

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN AUTOMOVIL ELÉCTRICO”

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO  
PRESENTA

VICENTE LEMUS PRADO

DIRECTOR

INGENIERO RODOLFO PETERS LAMMEL

MÉXICO DF

JUNIO 2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## ÍNDICE

1	Introducción.....	4
2	Planteamiento del problema.....	5
3	Hipótesis.....	5
4	Objetivos.....	5
5	Antecedentes.....	6
5.1	Historia del vehículo eléctrico.....	6
5.1.1	Etapas del desarrollo de los vehículos de vapor y eléctricos...	6
5.1.2	Relación entre la historia del petróleo y los automóviles.....	13
5.1.3	Vehículos eléctricos para el futuro.....	18
5.2	Impacto Ambiental.....	22
5.2.1	El problema ambiental.....	22
5.2.2	Solución ambiental.....	28
5.3	El automóvil eléctrico: Mitos y verdades.....	31
5.4	Costo de operación.....	34
6	Diseño del vehículo eléctrico.....	36
6.1	Parámetros de diseño.....	36
6.1.1	Peso y aceleración.....	36
6.1.2	Capacidad para subir cuestas.....	38
6.1.3	Peso y velocidad.....	39
6.1.4	Peso y rango de autonomía.....	40
6.1.5	Fuerza de arrastre aerodinámica.....	40
6.1.6	Fuerza de resistencia al rodamiento.....	45
6.2	Potencia y torque de un motor eléctrico.....	49
6.3	Cálculo de torque requerido y elección del motor.....	50

7 Baterías .....	61
7.1 Conceptos.....	61
7.2 Clases de baterías .....	62
8 Cargador de baterías.....	77
8.1 Conceptos.....	77
8.2 Cargador de baterías ideal.....	84
8.3 Cargador de baterías real.....	87
8.4 Métodos alternativos de carga.....	89
Bibliografía.....	94

## **1 INTRODUCCIÓN**

La presente investigación es motivada por la necesidad de colaborar a combatir el problema de la contaminación que agobia a los habitantes de la Ciudad de México. Durante varios años el gobierno capitalino ha intentado mejorar la calidad del aire basándose en disposiciones y reglamentos para obligar al automovilista a verificar el nivel de gases contaminantes emitidos por su automóvil así como nuevas fórmulas de gasolina, sin embargo la calidad del aire no ha mostrado ninguna mejoría significativa. De los contaminantes que recibe la atmósfera en el valle de México el 85% son desechos de la combustión de más de 44.4 millones de litros de combustible que se consumen diariamente en esta área; distribuidos en 25% en la industria, 11% en los hogares, 9% en la producción de energía eléctrica y el 55% en los transportes.<sup>1</sup> En esta tesis se propone el diseño de un automóvil de cero emisiones contaminantes que resuelva en gran medida este problema proporcionando además beneficios económicos al usuario.

Se abordará primero la historia de los automóviles eléctricos, de vapor y de combustión interna, se verán que factores llevaron a estos últimos a dominar el mercado por más de 75 años y porque ahora comienzan a perder hegemonía. En este contexto histórico se presentarán también soluciones alternativas actuales y a futuro como vehículos híbridos y de celdas de combustible.

Se tratara también el tema de la contaminación atmosférica provocada por los vehículos de combustión interna y se comparará con la producida por los vehículos eléctricos.

Actualmente los autos de baterías están envueltos en un velo de mitos y creencias en su mayoría desfavorables para su comercialización. Se brindarán argumentos para acabar con estos prejuicios como son baja velocidad limite, mala aceleración, rango de autonomía impráctico, costo elevado e inconveniencia de operación.

Se tiene además una comparación directa del costo de operación entre ambos tipos de vehículos.

---

<sup>1</sup> <http://www.pvem.org.mx/contaminacion.htm>

Posteriormente comenzará el desarrollo del auto en cuestión: un vehículo eléctrico de baterías, capaz de recorrer una distancia próxima a 150 km entre recargas de energía. El diseño de este automóvil es para dos personas debido a que un vehículo pequeño permite un mayor rendimiento en cuanto a velocidad, aceleración, distancia de recorrido entre cargas y economía.

