernos y ser independiente de la presión negativa del tubo de aspiración, se desarrollaron mecanismos para las válvulas de recirculación de los gases de escape. Al mismo tiempo se integraron sensores con los cuales se podía reconocer la posición de la válvula. Estos desarrollos permiten una regulación exacta con breves tiempos de ajuste.

Como mecanismo eléctrico actualmente se utilizan también, junto con imanes de elevación y giratorios, los motores de corriente continua. También la válvula de regulación en si se ha modificado con el paso del tiempo. Además de válvulas de aguja y de platillo de diferentes tamaños y medidas, actualmente se utilizan válvulas con distribuidor giratorio y de mariposa.

Para que el sistema logre el control diseñado de recirculación de gases de escape, el sistema usa los siguientes componentes:

- Válvula *EGR* controlada por vacío o electrónicamente
- Modulador de vacío
- Válvula *switch* de vacío (*VSV*) controlada por la *ECU*

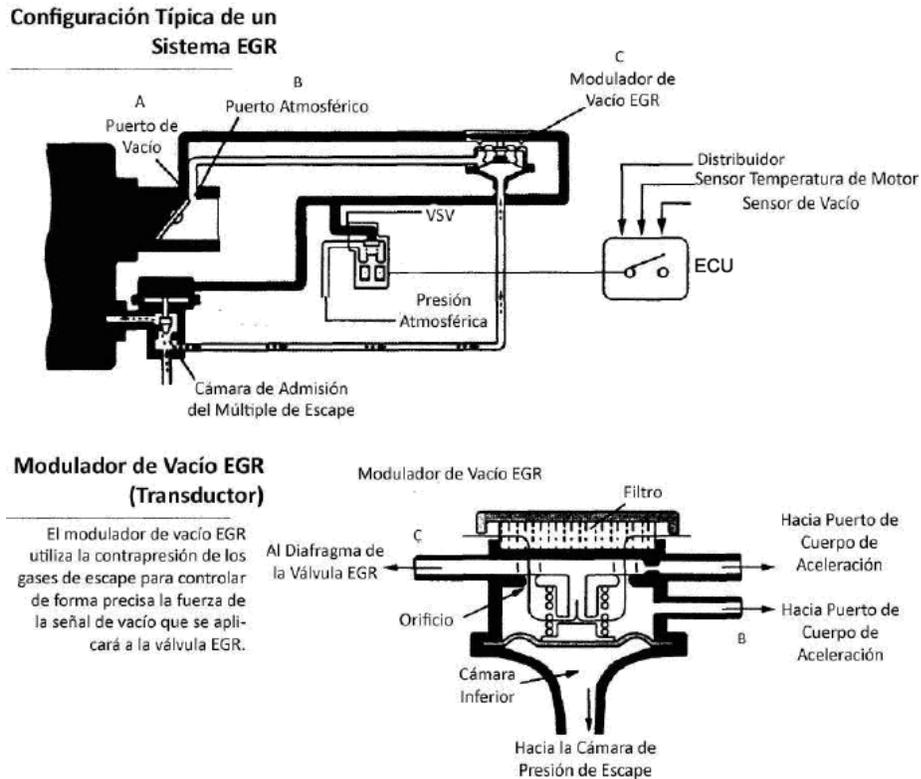
La válvula *EGR* se usa para regular el flujo de los gases de escape hacia el múltiple de admisión por medio de un vástago unido a un diafragma en la válvula misma. Una señal de vacío y un resorte calibrado en un lado del diafragma están balanceados contra la presión atmosférica actuando en un lado del diafragma. A medida que la señal de vacío aplicado a la válvula se incrementa, la válvula es llevada más lejos de su asiento.

Debido a que la contrapresión se incrementa proporcionalmente con la carga de trabajo de motor, el modulador de vacío *EGR* usa este principio para controlar con precisión la fuerza de la señal de vacío que se aplica a la válvula *EGR*. Un sistema típico de control usa dos señales por dos puertos de vacío desde el cuerpo de aceleración. Los dos puertos hacia el cuerpo de aceleración entra en fases, es decir, primero uno y enseguida el otro para ir abriendo gradualmente el conducto de la válvula *EGR*.

Además del modulador de vacío *EGR*, la válvula *VSV* (*Vacuum Switching Valve*) controlada por la unidad de control se utiliza para inhibir la operación de la válvula *EGR* durante condiciones donde podría afectar de forma adversa el desempeño del motor e impactar negativamente la manejabilidad del vehículo. La válvula *VSV* puede ser del tipo normalmente abierta o cerrada y va instalada en serie entre el modulador de vacío y la válvula *EGR*, o también va instalada en un segundo puerto de la válvula *EGR*, según el fabricante.

La válvula *VSV* controla la purga atmosférica que inhibe la operación del sistema cada vez que se cumplan algunos parámetros en la *ECU* del motor.

Figura 49. Recirculación de Gases de Escape



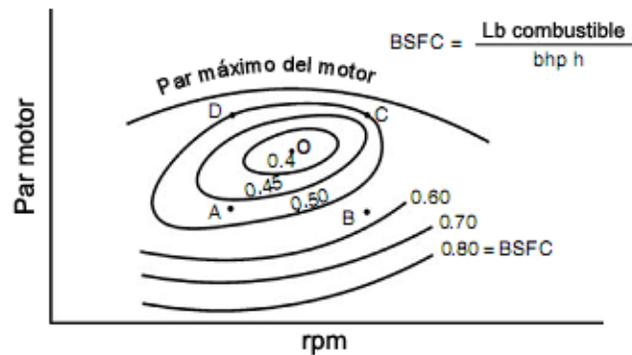
Fuente: <http://www.yoreparo.com/articulos/wp-content/uploads/2010/02/EGR-03.jpg>

4.10 Mapa de eficiencia del motor

Un mapa de eficiencia es con frecuencia una gráfica del Par como función de la Velocidad del motor en revoluciones por minuto. Las curvas de nivel de consumo de combustible específico (*BSFC*, *Brake Specific Fuel Consumption*), que es el resultado de las libras de combustible sobre la potencia al freno (*bhp*, *brake horsepower*) por hora, se superponen en el mapa. En los Estados Unidos, el valor *BSFC* tiene unidades de lb de combustible/*bhp* por hora. En Europa y Japón, el consumo de combustible se expresa en L/(kWh). Las curvas representan el consumo de combustible, por lo que un número menor siempre es mejor.

En la siguiente gráfica se observa que el punto óptimo de economía de combustible está en el punto O, que está en el centro del contorno de $BSFC = 0.4$. Los puntos A, B, C y D no se encuentran localizados en la zona óptima, por lo que la función del sistema de control del sistema híbrido debe modificar valores de funcionamiento tanto del motor térmico como del motor eléctrico para poder llegar a trabajar dentro de la zona óptima en cuanto a consumo de combustible.

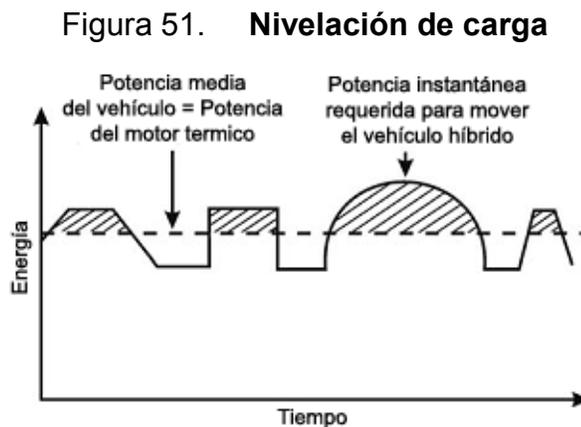
Figura 50. **Mapa de eficiencia del motor**



Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág.193

4.11 Nivelación de carga

Esencialmente la nivelación de carga es “mantener la batería cargada”. El momento y la cantidad de carga varían con el ciclo de conducción. Este concepto se explica en la figura siguiente:



Fuente: Allen E. Fuhs, Hybrid vehicles and the future of personal transportation. Pág. 193

En las regiones sombreadas, el motor eléctrico suministra energía para satisfacer la demanda instantánea de energía del ciclo de conducción. La batería está siendo descargada. En las zonas por debajo de la potencia media, se realizan los procesos para cargar la batería, ya sea por efectos del motor o del freno regenerativo. Al final del ciclo de conducción el estado de carga de la batería debe ser el mismo que al inicio. Este es el principal objetivo de la nivelación de carga.

4.12 Control de complejidad y dificultad

Los sistemas de control en los vehículos pueden resolver situaciones que van desde las muy sencillas hasta muy difíciles, pero en un vehículo híbrido la exigencia a los sistemas de control va más allá.

El control en un vehículo híbrido involucra muchas variables y no es lineal. Muchas técnicas se han desarrollado para resolver problemas lineales, pero soluciones de problemas no lineales involucra el uso de métodos muy específicos. Incluso las computadoras convencionales pueden llegar al colapso intentando resolver problemas no lineales.

Además, existen varias incertidumbres cuando de control se trata, por ejemplo los ciclos de conducción son solo modelos o representaciones pero depende en gran medida del conductor. Los efectos de la altitud y el clima son otras incertidumbres que deben ser consideradas.

4.13 Estrategia de control adaptable

Algunos sistemas de control tienen la capacidad de adaptarse al entorno en el que operan. En la literatura técnica sobre vehículos híbridos poco o ninguna mención se hace del control adaptable. Los sistemas híbridos de control están en su infancia y no han alcanzado su madurez. Pero pronto la capacidad de los sistemas de control híbrido se ampliará para incluir el control adaptable.

4.14 Control de red neural NN para vehículos híbridos

La Red Neural (*NN*, *Neural Network*), o Red Neuronal Artificial se inventó mientras se investigaba cómo funciona el cerebro humano y de sus intentos por imitarlo. Por ejemplo, al finalizar el siglo XIX se le comparó con la operación de la bomba hidráulica, durante la década de 1920 a 1930 se intentó utilizar la teoría de la conmutación telefónica como punto de partida de un sistema de conocimiento similar al del cerebro.

Entre 1940 y 1950 los científicos comenzaron a pensar seriamente en las redes neuronales utilizando como concepto la noción de que las neuronas del cerebro funcionan como interruptores digitales (*on – off*) de forma similar a la computadora digital. De allí nace la idea de “revolución cibernética” que maneja la analogía entre el cerebro y la computadora digital. En la actualidad existen diversas maneras de realizar procesos similares a los humanos, a los que podemos denominar inteligencia artificial.

Las redes neuronales son sistemas paralelos para el procesamiento de la información, inspirados en el modo en el que las redes de neuronas biológicas del cerebro procesan ésta. Estas redes deben tener características similares a las del cerebro:

- Deben ser robustas y tolerantes a fallos
- Deben ser flexibles. El cerebro se adapta a nuevas circunstancias mediante el aprendizaje.
- Deben poder trabajar con información borrosa, incompleta, probabilística, con ruido o inconsistente
- Deben ser altamente paralelas. El cerebro está formado por muchas neuronas interconectadas entre si y es, precisamente el comportamiento colectivo de todas ellas, lo que caracteriza su forma de procesar la información.

Debido a las características que presenta la red neural y si tomamos en cuenta que con la llegada de los vehículos híbridos los ingenieros y diseñadores han necesitado hacer uso sistemas que antes no se incluían en un vehículo, como el motor eléctrico, el sistema de carga, la batería, el sistema de freno regenerativo, entre otros, aumentando a su vez la cantidad de sensores necesarios, por lo que en un futuro se inclinaran a el uso de la red neural.

Se comentó con anterioridad que las computadoras actuales son excelentes resolviendo problemas lineales, pero no tienen la capacidad de resolver problemas no lineales, por ejemplo, al modelar un motor se deprecian datos como el desgaste de máquina, un dato importante, pero que al tenerlo en cuenta la solución de un sistema se haría imposible, así que se hace necesario despreciar esos términos, sin ellos el modelado funciona pero en la vida real no es tan preciso.

Si se modela un sistema de manera tradicional y luego éste sufre variación alguna los planteamientos iniciales ya no funcionan, esto se soluciona con el uso de una red neural, porque el sistema después de haber recibido unos patrones iniciales comienza a identificar, acepta, aprende y responde ante diferentes señales, sin importar que estas sean idénticas a los patrones iniciales.

Además, el uso de una red neural en los automóviles los llevaría a un nivel muy por encima del actual, tendrían la capacidad de maximizar su eficiencia teniendo en cuenta variables como la altitud, el clima, el tipo de conducción y además, aprender en base a su historial.

Se lograría una mayor eficiencia en sistemas de seguridad, como el sistema de frenos antibloqueo, dirección asistida, control de tracción, bolsas de aire o en sistemas de confort y ayuda al conductor, como el aire acondicionado, sistemas de navegación, sistemas de entretenimiento, asistencia al retroceder o parquear el vehículo, sin mencionar los sistemas que se pudieran agregar con esta nueva tecnología.

En la actualidad esta tecnología esta aplicada en distintas disciplinas, por ejemplo en reconocimiento de textos manuscritos, optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo, síntesis de voz desde texto, previsión del clima, valoración del riesgo de los créditos, interpretación de firmas, analizador del habla para la ayuda de audición de sordos profundos, sistemas de control en reactores, detección de explosivos, identificación de blancos de radares, creación de armas inteligentes, entre otros.

5. SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

El sistema de generación de energía eléctrica es una parte fundamental en los vehículos híbridos, el motor eléctrico debe convertir la energía eléctrica en energía mecánica, o viceversa, cuando se utiliza el freno regenerativo o se genera electricidad para cargar la batería. Los motores eléctricos satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio. Se fabrican en potencias que varían desde una pequeña fracción de caballo hasta varios miles, y con un gran rango de velocidades, que pueden ser fijas, ajustables o variables.

A diferencia de los motores eléctricos usados en aplicaciones industriales, los motores usados en vehículos híbridos regularmente requieren arranques y paradas frecuentes, altas relaciones de aceleración y desaceleración, alto par y baja velocidad al avanzar en una cuesta, bajo par y alta velocidad en cruceo y un amplio rango de velocidad de operación.

5.1 Motor de corriente directa

Los motores de corriente directa o corriente continua han sido ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren de velocidad ajustable, buena regulación de la velocidad, y frecuentes cambios de estado entre arranques, paradas y marcha atrás. Este tipo de motor se ha utilizado ampliamente en diferentes aplicaciones de tracción eléctrica, debido a su madurez tecnológica y sencillez de control. El principio de funcionamiento de un motor de corriente directa es muy sencillo. Está basado en la Ley de Lorentz, cuando un alambre que lleva corriente eléctrica se coloca en un campo magnético, una fuerza magnética que actúa sobre el alambre se produce.

La fuerza es perpendicular al hilo y el campo magnético como se muestra en la figura. La fuerza magnética es proporcional a la longitud del cable, la magnitud de la corriente eléctrica y la densidad del campo magnético.

Es decir:

$$F = BIL$$

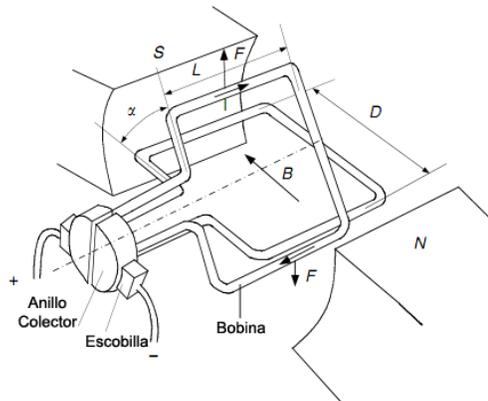
Donde **F** es la fuerza en newton, **B** es la densidad de campo magnético o densidad de flujo, **I** es la intensidad que recorre el conductor en amperios, y **L** es la longitud del conductor en metros lineales.

Cuando el alambre se forma en una bobina, como vemos en la siguiente figura, las fuerzas magnéticas que actúan sobre ambos lados generan un par, expresado por:

$$T = BIL\cos\alpha$$

Donde α es el ángulo entre el plano de la bobina y el campo magnético.

Figura 52. **Motor de corriente directa**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 142

Entre las partes que componen un motor de corriente continua podemos mencionar:

- El estator: es el que crea el campo magnético fijo, al que le llamamos excitación. En los motores pequeños se consigue con imanes permanentes, cada vez se construyen imanes más potentes, y como consecuencia han salido al mercado motores de excitación permanente mayores.
- El rotor: también llamado armadura, lleva las bobinas cuyo campo crea, junto al del estator, el par de fuerzas que las hace girar.
- Escobillas: normalmente son piezas de grafito que hacen contacto con las bobinas del rotor. A medida que éste gira, la conexión se conmuta entre unas y otras bobinas, y debido a ello se producen chispas que generan calor.
- Colector: los contactos entre escobillas y bobinas del rotor se llevan a cabo intercalando una corona de cobre partida en sectores. El colector consta a su vez de dos partes básicas, delgas que son los sectores circulares, aislados entre sí, que están en contacto con las escobillas y a su vez están soldados a los extremos de los conductores que conforman las bobinas del rotor; y micas que son láminas delgadas del mismo material, intercaladas entre las delgas de manera que el conjunto forma una masa compacta y mecánicamente robusta.

Con el fin de obtener un par continuo y máximo, anillos colectores y escobillas se utilizan para llevar a cada bobina a la posición $\alpha = 0$. Por lo general, existen cuatro tipos de motores de corriente directa en función de la interacción entre el campo y las bobinas. Se tratan de motor de excitación independiente, motor de excitación en serie, motor de excitación en paralelo y motor de excitación compuesta.

En el caso del motor de excitación independiente, la alimentación del rotor y del estator se obtiene de dos fuentes de tensión independientes. Con ello, el campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerza es entonces prácticamente constante.

Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán sólo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor. Este sistema de excitación no se suele utilizar debido al inconveniente que presenta el tener que utilizar una fuente exterior de corriente.

En el motor de excitación en serie o motor serie, el inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie. Por lo tanto, la corriente de excitación o del inductor es también la corriente del inducido absorbida por el motor.

En el motor de excitación en paralelo o motor *shunt*, el bobinado inductor principal está conectado en derivación o paralelo con el circuito formado por los bobinados, inducido e inductor auxiliar. Las bobinas principales están constituidas por muchas espiras y con hilo de poca sección, por lo que la resistencia del bobinado inductor principal es muy grande.

Por último, en el motor de excitación compuesta o motor *compound*, la excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados: inducido, inductor serie e inductor auxiliar.

5.2 Motor de inducción

Las unidades de motor eléctrico sin colector ofrecen una serie de ventajas sobre las unidades convencionales de motor eléctrico con colector, para la propulsión de los vehículos híbridos. En la actualidad, las unidades de motor de inducción son la tecnología madura entre las unidades de motor sin colector. En comparación con las unidades de motor de corriente continua, los motores de inducción de corriente alterna tienen ventajas adicionales, como, ser de peso ligero, pequeño volumen, bajo costo y alta eficiencia. Estas ventajas son especialmente importantes para las aplicaciones en vehículos híbridos. Existen dos tipos de motores de inducción o asíncronos, motor de rotor bobinado y motor de jaula de ardilla.

El motor de rotor bobinado tiene un rotor constituido por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta forma se tiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, del mismo número de polos, y en movimiento. Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados. Esto tiene ventajas, como la posibilidad de utilizar un reóstato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque.

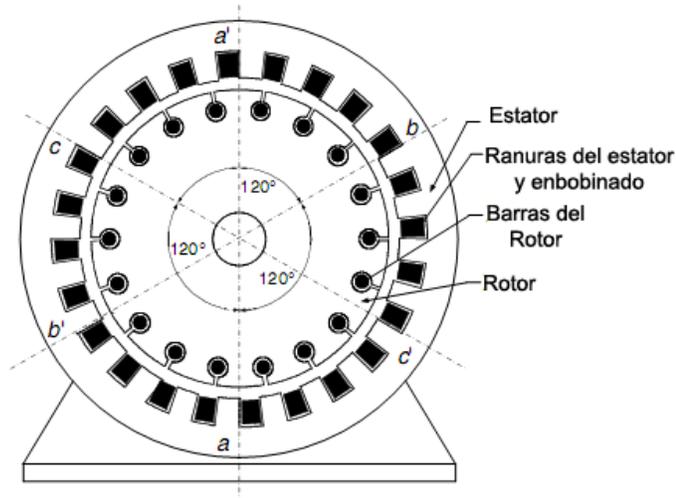
El motor de jaula de ardilla consta de un rotor constituido por una serie de conductores metálicos (normalmente de aluminio) dispuestos paralelamente unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos, esto es lo que forma la llamada jaula de ardilla. La base del rotor se construye de hierro laminado. Los devanados inductores en el estator de un motor de inducción instan al campo magnético a rotar alrededor del rotor.

El movimiento relativo entre este campo y la rotación del rotor induce corriente eléctrica, un flujo en las barras conductoras. Alternadamente estas corrientes que fluyen longitudinalmente en los conductores reaccionan con el campo magnético del motor produciendo una fuerza que actúa tangente al rotor, dando por resultado un esfuerzo de torsión para dar vuelta al eje. Como efecto el rotor se lleva alrededor el campo magnético pero en un índice levemente más lento de la rotación. La diferencia de velocidad se llama “deslizamiento” y aumenta con la carga.

En cualquiera de los dos casos, el campo magnético giratorio producido por las bobinas inductoras del estator genera unas corrientes inducidas en el rotor, que son las que producen movimiento.

Debido al alto costo, la necesidad de mantenimiento, y la falta de robustez, los motores de inducción de rotor bobinado son menos atractivos que sus homólogos de jaula de ardilla, especialmente para la propulsión eléctrica en vehículos híbridos.

Figura 53. **Sección transversal de un motor de inducción**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 156

5.3 Motor de imán permanente

Mediante el uso de imanes permanentes de alta energía como el mecanismo de excitación, un motor de imán permanente puede ser potencialmente diseñado con alta densidad de potencia, alta velocidad y alta eficiencia de operación. Estas importantes ventajas son muy atractivas para la aplicación en vehículos híbridos.

Del grupo de motores de imán permanente, una clase importante de motores de corriente directa la conmutación se hace en forma electrónica, este tipo es conocido como motor de corriente directa sin escobillas. El motor sin escobillas es el candidato más prometedor para ser usado en vehículos híbridos.

El motor de corriente directa sin escobillas es uno de los más eficientes entre los motores eléctricos. Esto se debe al uso de imanes permanentes para la excitación, los cuales no consumen energía. La ausencia de un conmutador mecánico y escobillas significa menores pérdidas por fricción mecánica y por lo tanto una eficiencia más alta. Entre sus ventajas tenemos la reciente introducción de imanes de alta densidad de energía (imanes de tierras raras, samario-cobalto o neodimio-hierro-boro), ha permitido alcanzar densidades de flujo más altas, esto hace que sea posible alcanzar altos esfuerzos de torsión, y como consecuencia poder hacer un motor más ligero y pequeño.