El diseño comienza basado en consideraciones de algunas características del automóvil: peso, coeficiente aerodinámico, resistencia al rodamiento en general, así como las prestaciones deseadas: velocidad, aceleración y autonomía. En base a los resultados se seleccionará un tipo de motor, baterías, controlador y cargador dentro de los ofrecidos en el mercado actual con los cuales se completará el proyecto.

Se concluye el trabajo con algunas recomendaciones y observaciones generales que permitan impulsar el desarrollo de este tipo de vehículos.

## ***2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA***

El impacto en el medio ambiente causado por vehículos con motores de combustión interna cuyos productos resultantes son gases tóxicos que provocan contaminación y calentamiento de la atmósfera.

## ***3 HIPÓTESIS***

Sustitución, en la medida de lo posible, de los vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos de baterías en la Ciudad de México.

## ***4 OBJETIVOS***

Desarrollar un modelo de vehículo eléctrico como alternativa de transporte en la ciudad de México considerando el impacto positivo ambiental y económico.

## **5 ANTECEDENTES**

### *5.1 HISTORIA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO*

#### *5.1.1 Etapas del desarrollo de los vehículos de vapor y eléctricos.*

Los vehículos eléctricos se inventaron mucho antes que los vehículos de combustión interna, ambos han coexistido durante años y dada la perspectiva actual, los vehículos eléctricos seguirán existiendo cuando los de combustión interna ya no estén. En este capítulo se verá la historia de los vehículos eléctricos, los factores que contribuyeron a desaparecerlos casi por completo, las corrientes que los hicieron renacer y la importante posición que les depara el futuro.

En la figura 1 se observan los hitos del levantamiento y caída de tres tipos de vehículos:<sup>2</sup> a vapor, eléctricos y de combustión interna, así como sus interrelaciones con los conflictos mundiales relativos al petróleo. La figura muestra que el vapor como una fuente de energía para propulsar automóviles ha concluido, así mismo los vehículos eléctricos, dominantes en áreas urbanas a principios del siglo XX, regresan ahora después de desaparecer casi por completo. Se observa el dominio de 75 años de los vehículos de combustión interna, en la cual se hundió el desarrollo de los vehículos a vapor y eléctricos debido a precios bajos de gasolina, operación relativamente sencilla y la capacidad de viajar grandes distancias entre cargas de combustible. Sin embargo los motores de combustión interna pierden su atractivo cuando la humanidad comienza a ahogarse en sus emisiones contaminantes y observa como las reservas principales de petróleo son dominadas por fuertes conflictos políticos y económicos.

---

2.figura 1 - Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., pág.42

El desarrollo de los vehículos puede ser dividido en tres etapas o periodos cronológicos:

*Hasta 1915.* Este periodo marca la transición en la cual los vehículos autopropulsados dejaron de ser curiosidades científicas y de ingeniería para convertirse en transportes prácticos donde los primeros consumidores lograban desplazarse de manera eficiente en sus vehículos de producción. En esta etapa miles de fabricantes de vehículos han ido y venido. La oferta de vehículos a vapor y eléctricos fue ampliamente superada por los de combustión interna, debido al bajo costo del petróleo y la gasolina, y prácticamente los hizo desaparecer del mercado después de 1915.

*1915 a 1990.* Este periodo de 75 años puede ser llamado la edad de oro de los vehículos de combustión interna. Debido a la abundancia del petróleo y gasolina a bajo precio, como combustible principal, así como mejores diseños de motores y la economía de manufactura en grandes escalas, el precio de estos vehículos esta al alcance de muchos consumidores. La expansión de comunidades fuera del área urbana hizo del automóvil una necesidad. Se crearon grandes redes carreteras e infraestructura de transporte para estos vehículos.