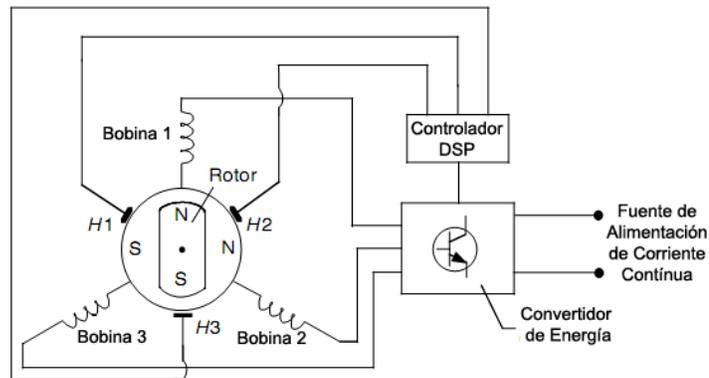
Además, este motor se puede controlar fácilmente, porque las variables de control son fácilmente accesibles y constantes durante toda la operación del motor. Es fácil de enfriar, ya que al no haber circulación de corriente en el rotor, este no se calienta.

La producción de calor solo está en el estator, que es más fácil para enfriar que el rotor, ya que es estático y se encuentra en la periferia del motor. Tiene bajo mantenimiento, gran longevidad y fiabilidad.

La ausencia de escobillas y conmutadores mecánicos suprime el riesgo de falla asociados a estos elementos. La longevidad viene dada en función del aislamiento de los bobinados, rodamientos y la vida que tenga el imán. No hay ruido asociado con la conmutación, ya que es electrónica y no mecánica. Aunque este tipo de motor también tiene sus desventajas, el uso de imanes de tierras raras eleva el costo del motor, además estos imanes son peligrosos por su alto poder de atracción, tanto durante la construcción del motor, como en caso de accidente pues pueden poner en peligro a los pasajeros o al equipo de rescate.

La unidad de motor de corriente directa de imán permanente sin escobillas consiste principalmente en la máquina de corriente directa sin escobillas, un controlador basado en *DSP (Digital signal processing)*, y un convertidor de energía basado en electrónica de potencia, como se muestra en la figura siguiente. Sensores H1, H2, y H3 son los encargados de controlar la posición del rotor. Esta información de la posición del rotor es enviada al controlador, que, a su vez, envía señales de bloqueo al convertidor de energía mediante la activación y desactivación de la adecuada bobina del estator. De esta manera, el par y la velocidad se mantienen bajo control.

Figura 54. **Esquema del motor de imán permanente sin escobillas**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 191

6. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

En la actualidad los motores eléctricos han demostrado que tienen capacidad, muy superior a los motores térmicos, para impulsar máquinas diversas, esto se ha demostrado en trenes o en robots utilizados en fábricas, por ejemplo.

Los motores eléctricos son anteriores a los motores térmicos y llevan bastante tiempo evolucionando, de tal forma que en la actualidad han llegado a ser de los más eficientes, puede generar un mayor par que un motor turbodiesel a bajas revoluciones, generar más potencia en alta que un motor a gasolina turboalimentado y más revoluciones que un motor rotativo.

La razón de haber preferido utilizar motores térmicos para los automóviles no es el rendimiento, sino la facilidad que se tiene para almacenar energía. Actualmente un depósito de combustible con capacidad de 10 galones tiene 2.5 veces más densidad energética que una batería de las más avanzadas, del mismo volumen.

Existen varios requerimientos para que una unidad de almacenamiento de energía pueda ser utilizada por la industria automotriz, como la energía específica, la eficiencia, la necesidad de mantenimiento, administración de la energía, costo, relación con el medio ambiente y la seguridad.

El objetivo, para que en un futuro podamos desligarnos de la dependencia de los combustibles fósiles, es desarrollar una unidad de almacenamiento de energía que satisfaga las necesidades y exigencias de un vehículo, hasta entonces nuestra dependencia de motores térmicos y/o combustibles fósiles seguirá siendo inevitable.

6.1 Baterías electroquímicas

Las baterías electroquímicas son dispositivos electroquímicos que convierten la energía eléctrica en energía química potencial durante la carga, y convierten la energía química en energía eléctrica durante la descarga. En la actualidad predomina el uso de baterías de plomo/ácido. Normalmente se utilizan baterías de 12V en automóviles y de 24V en transporte pesado, obtenidos por la conexión en serie de dos baterías de 12V. Una batería convencional de 12V se compone de 6 celdas apiladas y conectadas en serie, separadas entre sí y colocadas dentro de una caja de polipropileno resistente al ácido.

Estas baterías se componen de placas positivas, placas negativas y separadores. Existe una mezcla de ácido sulfúrico diluido en agua destilada, conocida como electrolito, que cubre por completo las placas hasta un centímetro sobre ellas. Las placas negativas consisten en un metal denominado plomo esponjoso, las placas positivas están fabricadas de otra variedad de plomo llamado dióxido de plomo. Los fabricantes entrelazan las placas positivas y negativas para que tengan polaridades opuestas, es decir, una placa positiva siempre se encuentra al lado de una placa negativa.

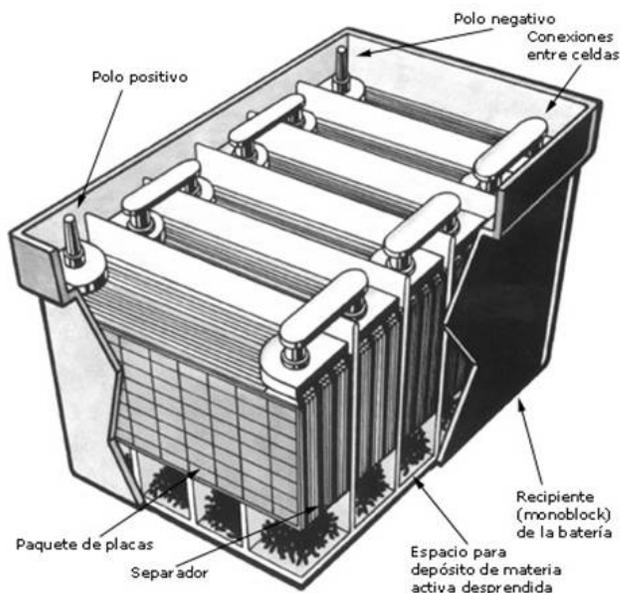
Los separadores son los encargados de evitar que estas placas estén en contacto. Una celda está formada por un grupo completo de placas negativas, un grupo completo de placas positivas y su respectivo separador, si cubrimos una celda con electrolito y conectamos un voltímetro entre el polo positivo y el polo negativo, obtendremos una lectura de alrededor de dos voltios.

Normalmente los fabricantes de baterías especifican la capacidad de la batería, la cual se mide en A-h (*ampere-hora*), la cual se define como el número de amperes-hora ganados cuando se descarga la batería desde su estado de carga completa hasta que descienda a su voltaje de corte. Por ejemplo, una batería etiquetada 80 A-h quiere decir que puede suministrar una corriente de 80 amperios durante una hora, o una corriente de 8 amperios durante diez horas. Esto es teóricamente, en la práctica la corriente de descarga no puede ser muy intensa o seguida porque se estropearían las placas, lo mismo pasa con la corriente de carga.

Otro parámetro importante de una batería es el estado de carga (*SOC, state of charge*), el cual se define como la relación entre la capacidad de carga restante y la capacidad de carga completa, es decir que, una batería completamente cargada tendrá un estado de carga de 100%, y una batería totalmente descargada tendrá un estado de carga de 0%.

En el caso de los vehículos híbridos, la capacidad de energía es considerada más importante que la capacidad de la batería, porque está directamente asociada con la operación del vehículo, es la energía que la batería puede entregar en función de la corriente y su estado de carga.

Figura 55. Partes de una batería de plomo/ácido



Fuente: http://blog.technosun.com/wp-content/uploads/2010/02/bateria_plomo.jpg

En la actualidad se pueden encontrar distintos tipos de baterías electroquímicas, por ejemplo, se tienen las baterías convencionales, que requieren de mantenimiento, cada elemento o celda lleva un tapón que sirve para el llenado inicial, el mantenimiento y la evacuación de los gases producidos durante la carga. La razón por la cual se es debe dar mantenimiento es que utilizan una gran cantidad de antimonio que causa que el agua destilada se evapore. Existen las baterías de poco mantenimiento, en las cuales se ha reducido la cantidad de antimonio, logrando una disminución en la formación de los gases, con lo cual se consigue una menor evaporación de agua, en este tipo de baterías el control del electrolito se limita a cada 15 meses o 25,000 Kms.

La batería absolutamente sin mantenimiento (batería de plomo/calcio) ya no requiere de ningún control de nivel de ácido, generalmente no permite esta posibilidad pues se encuentra herméticamente cerrada, con excepción de dos orificios de evacuación de gases.

En condiciones normales la evaporación del agua es tan poca que la cantidad de electrolito encima de las placas es suficiente para toda la vida útil de la batería.

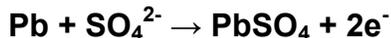
En una batería convencional, al trabajar en condiciones de profundas descargas repetidas se produce un gran desgaste de las placas positivas, especialmente por el desprendimiento y precipitación de la masa activa. Para soportar estas condiciones tenemos la batería resistente a los ciclos repetidos, en este tipo de batería la masa positiva de los separadores viene reforzada con fibra de vidrio y con ello se impide la precipitación prematura. La vida de estas baterías, expresada en ciclos de carga y descarga, es aproximadamente el doble que en las baterías convencionales.

Existe también la batería resistente a las vibraciones y golpes, en la cual los bloques de placas se fijan con resinas coladas o plástico para impedir los movimientos relativos con respecto a la caja, la norma *DIN* prescribe que debe resistir una prueba de sacudidas vibratorias sinusoidales durante 20 horas a 22 Hz y una aceleración máxima de 6 g en sentido vertical. Esta exigencia es unas diez veces superior a la fijada para las baterías corrientes. Este tipo de baterías se instalan principalmente en vehículos industriales, maquinaria de construcción y tractores entre otros. Se identifican con las letras Rf.

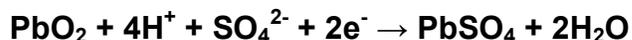
Las baterías HD, son una combinación de batería resistente a los ciclos repetidos y a los golpes. Son de utilidad en vehículos industriales en los que se ven sometidas a sacudidas y cargas cíclicas, se denominan con las letras HD. Por último tenemos las baterías Kt, en su estructura tiene la misma estructura que la batería resistente a los golpes, excepto que dispone de placas más gruesas y por ello menos numerosas. Su utilización se efectúa en casos de carga cíclica muy alta y en parte también para fines de tracción.

6.1.1 Reacción electroquímica

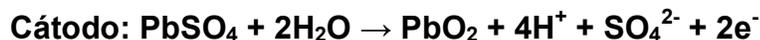
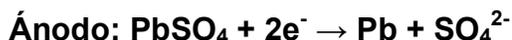
Una batería de plomo/ácido usa una solución acuosa de ácido sulfúrico ($2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$) como electrolito. Los electrodos están hechos de plomo poroso (Pb, ánodo, eléctricamente negativo) y de dióxido de plomo (PbO_2 , cátodo, eléctricamente positivo). El proceso toma lugar durante la descarga, donde el plomo es consumido y se forma el sulfato de plomo. La reacción química en el ánodo se puede escribir como:



Esta reacción libera dos electrones y, por tanto, da lugar a un exceso de carga negativa en el electrodo así se genera un flujo de electrones a través del circuito externo hacia el electrodo positivo (cátodo). En el electrodo positivo, el plomo de PbO_2 es convertido en PbSO_4 y, al mismo tiempo, se forma agua. La reacción se puede expresar como:



Durante la carga, las reacciones en el ánodo y el cátodo se invierten como se muestra a continuación:



La reacción en una celda de la batería de Plomo/ácido se puede expresar como:



6.1.2 Voltaje termodinámico

El voltaje es una medida de la energía de los electrones que son producidos o consumidos en cada una de las reacciones químicas, es la energía potencial eléctrica. Un alto voltaje significa más energía por electrón. En el caso de las baterías está relacionado con la naturaleza de las reacciones químicas que ocurren. Para la mayoría de aplicaciones prácticas es suficiente aceptar que ese es el voltaje de una reacción y trabajar en base a él. Pero para otros propósitos es necesaria una mayor interpretación física basada en la química. Por ejemplo, entender como ciertos átomos tienen la influencia para generar un voltaje más alto o más bajo, tiene importantes aplicaciones en el desarrollo de nuevos materiales para baterías.

El voltaje termodinámico de una celda de batería está estrechamente relacionado con la energía liberada y el número de electrones transferidos en la reacción. La energía liberada por la reacción de la celda de batería está dada por la variación de la energía libre de Gibbs, ΔG .

6.1.3 Energía específica

Es un factor importante para determinar la autonomía de una batería. La energía específica es la cantidad total de energía que la batería puede almacenar por kilogramo de su masa, para un valor especificado de régimen de descarga. Se expresa en vatios (*Watts*) – hora por Kg, (W-h/Kg), indicando además el régimen de descarga al que ha sido sometida la batería.

Una medida alta energía específica proporciona una mayor autonomía, o puede mantener una potencia alta por un espacio largo de tiempo. Ésta también proporciona una mayor eficiencia en el uso de los recursos energéticos. Esto se traduce en muchos más kilómetros por ciclo, y por lo tanto en una vida más larga de las baterías. Con menos ciclos de carga, las baterías podrían incluso durar toda la vida útil del vehículo.

6.1.4 Potencia específica

La potencia específica se define como la potencia máxima por unidad de peso que la batería puede producir en un período corto. La potencia específica es importante en la reducción del peso de las baterías, especialmente en aplicaciones que demandan altas potencias, como en el caso de los vehículos híbridos.

6.1.5 Eficiencia energética

Las pérdidas de energía o de potencia durante la carga o la descarga de la batería se muestran en forma de pérdida de voltaje. Por lo tanto, la eficiencia de la batería durante la carga o descarga se puede definir en cualquier punto de funcionamiento como la relación entre el voltaje de operación de la celda y el voltaje termodinámico.

6.2 Tecnologías de baterías

En la actualidad, para los vehículos híbridos, podemos utilizar baterías de plomo/ácido, baterías a base de níquel, como níquel-hierro, níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico, y las baterías basadas en litio, como las de polímero de litio y las de iones de litio. Aunque al parecer en el corto plazo, las baterías de plomo/ácido seguirán siendo las preferidas por sus ventajas. Sin embargo, a mediano y largo plazo, parece que el cadmio y las baterías basadas en litio serán los principales candidatos para los vehículos híbridos.

6.2.1 Baterías de ácido de plomo

La batería de plomo ha sido un producto comercial exitoso por más de un siglo y sigue siendo ampliamente utilizada como almacenamiento de energía eléctrica en el campo de la automoción y en otras aplicaciones. Entre sus ventajas podemos mencionar su bajo costo, su madurez tecnológica, su relativa capacidad de alta potencia, entre otras. Estas características las hacen atractivas para su aplicación en vehículos híbridos, donde las altas potencias son la primera consideración.

Los materiales involucrados (plomo, peróxido de plomo, ácido sulfúrico) son más bien de bajo costo en comparación con las baterías más avanzadas. Pero se tienen varias desventajas, la densidad de energía es baja, sobre todo por el alto peso molecular del plomo. Las características sobre temperatura son pobres. Por debajo de los 10 °C su potencia específica y su energía específica se reducen considerablemente, lo que limita la aplicación de estas baterías para la tracción de vehículos que operan en climas fríos.

La presencia de ácido sulfúrico altamente corrosivo es un peligro potencial para la seguridad de los ocupantes del vehículo. El hidrógeno liberado por las reacciones químicas es otro peligro potencial, ya que este gas es altamente inflamable, incluso en concentraciones pequeñas. Este gas es también problema para las baterías selladas herméticamente pues la presión se puede acumular en la batería, causando un aumento de volumen en la cubierta dejándola vulnerable.

El plomo en los electrodos es un problema ambiental, debido a su toxicidad, desde su fabricación, en caso de siniestro del vehículo o durante su disposición al final de la vida útil de la batería.

Diferentes tipos de baterías de plomo-ácido, con un mejor rendimiento, están siendo desarrolladas para vehículos híbridos. Se han obtenido mejoras en la energía específica de más de 40 W-h/Kg, con la posibilidad de carga rápida.

Una de estas baterías selladas de plomo-ácido, es la batería Horizon del fabricante Electrosorce. Quien desarrolló un proceso para extraer el conductor de los filamentos de fibra de vidrio que son trenzados en las parrillas de las placas de los electrodos de la batería.

Obteniendo así las ventajas competitivas de alta energía específica (43 Wh/Kg), alta potencia específica (285 W/Kg), ciclo de vida más largo (más de 600 ciclos, en aplicaciones de vehículos eléctricos en carretera), capacidad de recarga rápida (50% de su capacidad en 8 minutos y el 100% en menos de 30 minutos), bajo costo relativo, mayor resistencia mecánica (estructura sólida de la placa horizontal), libre de mantenimiento y amigable con el medio ambiente. Otras tecnologías incluyen diseños bipolares y diseños de parrilla micro tubular.

En términos generales las baterías de plomo/ácido avanzadas se han desarrollado para superar sus inconvenientes. La energía específica se ha incrementado a través de la reducción de materiales inactivos como la carcasa, la corriente del colector, los separadores, etc. El tiempo de vida se ha incrementado en más del 50%, a expensas del costo. El tema de seguridad ha sido mejorado, con procesos electroquímicos diseñados para absorber las emisiones de hidrógeno y oxígeno.

6.2.2 Baterías a base de níquel

El níquel es un metal más ligero que el plomo y tiene muy buenas propiedades electroquímicas deseables para usos en baterías. Entre las baterías de níquel podemos mencionar las de níquel-hierro, níquel-cadmio y las de níquel e hidruro metálico.

6.2.2.1 Sistema níquel hierro

El sistema de níquel/hierro se viene comercializando desde los primeros años del siglo XX. Su principio de funcionamiento es similar al de la batería de plomo/ácido, con ciertas diferencias, el electrodo positivo es de óxido de níquel, el electrodo negativo es de hierro y el electrolito es una solución concentrada de hidróxido de potasio (normalmente 240 g/l) que contiene hidróxido de litio (50 g/l), tiene una energía específica de 267 W-h/Kg y un voltaje nominal de 1.37V por celda.

Estas baterías sufren de problemas de desprendimiento de gas hidrógeno, corrosión y auto-descarga. Estos problemas han sido parcial o totalmente resueltos en prototipos que aun no salen al mercado.

Estas baterías son complejas debido a la necesidad de mantener el nivel de agua y la eliminación segura del hidrógeno y el oxígeno que se libera durante el proceso de descarga, además de padecer a bajas temperaturas, aunque menos que las baterías de plomo/ácido. Por último, el costo del níquel es significativamente más alto que el del plomo. Sus mayores ventajas son la alta densidad de potencia y su capacidad de soportar hasta 2000 descargas profundas.

6.2.2.2 Sistema níquel cadmio

Las baterías de níquel/cadmio utilizan el mismo electrodo positivo y el mismo electrolito que las baterías níquel/hierro, combinados con un electrodo negativo de cadmio metálico. Tiene una energía específica de 217 W-h/Kg y un voltaje nominal de 1.3V. Históricamente, el desarrollo de esta batería coincidió con la de níquel/hierro y tienen un desempeño similar.

La tecnología de níquel/cadmio ha visto una mejora técnica enorme debido a las ventajas que da una potencia específica elevada (más de 220 W/kg), un ciclo de vida prolongado (hasta 2000 ciclos), alta tolerancia a maltrato eléctrico y mecánico, capacidad de carga rápida (alrededor de 40% a 80% en 18 minutos), operación en un amplio rango de temperatura (-40 a 85°C), baja tasa de descarga (<0.5% por día), almacenamiento a largo plazo gracias a la insignificante corrosión. Sin embargo, presenta desventajas, que incluyen el alto costo inicial, un relativo bajo voltaje por celda, y que el cadmio puede ser cancerígeno y peligroso con el medio ambiente.

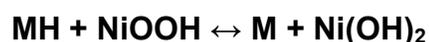
Las baterías de níquel/cadmio generalmente se dividen en dos grandes categorías, ventiladas y selladas. Las baterías níquel/cadmio ventiladas tienen varias alternativas, las de placas sinterizadas son un desarrollo reciente, la cual tiene una alta energía específica pero es más costosa. Se caracteriza por tener un perfil de descarga plano, una mayor tasa de alta corriente, por su buen desempeño a bajas temperaturas, poco mantenimiento y resistente a condiciones de maltrato.

La batería de níquel/cadmio sellada incorpora una característica de diseño de celda específica que previene una acumulación de presión dentro de ella, causada por los gases durante una sobrecarga. Como resultado, esta batería no requiere mantenimiento.

Los máximos fabricantes de baterías de níquel/cadmio para uso en vehículos híbridos son la francesa SAFT (*Société des Accumulateurs Fixe & de Traction*) y la alemana VARTA (*Vertrieb, Aufladung, Reparatur Transportabler Akkumulatoren*). Entre los vehículos recientes que han adoptado el uso de este tipo de baterías podemos mencionar a los autos eléctricos Chrysler TE Van, Citroën AX, Mazda Roadster, Mitsubishi EV, Peugeot 106 y Renault Clio.

6.2.2.3 Batería níquel e hidruro metálico (Ni-MH)

La batería de níquel e hidruro metálico ha estado en el mercado desde 1992. Sus características son similares a las de níquel/cadmio. La diferencia principal entre ellas es el uso del hidrógeno, absorbido en hidruro metálico, como el material activo del electrodo negativo en lugar del cadmio. Debido a su energía específica superior en comparación con las baterías de níquel/cadmio y su ausencia de toxicidad o de producir cáncer, la batería de Ni-MH está reemplazando a la batería de níquel/cadmio. La reacción general en una batería de Ni-MH es:



Cuando la batería está descargada, el hidruro metálico en el electrodo negativo se oxida para formar aleaciones metálicas, y el oxihidróxido de níquel en el electrodo positivo es reducido a hidróxido de níquel. Durante la carga se produce la reacción a la inversa.

En la actualidad, la tecnología de las baterías Ni-MH tiene un voltaje nominal de 1.2V y alcanza una energía específica de 65 W-h/kg y una potencia específica de 200 W/kg.

El éxito de la tecnología de baterías de Ni-MH proviene de las aleaciones metálicas, que absorben el hidrógeno, utilizadas en el electrodo negativo. Estas aleaciones metálicas contribuyen a la alta densidad de energía del electrodo negativo que se traduce en un aumento en el volumen disponible para el electrodo positivo. Hay dos tipos de aleaciones metálicas que están siendo utilizadas. Estas son, las aleaciones de tierras raras, basadas en níquel y lantano, conocida como AB₅, y aleaciones que consisten en titanio y circonio, conocido como AB₂. Las aleaciones AB₂ tienen una capacidad superior a las aleaciones AB₅. Sin embargo, la tendencia es utilizar aleaciones AB₅ porque presentan mejores características de retención de carga y de estabilidad.