*1965 a la fecha.* Este periodo se traslapa con el anterior ya que da comienzo de manera gradual una conciencia social sobre los problemas relacionados con los vehículos de combustión interna. Problemas serios de contaminación a mediados de los años sesentas permitieron ver a la sociedad las consecuencias ocasionadas por este medio de transporte al ambiente y los daños a la salud de las comunidades urbanas. Los embargos de petróleo por parte de los países del medio oriente, la escasez, las repentinas alzas de precio y los derrames ocasionados en el océano por accidentes nos permiten ver las consecuencias a largo plazo debidas a decisiones tomadas pensando a corto plazo sobre el uso de esta fuente de energía. Algunas quejas en los años sesentas se convertirían en verdaderos debates y manifestaciones públicas y políticas en los años noventas sobre los daños ocasionados al medio ambiente. El resultado final de la conciencia

desarrollada en este periodo es el renacimiento del interés en los vehículos propulsados mediante fuentes de energía alterna como un medio de transporte para el futuro inmediato. Acciones legislativas en países industrializados demandan fabricar vehículos con cero emisiones contaminantes forzando así el rediseño básico de los vehículos y convirtiendo al vehículo eléctrico en la solución ideal.

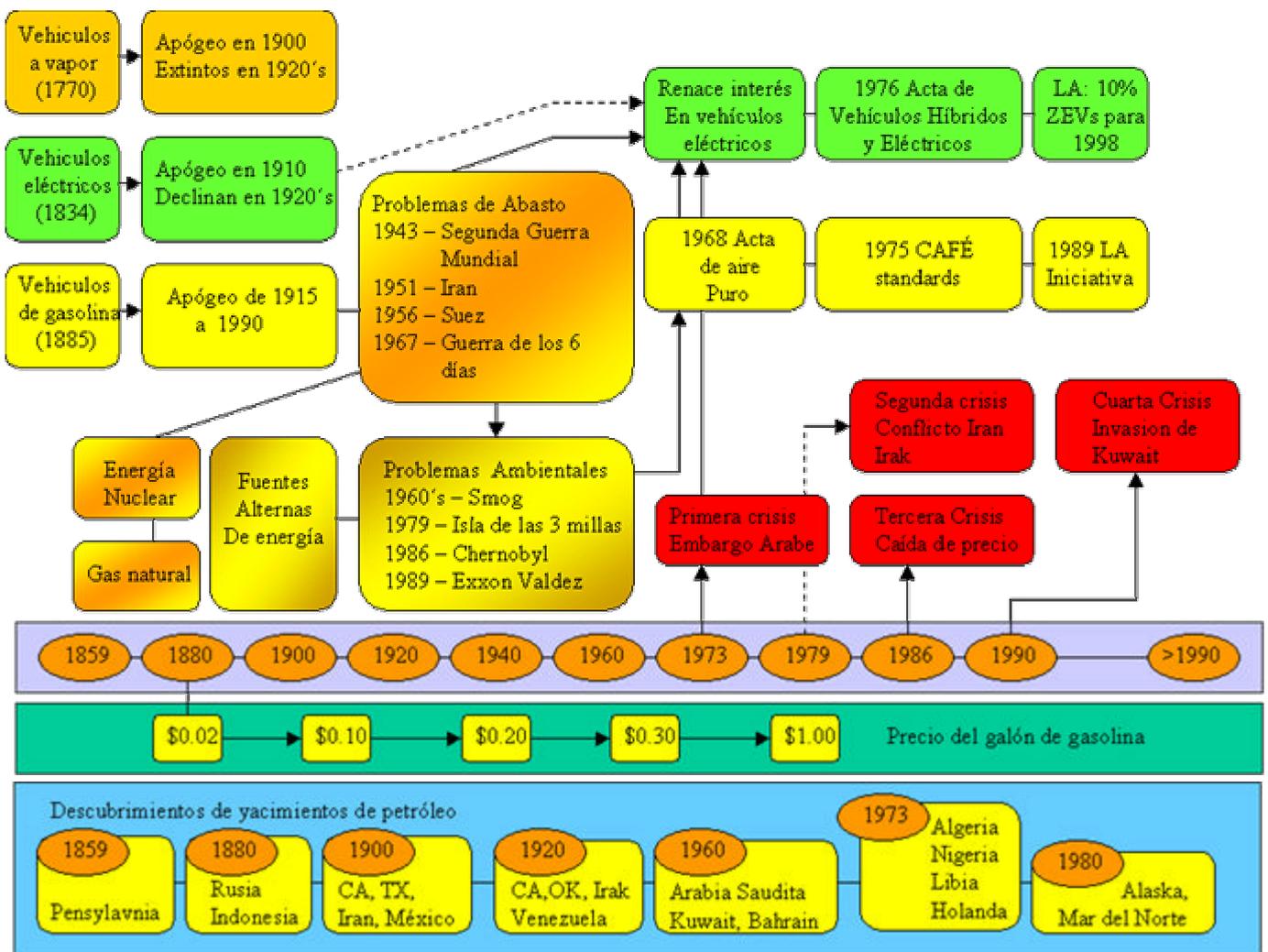


Figura 1. Relación entre los vehículos a vapor, eléctricos y de gasolina con la historia del petróleo

A continuación se verá con más detalle el desarrollo de los tres principales tipos de vehículos y como los sucesos mundiales relativos al petróleo están íntimamente ligados a la evolución de la tecnología automotriz.

Los primeros motores que aparecieron fueron los de vapor, esto es debido en gran parte a que en la región norte de Estados Unidos y Europa existen grandes depósitos de hierro y carbón, esta riqueza en materiales aunado al ingenio de los inventores dio a luz las primeras máquinas a vapor que a su vez iniciaron la revolución industrial. El clima de auge económico y científico dado por la revolución industrial permitió el nacimiento de invenciones eléctricas, las cuales más tarde dieron paso al desarrollo del motor de combustión interna. Los vehículos cuya fuerza motriz dependía de estos motores siguieron la misma secuencia de desarrollo.