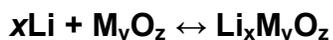
La batería de Ni-MH se ha considerado como una opción importante a corto plazo para aplicaciones en vehículos híbridos y eléctricos. Un número de fabricantes de baterías, como GM Ovonic, GP, GS, Panasonic, SAFT, VARTA y YUASA, han participado activamente en el desarrollo de esta tecnología, especialmente para los vehículos híbridos y eléctricos. Desde 1993, Ovonic ha instalado su batería de Ni-MH en el vehículo eléctrico Solectric GT Force, para pruebas y demostraciones. Una batería de 19 kWh ha entregado más de 65 Wh/kg, 134 km/h, una aceleración de 0 a 80 km/h en 14 segundos y un rango de conducción en ciudad de 206 km. Toyota y Honda han utilizado baterías de Ni-MH en sus vehículos híbridos Prius e Insight, respectivamente.

6.2.3 Baterías a base de litio

El litio es el más ligero de los metales y presenta unas características muy interesantes desde el punto de vista electroquímico. En efecto, permite un voltaje termodinámico muy alto, lo que da lugar a energía y potencia específicas muy altas. Existen dos principales tecnologías de baterías basadas en el litio: las de polímero de litio y las de Ion de litio.

6.2.3.1 Batería de polímero de litio (Li-P)

La batería de polímero de litio utiliza un óxido de metal de transición (M_yO_z) para el electrodo positivo y litio en forma de metal sólido para el electrodo negativo. Este metal de transición posee una estructura en capas en la que los iones de litio se pueden insertar durante la descarga o se pueden remover durante la carga. Utiliza un fino electrolito de polímero sólido (*SPE, solid polymer electrolyte*), el cual ofrece como ventajas, mayor seguridad y flexibilidad en el diseño. La reacción química general es:



En la descarga, los iones de litio formados en el electrodo negativo migran a través del electrolito, y se insertan en la estructura cristalina en el electrodo positivo. En la carga el proceso se invierte. Padecen problemas de seguridad y pérdida de rendimiento por lo que pocas veces se utilizan.

6.2.3.2 Batería de ion de litio (Li-Ion)

Desde el primer anuncio de la batería de ion de litio en 1991, la tecnología Li-Ion ha visto un crecimiento sin precedentes de lo que hoy se considera como la batería recargable más prometedora del futuro. Aunque aún sigue su desarrollo, la batería de Li-Ion, ya se ha ganado la aceptación para aplicaciones en vehículos híbridos y eléctricos. Utiliza carbonato de litio para el electrodo negativo (Li_xC), óxido de metal de transición de litio ($Li_{1-x} M_yO_z$) para el electrodo positivo, y una solución líquida orgánica o un polímero sólido como electrolito.

Los iones de litio oscilan entre los electrodos positivos y negativos durante la carga y la descarga. La reacción electroquímica general se describe como:



Durante la descarga, los iones de litio son liberados desde el electrodo negativo, migran a través del electrolito, y son absorbidos por el electrodo positivo. Durante la carga, el proceso se invierte. Entre los posibles materiales a utilizar en los electrodos positivos tenemos $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$, $\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$, y $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$, que tienen la ventaja de la estabilidad en el aire y alto voltaje.

Las de tipo $\text{Li}_x\text{C}/\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$, comúnmente escrito como C/LiNiO_2 o simplemente llamada batería de Li-Ion a base de níquel, tiene un voltaje nominal de 4V, una energía específica de 120 W-h/kg, una potencia específica de 260 W/kg. Las baterías Li-Ion a base de cobalto tienen una mayor energía específica, pero un alto costo y un incremento significativo en la tasa de auto descarga. Las baterías Li-Ion a base de manganeso tienen un costo más bajo y su energía específica se encuentra entre las de tipo de cobalto y las de níquel.

Se prevé que el desarrollo de la batería de Li-Ion se inclinará hacia las baterías a base de manganeso debido a su bajo costo, abundancia y respeto al medio ambiente.

Varios fabricantes de baterías, como SAFT, GS Hitachi, Panasonic, SONY y VARTA, han participado activamente en el desarrollo de la batería Li-Ion a base de níquel. Recientemente, SAFT informó el desarrollo de baterías Li-Ion de alto rendimiento para aplicaciones en vehículos híbridos, con una energía específica de 1350 W/kg.

6.3 Ultracapacitores

Debido a la operación de los vehículos híbridos que tienen frecuentes paradas y puestas en marcha, el perfil de carga y descarga en el almacenamiento de la energía es muy variado. La potencia media requerida por el almacenamiento de energía es mucho menor que la potencia pico, relativamente corta en duración, necesaria en la aceleración y cuando se conduce sobre cuestas. La relación entre la potencia pico y la potencia promedio puede estar sobre 10:1.

De hecho, la energía involucrada en las transiciones de aceleración y desaceleración aproximadamente de dos tercios de la cantidad total de energía que se necesita en el tránsito urbano. En el diseño de un vehículo híbrido, la capacidad de potencia máxima por parte de la unidad de almacenamiento es más importante que su capacidad energética, y por lo general esto restringe su reducción de tamaño.

Basado en la tecnología de baterías convencionales para automóviles, el diseño de las baterías ha de tener en cuenta la compensación entre la energía específica, la potencia específica y los ciclos de vida.

La dificultad por obtener, al mismo tiempo, altos valores en estos tres aspectos ha sugerido que el sistema de almacenamiento de energía para un vehículo híbrido debería ser una hibridación entre fuente de energía y una fuente de potencia. La fuente de energía, principalmente las baterías, tienen una energía específica alta, mientras que la fuente de potencia tiene una alta potencia específica.

La fuente de potencia puede ser recargada desde la fuente de energía durante demandas menos exigentes de conducción o mediante la función de freno regenerativo. La fuente de potencia que ha recibido una amplia atención es el ultracapacitor, también conocido como ultracondensadores, supercondensadores, supercapacitores, pseudocapacitores, condensadores eléctricos de doble capa (*EDLC, electric double layer capacitor*).

6.3.1 Características de los ultracapacitores

Los ultracapacitores se caracterizan por tener una potencia específica bastante alta, pero una energía específica muy baja comparada con la que tiene una batería química. Su energía específica esta en el orden de unos pocos vatios-hora por kilogramo. Sin embargo, su potencia específica puede estar sobre los 3 kW/kg, muy superior a la de cualquier tipo de batería.

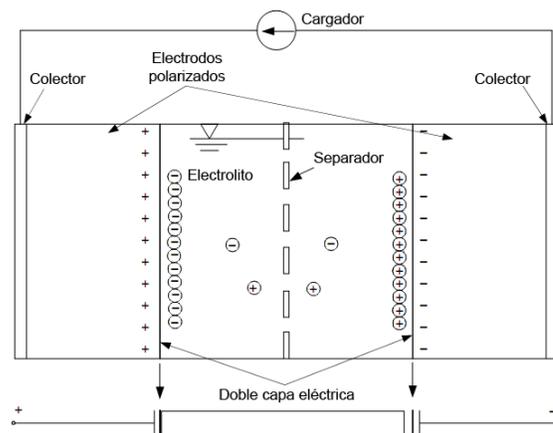
Debido a que su densidad de energía es baja y depende del voltaje en el sistema de carga, es difícil usar ultracapacitores como almacenamiento de energía en los vehículos híbridos. Sin embargo, existen una serie de ventajas que pueden resultar del uso de ultracapacitores como una fuente de energía auxiliar. Un uso prometedor es el llamado sistema híbrido de batería/ultracapacitor para vehículos híbridos.

Los requerimientos de energía específica y potencia específica pueden ser separados, proporcionando así la oportunidad de diseñar una batería que tenga una óptima energía específica y un ciclo de vida largo, prestando poca atención a la potencia específica. Debido al efecto de nivelación de carga de los ultracapacitores, la alta corriente de descarga de la batería y la alta corriente al cargar la batería con el freno regenerativo son minimizadas para que la energía disponible y la vida de la batería puedan ser significativamente aumentadas.

6.3.2 Principios básicos de los ultracapacitores

Cuando dos varillas de carbono se sumergen en una fina solución de ácido sulfúrico, separados y cargados con un voltaje que va de cero a 1.5V, hasta un poco más de 1V no pasa nada, pero un poco más de 1.2V unas pequeñas burbujas aparecerán en la superficie de los electrodos. Las burbujas a un voltaje superior de 1V indican la descomposición eléctrica del agua. Por debajo del voltaje de descomposición, mientras la corriente no fluya, una “doble capa eléctrica” se produce en el límite entre el electrodo y el electrolito. Los electrones se cargan a través de la doble capa y por un capacitor.

Figura 56. Principio de funcionamiento del ultracapacitor



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 316

La doble capa eléctrica trabaja como un aislante únicamente por debajo del voltaje de descomposición. La energía almacenada, E_{cap} , se expresa como:

$$E_{cap} = \frac{1}{2} CV^2$$

Donde **C** es la capacitancia en Faraday y **V** es el voltaje utilizable en Voltios. Esta ecuación indica que un mayor voltaje nominal es deseable para un capacitor con una alta densidad de energía. Hasta ahora, el valor del voltaje en capacitores con electrolito acuoso ha sido de 0.9V por celda, y para capacitores con electrolito no acuoso ha sido de 2.3V a 3.3V por celda.

Existe un gran mérito en utilizar una doble capa eléctrica en lugar de capas de plástico o de óxido de aluminio en un capacitor, puesto que la doble capa es muy delgada y una capacidad por área bastante grande, de 2,5 a 5 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$. Incluso si pudiéramos obtener unos pocos $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, la densidad de energía no es tan grande en un capacitor cuando se utilizan capas de aluminio. Para aumentar la capacitancia, los electrodos se hacen de materiales específicos que tienen un área bastante grande, como los carbones activados que tienen áreas de 1000 a 3000 m^2/g .

Sin embargo, la densidad de energía de estos capacitores es mucho menor que la de una batería, la energía específica típica de un ultracapacitor en la actualidad es de aproximadamente de 2 W-h/kg, comparado con el valor de 40 W-h/kg, que es el valor disponible de las baterías de plomo/ácido.

7. FUNDAMENTOS DEL FRENADO REGENERATIVO

Una de las características más importantes de los vehículos híbridos es su capacidad de recuperar cantidades significativas de energía del frenado. Los motores eléctricos en los vehículos híbridos pueden ser controlados para que puedan operar como generadores, para convertir la energía cinética o potencial de la masa del vehículo en energía eléctrica que se pueda almacenar y reutilizar.

El rendimiento del frenado en un vehículo es, sin duda, uno de los factores importantes que afectan la seguridad del vehículo. Un exitoso diseño de un sistema de frenado para un vehículo debe cumplir con dos exigencias. En primer lugar, en una situación de frenada de emergencia, debe ser capaz de detener el vehículo en la menor distancia posible. En segundo lugar, debe mantener el control sobre la dirección del vehículo mientras se frena. El primero requiere que el sistema de frenado esté en condiciones de suministrar suficiente par de frenado en todas las ruedas. El segundo requiere que la fuerza de frenado sea distribuida en todas las ruedas por igual.

En general, el par de frenado necesario para detener un vehículo es mucho mayor que el par que un motor eléctrico puede ejercer. En los vehículos híbridos, sistemas mecánicos de frenos de fricción deben coexistir con el sistema electrónico de freno regenerativo.