#### Automóviles propulsados por motores a vapor

La máquina de vapor de James Watt (1765), reconocida por muchos como la responsable del inicio de la revolución industrial, es en realidad una mejora de la maquina de vapor de Thomas Newcomen (1712), esta máquina a su vez fue construida en base a diseños anteriores de Denis Papin. Sin embargo fue Nicolas Cugnot quien aplicó la tecnología de los motores a vapor para propulsar un vehículo en 1770. Cugnot, un distinguido ingeniero militar al servicio de la emperatriz María Teresa de Austria, empezó a desarrollar su idea de un vehículo militar impulsado a vapor. El diseño final fue capaz de alcanzar tan solo 9.5 km/h, pero funcionaba y con esto el imperio decidió financiar un nuevo proyecto. La segunda maquina a vapor de Cugnot aún existe en un museo francés, su diseño es muy peculiar, es un vehículo de tracción delantera y la hoguera cuelga de la parte frontal del vehículo creando un desbalance de peso y haciéndolo difícil de maniobrar. En 1801 Richard Trevithick, un pionero de los motores de vapor a alta presión, desarrolló una locomotora que sostuvo una velocidad de 15 km/h en la prueba realizada a finales de aquel año. La gran locomotora de Trevithick, que tenía ruedas traseras de dos metros de diámetro, realizó varios recorridos

relativamente libres de fallas. El desarrollo de los vehículos a vapor continuó durante varios años más, mejorando y diversificándose hasta llegar a los automóviles, varios fabricantes como Stanley, Locomobile y White compitieron contra los vehículos eléctricos y de gasolina hasta 1910. Los autos a vapor eran apreciados por su operación confiable y gran rango de autonomía sin embargo existía un problema con estos vehículos que es precisamente la producción del vapor. Se requieren grandes cantidades de agua para hervir y de carbón o madera como energético, así mismo se necesita bastante tiempo para calentar el agua y formar el vapor requerido para mover el automóvil, estas desventajas no son relevantes para la operación de una locomotora, pero resultaba impráctico para un vehículo pequeño. Cuando algunos avances tecnológicos mejoraron radicalmente los motores de combustión interna después de 1905 el mercado para los automóviles a vapor se terminó. Para 1911 White y Locomobile abandonaron los autos a vapor y se concentraron en la producción de autos de gasolina.

#### Automóviles propulsados por motores eléctricos

Alessandro Volta, basado en los experimentos de Luigi Galvani de 1782, inventó la batería eléctrica en 1800. Volta desarrollo su celda utilizando placas circulares de cobre y zinc como electrodos y cartón remojado en agua salada como electrolito. Las baterías de Volta efectivamente funcionaban pero su celda primaria no era capaz de retener energía suficiente para ser usada en los automóviles. Más tarde Joseph Henry creó el primer motor eléctrico de corriente directa en 1830. Michael Faraday demostró el principio de inducción y el primer generador eléctrico de corriente directa en 1831. Gaston Plante desarrollo unas baterías de plomo ácido recargables en 1859, estas baterías al ser conectadas a una fuente de corriente eléctrica revierten el proceso químico recargándose de esta manera. Los descendientes de estas baterías son aquellas que existen en todos los autos hoy en día.

En la figura 2 se ilustran los fabricantes más sobresalientes de autos eléctricos en Estados Unidos y el periodo de tiempo en el cual manufacturaron sus

productos<sup>3</sup>. En 1912, año cumbre para el desarrollo de los primeros vehículos eléctricos, se registraron cerca de 34,000 autos. El éxito de los vehículos eléctricos en estos años no es difícil de comprender, principalmente se comercializaban en áreas urbanas, con pequeñas distancias a recorrer, así que el rango de autonomía no era problema, así mismo existían apropiadas instalaciones de energía eléctrica para recargar las baterías.