7.1 Consumo de energía en el frenado

Una cantidad significativa de energía es consumida por el frenado. El frenar un vehículo de 1500 kg a partir de los 100km/h hasta que su velocidad sea cero, consume alrededor de 0,16 kWh (578,703 J), sabiendo que la energía cinética se expresa como $E = \frac{1}{2} M_v V^2$ donde M_v representa la masa del vehículo en kilogramos y V representa la velocidad en metros por segundo, esto en solo unas decenas de metros. Si esa cantidad de energía se usa para mover el vehículo (venciendo la resistencia a la fricción y la resistencia aerodinámica) sin frenar, podría avanzar cerca de 2 km.

7.2 Función del frenado regenerativo

Cuando se desea frenar el vehículo más rápido de forma más rápida que la resistencia al rodamiento, la resistencia aerodinámica y el freno de motor, se presiona el pedal del freno. En un vehículo convencional, esta presión se transmite por un circuito hidráulico hacia los frenos de fricción en las ruedas. Las fricciones rozan con los discos de metal y los tambores, y la energía del movimiento se convierte en calor a medida que el vehículo se detiene.

La función del freno regenerativo es aprovechar la energía que se deshecha en forma de calor en el frenado, y convertirla en energía eléctrica que se pueda almacenar en un banco de baterías o un banco de capacitores.

Este freno se basa en el principio de que un motor eléctrico puede ser utilizado como generador, ha sido de vital importancia en los vehículos híbridos y eléctricos y ha cobrado especial relevancia en la opinión pública debido a su aparición en la Fórmula 1, donde se le conoce como KERS (*Kinetic Energy Recovery System*, sistema de recuperación de energía cinética).

Al presionar el pedal de freno, dependiendo de la fuerza con la que se haga, no se acciona de inmediato el sistema hidráulico, se utiliza la inercia del vehículo para hacer girar el motor eléctrico, que en ese momento actúa como un generador, oponiendo resistencia al movimiento de las ruedas y así, disminuyendo el avance del vehículo.

La computadora se encarga de calcular la cantidad de desaceleración que será producida por el freno regenerativo y de reducir o aumentar la fuerza hidráulica apropiada transmitida a los frenos de fricción.

7.3 Sistema de frenos en vehículos eléctricos e híbridos

El freno regenerativo en vehículos híbridos agrega cierto grado de complejidad al diseño del sistema de frenado. Se debe responder a dos cuestiones básicas: una es como distribuir la fuerza de frenado necesaria entre el freno regenerativo y el freno de fricción mecánico con el fin de recuperar tanta energía cinética como sea posible, y la otra es como distribuir las fuerzas de frenado en los ejes delantero y trasero a fin de lograr un estado de equilibrio de frenado.

Por lo general, el frenado regenerativo es efectivo sólo para el eje motriz. El motor debe ser controlado para producir la cantidad adecuada de fuerza de frenado necesaria para recuperar la energía cinética, y al mismo tiempo, el freno mecánico debe ser controlado para cumplir con los requerimientos de fuerza de frenado del conductor.

Básicamente existen tres estrategias de control de freno:

- Freno en serie con sensación óptima
- Freno en serie con recuperación de energía óptima
- Freno en paralelo

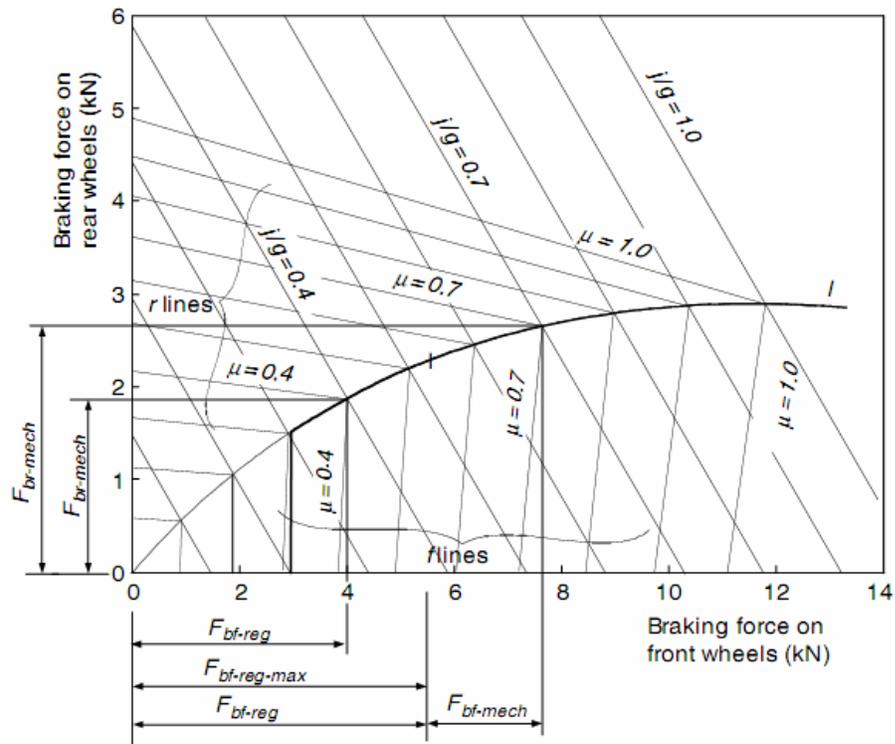
7.3.1 Frenos en serie

Existen dos tipos de freno en serie, el primero de ellos es el freno en serie con sensación óptima, que utiliza un regulador, que controla la fuerza de frenado en las fuerzas delanteras y traseras. Cuando el comando de desaceleración (representado por la posición del pedal) es bajo, solo se utiliza el freno regenerativo. Para desaceleraciones bruscas, el modulador ajusta la fuerza de frenado, de modo que la distribución entre los ejes delantero y trasero siga una curva óptima.

El freno regenerativo se utilizará hasta un par máximo y el freno de fricción será usado para proporcionar el resto de la fuerza necesaria. El par máximo del motor está relacionado con su velocidad. A bajas velocidades, el par máximo es constante, pero a velocidades más altas, disminuye hiperbólicamente con la velocidad. Por lo tanto, la fuerza ejercida sobre el freno de fricción en una desaceleración dada variará con la velocidad. Como resultado, el control activo de los frenos de fricción se hace necesario.

Esto añade un alto grado de complejidad al sistema. Se requiere que haya un sistema eléctrico que accione simultáneamente al freno regenerativo y al freno de fricción. A diferencia del sistema de freno convencional, que está basado puramente en la presión hidráulica desarrollada directamente por el conductor, en este sistema no existe una relación directa entre el conductor y los dispositivos de frenado. El conductor determina la fuerza total del frenado en función de la posición del pedal, pero es el regulador electrónico y los servomotores los responsables en distribuir esta fuerza de manera óptima entre las ruedas delanteras y traseras, y entre los sistemas de frenado regenerativo y de fricción.

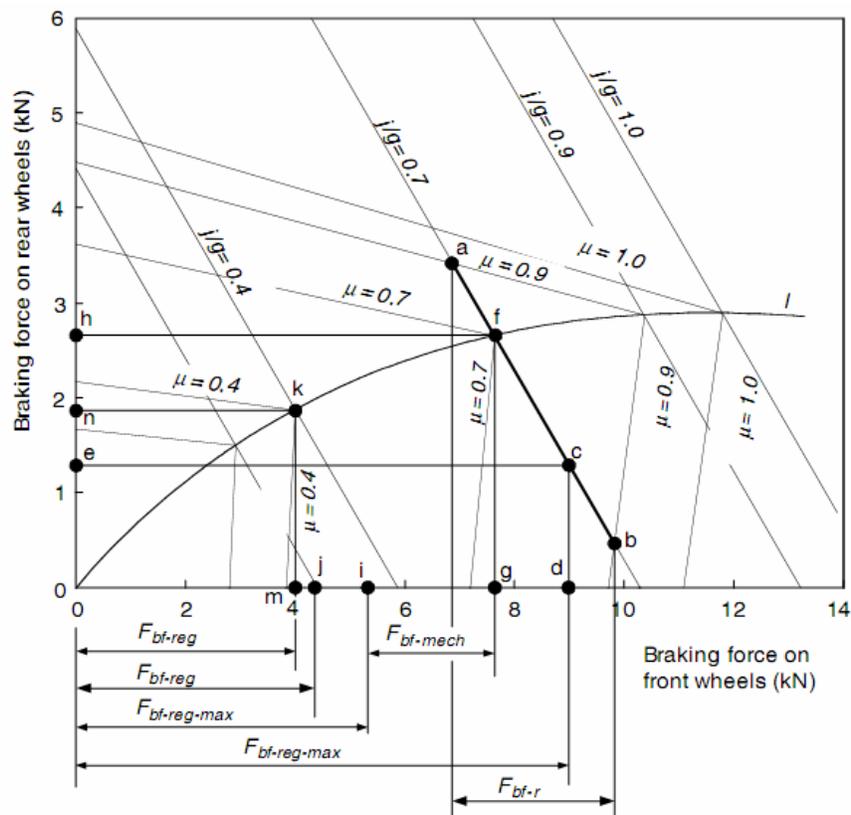
Figura 57. **Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en serie con sensación óptima**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 339

El segundo es el freno en serie con recuperación de energía óptima. Cuando un vehículo se desacelera a razón de la desaceleración relativa a la gravedad que es menor que el coeficiente de fricción de la carretera, las fuerzas sobre las ruedas delanteras y traseras pueden variar dentro de cierto rango. Este tipo de freno usa el mismo mecanismo de control que el sistema anterior, pero en este sistema se le da preferencia de frenado a las ruedas que están directamente conectadas al motor, esto se hace para recuperar tanta energía como sea posible. Una desventaja de esto es que la distribución de frenado entre los ejes delantero y trasero no puede ser óptima.

Figura 58. **Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en serie con recuperación de energía**



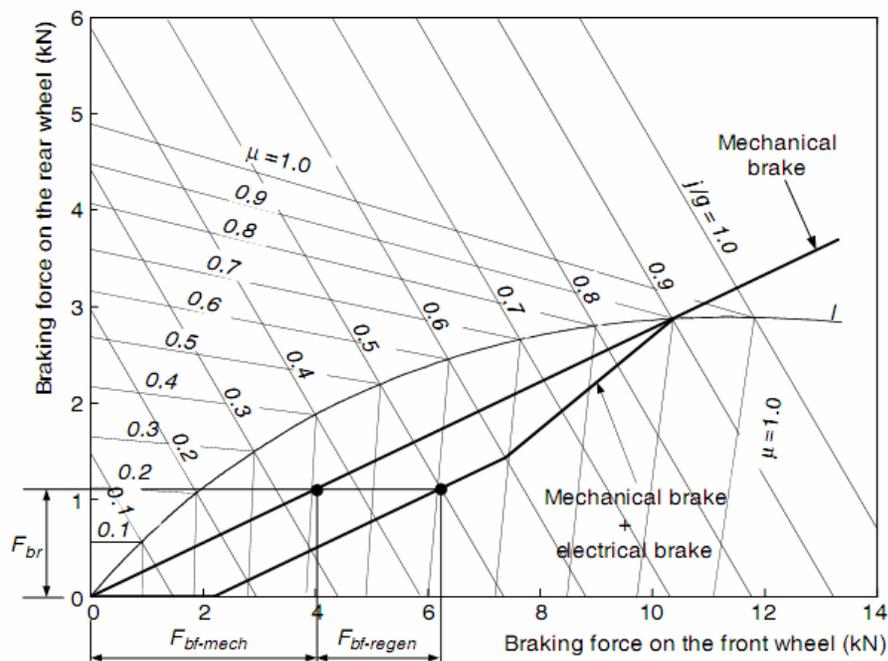
Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 340

7.3.2 Frenos en paralelo

El sistema de freno regenerativo en paralelo es un diseño muy simple, ya que no necesita de un control electrónico para el sistema de frenos de fricción. El sistema de freno de fricción tiene una distribución fija entre los ejes delanteros y traseros. Ambos sistemas, el freno de fricción y el regenerativo, aplican un par en respuesta a la presión hidráulica en el cilindro principal (o en respuesta a la posición del pedal del freno).