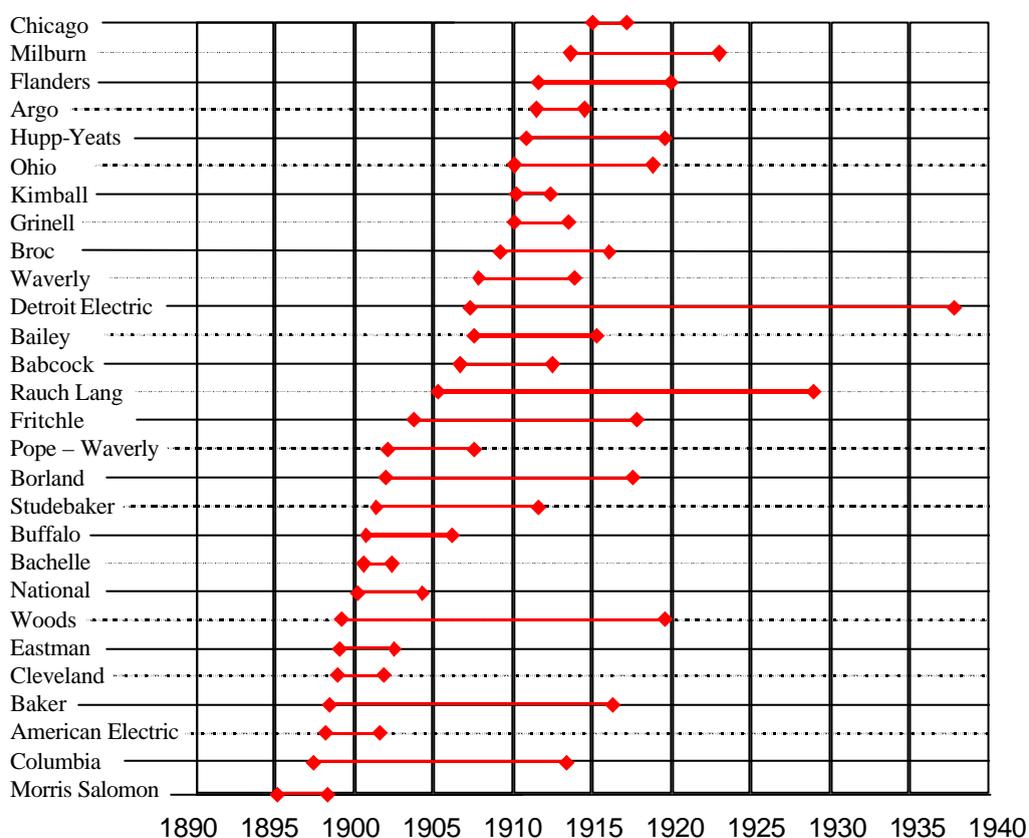


Figura 2. Principales fabricantes de automóviles eléctricos en EU hasta 1940

3.figura 2- Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., pág.46

La operación segura, sencilla, silenciosa y cómoda así como un mantenimiento económico y nada complejo los llevaron a un auge. La mercadotecnia también jugó un importante papel en el éxito de los autos eléctricos: ilustraciones con color mostraban los primeros autos de lujo en las calles de algunas ciudades importantes, con hombres “de mundo” al volante. Las características intrínsecas de los vehículos eléctricos apelaban sobretodo al gusto de las mujeres. Albert Pope, fabricante de autos eléctricos en Hartford, Connecticut, proclamaba: “Uno no puede sentar a personas sobre explosiones”,<sup>4</sup> haciendo alusión a los autos con motores de combustión interna, frase considerada cierta para muchos consumidores, particularmente mujeres, quienes se integraban a este mercado de manera sustancial. Los autos eléctricos se empezaron a comprar para mujeres y la mercadotecnia se enfocó aún más a ellas. El coupé Flanders 20 era anunciado en letreros de 1910 como “El vehículo ideal para transportar a una dama a realizar compras o llevarla a sus reuniones sociales”. El modelo de Woods Electric de 1911 era “La elección perfecta para hombres de negocios así como para transportar a Su Majestad, la mujer Americana”.<sup>5</sup> Citando a Virginia Scharff de su libro *Tomando el volante: La mujer y la era del automóvil*, “Se consideraba a la mujer demasiado débil, tímida y desinteresada en manejar ruidosos autos de combustión interna que dejaban escapar olor a gasolina y humo.”<sup>6</sup> Los autos eléctricos que se producían en masa a principios del siglo XX se fabricaban con varias características acordes tanto para el gusto de hombres como para mujeres.

La era de los automóviles eléctricos declinó en parte por el invento de Charles Kettering en 1912, un dispositivo eléctrico adaptado a los vehículos de combustión interna para arrancarlos de forma cómoda y sin necesidad de una manivela, con esta invención se eliminaba una de las últimas ventajas que le quedaban al auto eléctrico sobre el de combustión interna. El arrancador eléctrico

---

<sup>4</sup> Foward Drive; Jim Motavalli 2000; 1a. edición; TJ International; 193 páginas; Pág. 12

<sup>5</sup> *ibid.* Pág.13

<sup>6</sup> *idem.* Pág. 13

de Kettering tuvo un éxito rotundo en la industria, mismo que se vio reflejado en las ventas de los autos eléctricos que cayeron a 6000 vehículos en 1913, ese mismo año tan solo el Ford T vendió 182,809 modelos<sup>7</sup>. Los fabricantes de autos eléctricos desaparecieron casi en su totalidad, algunas pocas firmas especializadas, como el líder de la industria Detroit Electric, sobrevivió hasta los años veintes, produciendo principalmente autos enfocados a las altas esferas sociales. El mercado del auto eléctrico declinó tan pronto como algunas de sus características negativas fueron realmente divisadas por primera vez por los consumidores; precio alto, baja velocidad y rango de autonomía muy limitado.

No hay duda que el desarrollo del auto eléctrico pudo continuar significativamente su evolución, pero sin industria y consumidores para soportarlo este quedó prácticamente estancado.

### *5.1.2 Relación entre la historia del petróleo y los automóviles*

La historia de los vehículos de combustión interna tiene una estrecha relación con la historia del petróleo, el tremendo desarrollo de este tipo de vehículos se debe a la gran ventaja económica que proporciona el petróleo como combustible más que a alguna ventaja técnica intrínseca a este tipo de motores. A continuación se detalla lo más trascendente de la historia del petróleo con la finalidad de entender el éxito de los autos con motor de gasolina y diesel.