Cuando la desaceleración requerida es baja, solo el freno regenerativo se utiliza, emulando el efecto de freno de motor, común en los vehículos convencionales. El método de freno en paralelo tiene una construcción y un sistema de control mucho más simple, pero la cantidad de energía recuperada y la sensación óptima del freno se ve comprometida.

Figura 59. Ilustración de las fuerzas de frenado, freno en paralelo



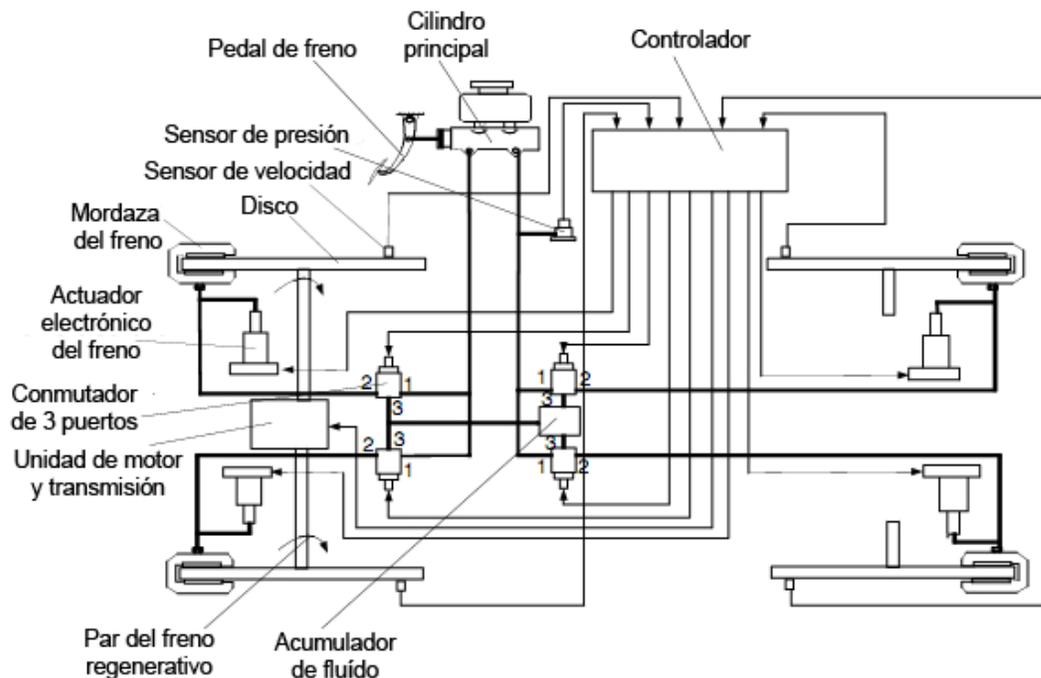
Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 342

7.4 Sistema de frenos antibloqueo

Controlar activamente la fuerza de frenado para un motor eléctrico es mucho más fácil que controlar la fuerza del freno mecánico. Por lo tanto, el freno antibloqueo con un freno eléctrico en los vehículos híbridos es otra de las ventajas inherentes, sobre todo para los vehículos que llevan motor eléctrico en las cuatro ruedas.

La siguiente figura ilustra conceptualmente un sistema de freno regenerativo que puede funcionar como un freno antibloqueo (*ABS, Antilock Brake System*).

Figura 60. **Esquema de freno regenerativo, funcionando como ABS**



Fuente: Mehrdad Ehsani, Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Pág. 343

Los principales componentes de este sistema de frenado son: el pedal de freno, cilindro maestro, cilindros actuadores controlados electrónicamente, conmutador de tres puertos controlado electrónicamente (modo común es: puerto 1 abierto, puerto 2 cerrado, y puerto 3 abierto), acumulador de fluido, sensor de presión, y la unidad encargada de controlar todo el sistema. El sensor de presión se encarga de medir la presión del líquido, lo que representa la fuerza de frenado que el conductor desea.

El líquido es descargado dentro del acumulador a través de los conmutadores de tres puertos controlados electrónicamente. Esto emula la sensación de frenado de un sistema convencional. Después de recibir una señal de presión de frenado, la unidad de control general determina el par de frenado de las ruedas delanteras y traseras, el par de frenado regenerativo y el par de frenado mecánico. La unidad de control del motor eléctrico (que no se muestra en la figura) ordena al motor producir el correcto par de frenado, y el controlador del freno mecánico ordena a los actuadores producir el par de frenado correcto por cada rueda.

Los actuadores del freno también son controlados para funcionar como un sistema antibloqueo para evitar que las ruedas se bloqueen completamente. Si un actuador es detectado con fallas, el interruptor correspondiente de tres puertos cierra el puerto 3 y abre el puerto 2, de este modo el líquido es enviado directamente a la bomba auxiliar de la rueda para producir el par de frenado.

CONCLUSIONES

1. Un vehículo híbrido es un vehículo de propulsión alternativa, que combina dos o más unidades de propulsión independientes, siendo las más comunes una térmica y una eléctrica, con el fin de minimizar el consumo de combustible, desligándose en buena medida del consumo de combustibles derivados del petróleo, logrando así un menor impacto ambiental, reduciendo la producción de gases de efecto invernadero.
2. Los vehículos híbridos son considerados una tecnología de transición, que se empleará a mediano plazo, para facilitar la llegada de vehículos completamente eléctricos y vehículos de celdas de hidrógeno.
3. Los vehículos híbridos se clasifican en: vehículos híbridos en serie, cuando el motor térmico no propulsa directamente al vehículo, sino que lo hace a través del motor eléctrico. Vehículos híbridos en paralelo, cuando tanto el motor térmico como el motor eléctrico están acoplados a la transmisión y cualquiera puede impulsar al vehículo. Vehículos híbridos Serie/Paralelo o mixtos, cuando cualquier combinación de los motores térmico o eléctrico puede propulsar al vehículo.

4. Los vehículos híbridos generan energía a partir de la combustión de combustible en el motor térmico o por la función de freno regenerativo, que se utilizan para poner en funcionamiento al motor eléctrico y hacer que funcione como un generador de energía eléctrica, un complejo sistema de control electrónico se encarga de administrar esta energía y determina qué cantidad es necesaria para cumplir con las exigencias del vehículo, tanto en los sistemas principales como en los sistemas de confort y seguridad, y qué porcentaje de esta energía se debe almacenar en las unidades correspondientes.

RECOMENDACIONES

1. En el presente trabajo se presentan los principios básicos de los temas tratados, por lo tanto queda a discreción de quien lo consulte, investigar a fondo cada uno de ellos para comprenderlos de una mejor manera.
2. Comprender la tecnología de vehículos híbridos, pues es la base de lo que serán los vehículos del futuro, porque en ambos sistemas se utilizarán baterías para almacenar energía, motores eléctricos de tracción y generación, sistemas electrónicos de gestión y control, esto, entre otros sistemas que seguirán su desarrollo con base en lo que hoy tenemos.
3. Determinar con base en sus ventajas y desventajas, las implicaciones que pueda tener el uso de combustibles alternos, como: el etanol, bio-diesel, gas natural y propano, en motores de combustión interna.

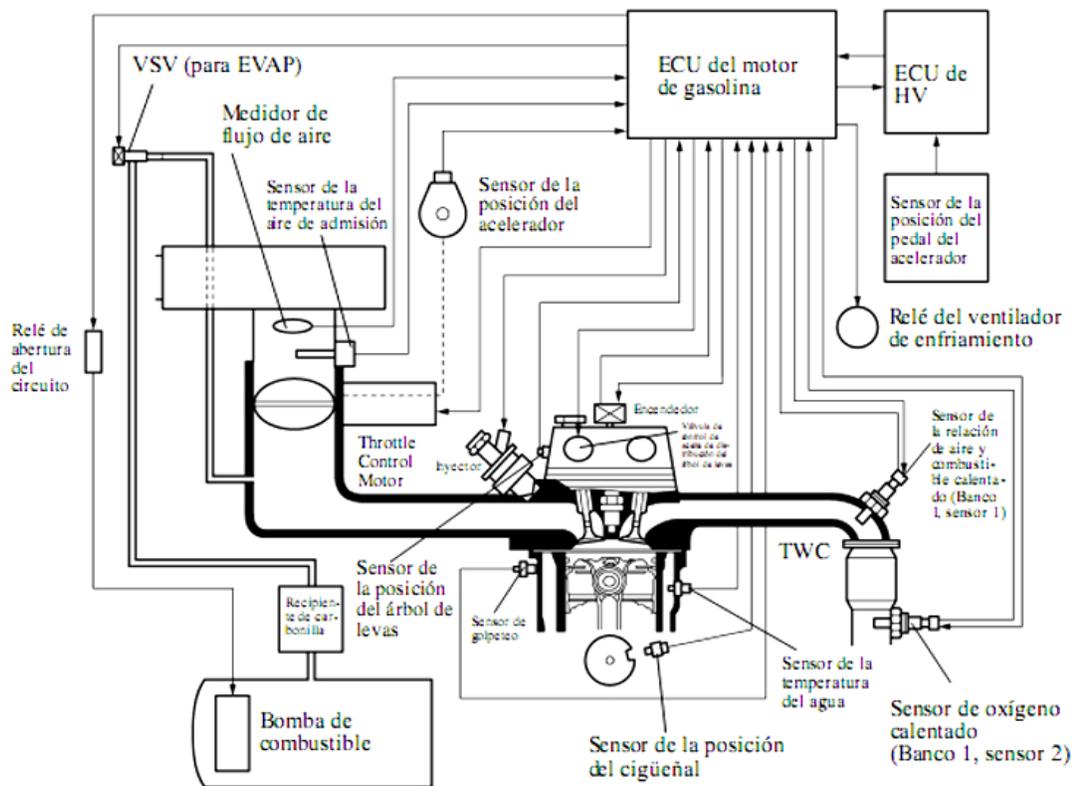
BIBLIOGRAFÍA

1. ARIAS-PAZ, Manuel. *Manual de automóviles*. 55a. ed. España: Dossat 2000, 2004. 1198 p. ISBN: 978-84-89656-58-1
2. AVALLONE, Eugene A. y BAUMEISTER III, Theodore. *Manual del ingeniero mecánico*. 9a. ed. Inglés, 3a. ed. Español. (Tomo I) México: Mcgraw-Hill, 1995. 1815 p. ISBN: 970-10-0662-3
3. BERMAN, Bradley, *History of hybrid vehicles* [en línea]. Estados Unidos. 27 de marzo de 2006 [ref. 27 de mayo de 2010]. Disponible en Web: <<http://www.hybridcars.com/history/history-of-hybrid-vehicles.html>>.
4. BOSCH. *Manual de la técnica del automóvil*. 3a. ed. España: Editorial Reverté S. A., 1996. 896 p. ISBN: 84-291-4806-X
5. EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; GAY, Sebastien y EMADI, Ali. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. Estados Unidos: CRC Press, 2004. 424 p. ISBN: 0-8493-3154-4
6. Energy Information Administration, *World proved reserves of oil and natural gas, most recent estimates* [en línea]. Estados Unidos. Marzo 2009 [ref. de 3 de mayo de 2010]. Disponible en Web: <<http://www.eia.doe.gov/international/reserves.html>>.
7. FUHS, Allen E. *Hybrid vehicles and the future of personal transportation*. Estados Unidos: CRC Press, 2008. 504 p. ISBN: 1-4200-7534-2

8. NAVET, Nicolas y SIMONOT-LION, Françoise. *Automotive embedded systems handbook*. Estados Unidos: CRC Press, 2008. 488 p. ISBN: 0-8493-8026-X
9. NERAD, Jack R. *Hybrid and alternative fuel vehicles*. Estados Unidos: Alpha Group, 2007. 224 p. ISBN: 1-4362-9428-2
10. Union of Concerned Scientists, *Hybrids under the hood* [en línea]. Estados Unidos. 31 de enero de 2009 [ref. 12 de julio de 2010]. Disponible en Web: <<http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood.htm>>.
11. Vehículo clásico, *Las pioneras (La cuadra)* [en línea]. España. 6 de febrero de 2007 [ref. 27 de mayo de 2010]. Disponible en Web: <<http://www.vehiculoclasico.es/es/marcas/pioneras/pioneras2.htm>>.