Durante varios años los aceites de origen animal se utilizaron para proveer iluminación y calefacción, solo hasta 1850 aproximadamente fue cuando los aceites minerales se consideraron alternativas superiores. Algunos investigadores descubrieron un nuevo aceite de gran calidad para producir iluminación, el kerosén, que se podía extraer mediante el refinamiento del petróleo.

El descubrimiento de petróleo en Pennsylvania por Edwin Drake en 1859 fue el inicio de la revolución petrolera. En corto tiempo se produjo en aquel estado un auge de explotación de petróleo y sus productos derivados, que se empezaron a exportar y fue trascendente en la economía de Estados Unidos. Lo promisorio de

---

<sup>7</sup> Foward Drive; Jim Motavalli 2000; 1a. edición; TJ International; 193 páginas; Pág. 14

la situación económica atrajo a varios hombres de negocio, quienes en poco tiempo monopolizaron la industria del petróleo a nivel mundial, empresas como Standard Oil de John Rockefeller (producción y distribución en Pennsylvania), Ludwig y Robert Nobel (producción en Baku, en la zona Rusa del Mar Caspio), Alphonse y Edmond Rothchild (producción en Baku y distribución en Batum en el Mar Negro, Shell (producción y distribución desde Batum y Borneo) y Royal Dutch (producción desde Sumatra e Indonesia). Todas estas empresas se enfocaban en la obtención de keroseno y productos lubricantes, en 1890 la gasolina, que se desechaba después de obtener el keroseno, apenas tenía un costo comercial de un centavo de dólar por dos litros.<sup>8</sup>

El carbón fue el combustible básico durante la revolución industrial y el primer motor de combustión interna construido en 1860 por Etienne Lenoir utilizaba este energético. Más tarde Nikolaus Otto mejoró el diseño al innovar con el concepto de motor de cuatro tiempos en 1876. El descubrimiento de las propiedades de la gasolina como un mejor combustible disparó el auge de los motores de combustión interna. Lo único que faltaba en este punto para desarrollar motores de gasolina era controlar la explosión de la mezcla aire gasolina así como controlar los tiempos de ignición— resuelto por el diseño de carburador de Gottlieb Daimler en 1885 y Karl Benz. Así emergió el motor de combustión interna como hoy se conoce.

Los primeros autos de combustión interna eran muy ruidosos y difíciles de conducir, susceptibles a incendiarse por fallas mecánicas o accidentes aún a bajas velocidades lo cual los categorizaba como peligrosos en los anuncios de sus competidores, los autos de vapor y eléctricos.<sup>9</sup> Los primeros fabricantes como Daimler (Alemania, 1886), Benz (Alemania, 1888), Duryea (Estados Unidos, 1893), Peugeot (Francia, 1894) y Bremer (Inglaterra, 1894) eran sencillos diseños de ingeniería en búsqueda de un nicho comercial dominado por los autos a vapor y los lujosos autos eléctricos de la época.

---

<sup>8</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw -Hill; 310 págs., pág.48

<sup>9</sup> Ibid. pág.49

Mientras tanto se descubrieron más reservas de petróleo en Los Angeles en 1890, en Beaumont Texas en 1901 y en Oklahoma a principios de 1900, esta abundancia en reservas así como la demanda de aceites lubricantes y otros derivados provocaron que el precio de la gasolina se mantuviera estable durante más tiempo sembrando el camino para el fácil desarrollo de los motores de gasolina.

En 1909 Henry Ford había producido ya varios diseños inspirado en invenciones anteriores expuestas en carreras y exposiciones, como un cuadríciclo en 1896 y diseños posteriores en 1899 y 1901, así como los modelos A, B, C, F, N, R, S y K predecesores del T, cuya producción en masa y un solo color de modelo, a un precio de 850 dólares, ubicó de manera contundente a los automóviles de gasolina. El modelo Ford T de cuatro cilindros, 20 caballos de potencia y 545 kg creó un éxito total logrando una demanda que duraría casi 19 años, se construyeron más de 15,000,000 hasta que cesó la producción en mayo de 1927. Al producir prácticamente el mismo modelo año tras año y debido a los volúmenes de producción y venta Ford pudo bajar el precio de su auto año con año hasta llegar a 290 dólares en 1924. No solo el bajo precio contribuyó al éxito de este auto sino también su economía y facilidad de operación<sup>10</sup>.