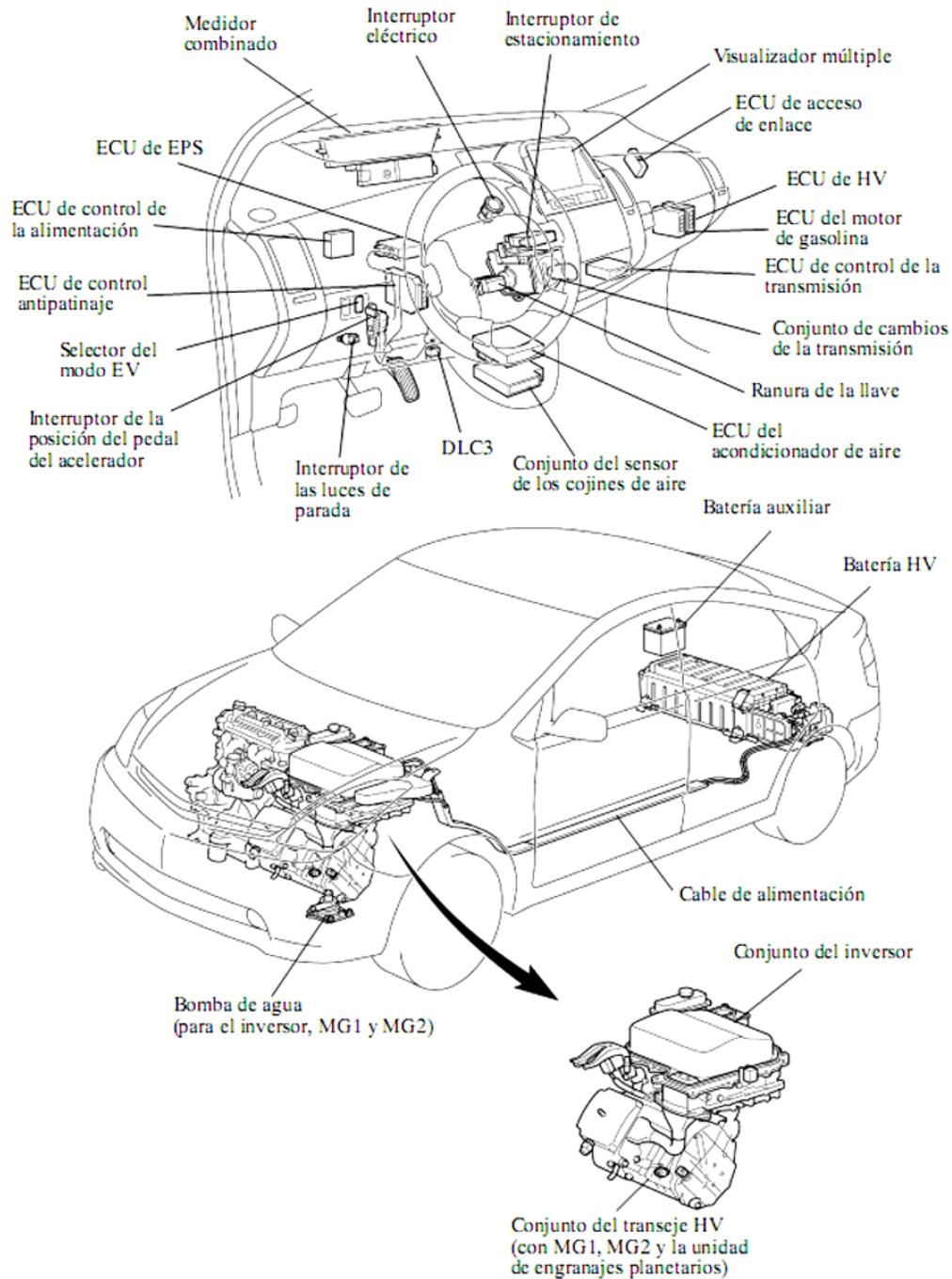
ANEXO

Diagrama del sistema de control del motor del Toyota Prius



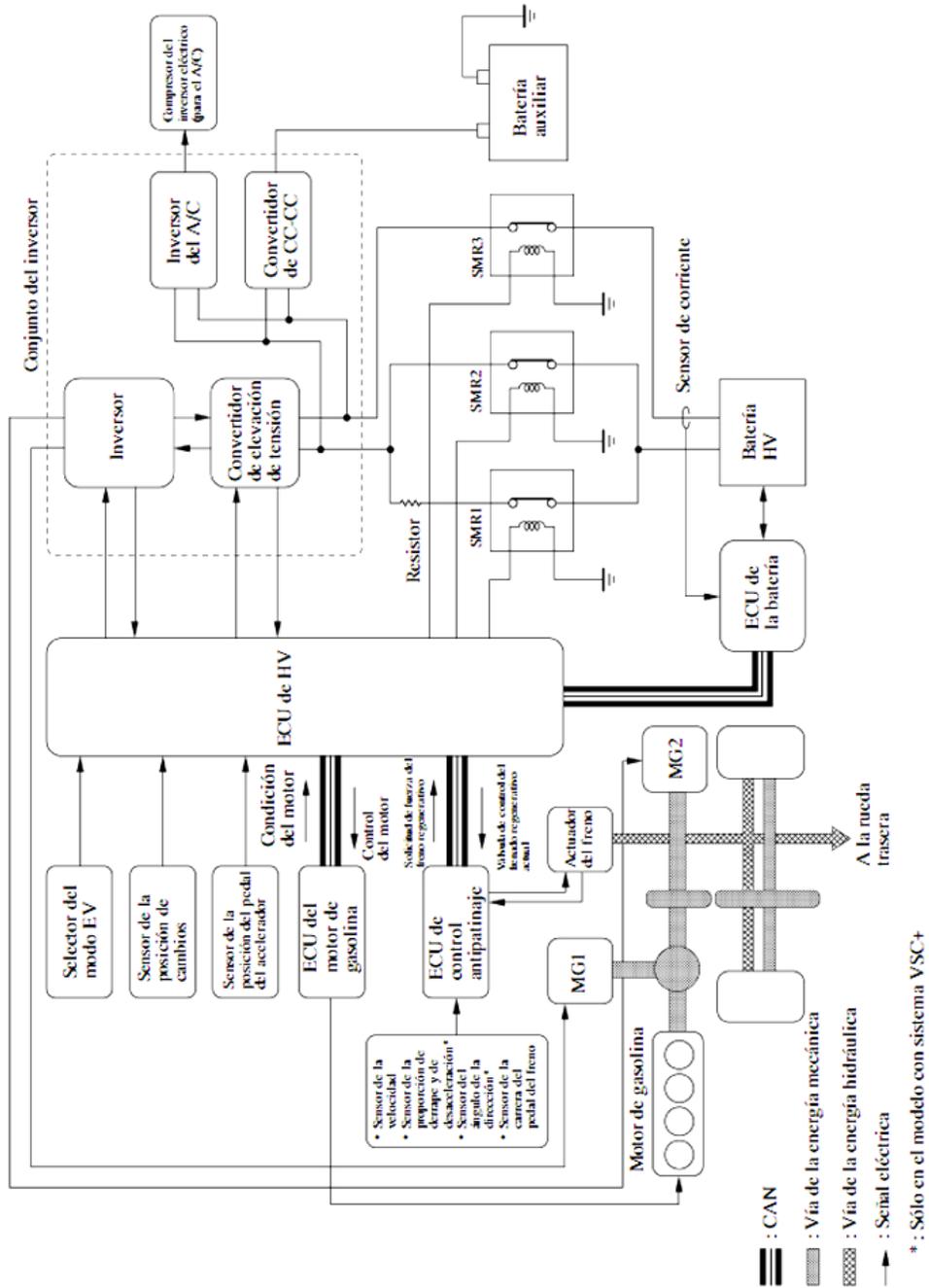
Fuente: www.techdoc.toyota-europe.com

Disposición de los elementos principales en el Toyota Prius



Fuente: www.techdoc.toyota-europe.com

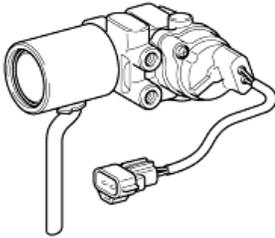
Diagrama del sistema del Toyota Prius



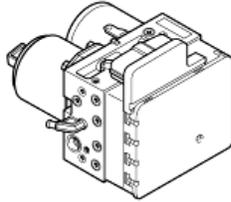
Fuente: www.techdoc.toyota-europe.com

Componentes del sistema de frenos del Toyota Prius

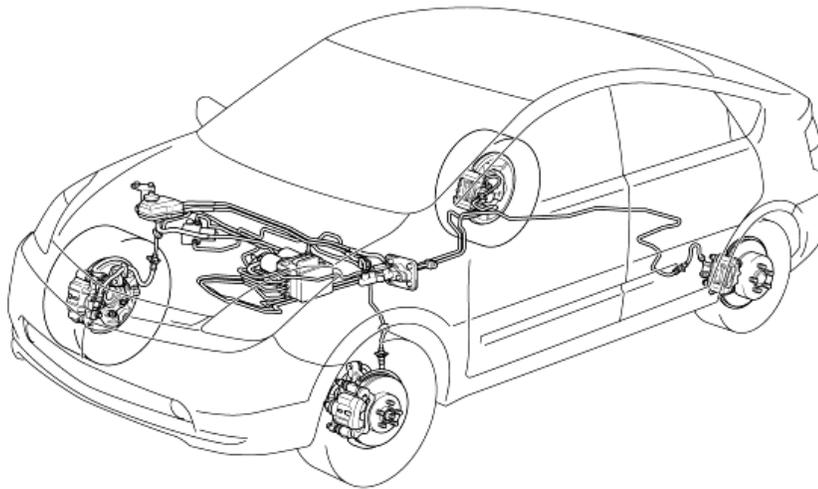
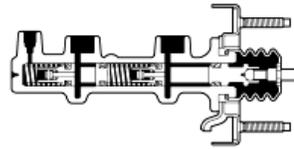
Simulador de carrera



Actuador del freno

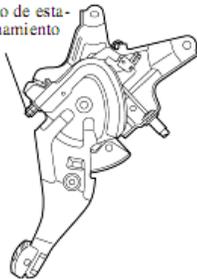


Cilindro principal

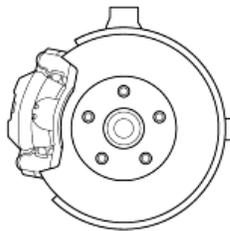


Freno de estacionamiento

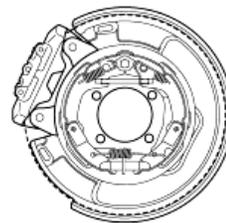
Ajustador del freno de estacionamiento



Freno delantero



Freno trasero



Fuente: www.techdoc.toyota-europe.com