En otras partes del mundo el mercado del petróleo se había consolidado en las manos de dos empresas petroleras para 1907: Standard Oil y Royal Dutch Shell, aunque poco tiempo duró esta situación ya que en 1911 una investigación lanzada a Standard Oil por el presidente de los Estados Unidos en aquellos días, Theodor Roosevelt, determinó separar a Standard Oil en varias compañías al encontrarla culpable de prácticas monopólicas. Las empresas que surgieron son Standard Oil de Nueva Jersey (Exxon), Standard Oil de Nueva York (Mobil), Standard Oil de California (Chevron), Standard Oil de Ohio (Sohio-BP/ América), Standard Oil de Indiana (Amoco), Continental Oil (Conoco) y Atlantic (ARCO/Sun). Con este rompimiento nacieron las empresas transnacionales que se conocen al día de hoy. Standard Oil de Indiana desarrolló un proceso en 1913 que permitió

---

10 Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., Pág.49.

obtener más del doble de gasolina de lo que se obtenía de un barril de crudo en aquellos días, recuperando hasta un 45% en gasolina.<sup>11</sup> Se descubrió petróleo en Tampico en 1910 y en Persia (ahora Irán) otro importante yacimiento que terminó en la construcción de una refinería en 1912 con una gran inversión Anglo-Persa.

Mientras tanto en Estados Unidos se consolidaban nuevas empresas automotrices a partir de fusiones, tal es el caso de General Motors incorporada por William Durant en septiembre de 1908 con la unión de Buick, Chevrolet, Cadillac, Oldsmobile, Oakland y GMC Trucks así como la unión entre las empresas de Walter Chrysler y John y Horace Dodge.

El desarrollo de los vehículos de combustión interna llegó a un auge mundial en poco tiempo y en los Estados Unidos se tuvo un crecimiento aun mayor después de la segunda guerra mundial. Lo que hizo esto posible fue el bajo costo del petróleo que se mantuvo prácticamente estable en un periodo de 50 años, ver figura 1.3. La industria automotriz tuvo un desarrollo sin límites ya que el energético principal estaba altamente disponible, además no existían aún problemas relacionados con la contaminación provocada por estos vehículos así como ninguna conciencia ecológica en la mayoría de las sociedades.

Este panorama estaba por cambiar muy pronto. En la figura 1 se muestra también los problemas relacionados con el descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo y es que no se han encontrado nuevos yacimientos importantes desde Alaska y el Mar del Norte dos décadas atrás. La preocupación debido al agotamiento de las reservas de petróleo comenzó a principios de los años sesentas, prueba de esto es la introducción de energía nuclear y de gas natural como fuentes alternas de energía. La creciente opinión pública con respecto a la contaminación ambiental causada por los motores de combustión interna comenzaba a crecer. Fuertes presiones del gobierno lograron que en 1968 la industria automotriz cumpliera con el acta de Aire Limpio, la cual exige que se acaten ciertos niveles máximos de emisión de contaminantes. En 1975 se dio la iniciativa de Economía Corporativa de Combustible (CAFE) que fue una medida

---

<sup>11</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., Pág.51.

para reducir el consumo de gasolina de los automóviles vendidos en Estados Unidos ya que prevalecía una escasez de petróleo a nivel mundial.

Algunas crisis menores en el abastecimiento de petróleo, como el cierre de la refinería de Abadán en Irán en 1951, el cierre de Egipto del canal de Suez en 1956 y la guerra de los seis días en 1967, se solucionaron con cierta facilidad al operar de manera conjunta gobiernos y compañías petroleras redireccionando la cantidad de petróleo en exceso producida por Estados Unidos. En 1973, con el embargo árabe ya no se pudo realizar esta operación ya que los Estados Unidos

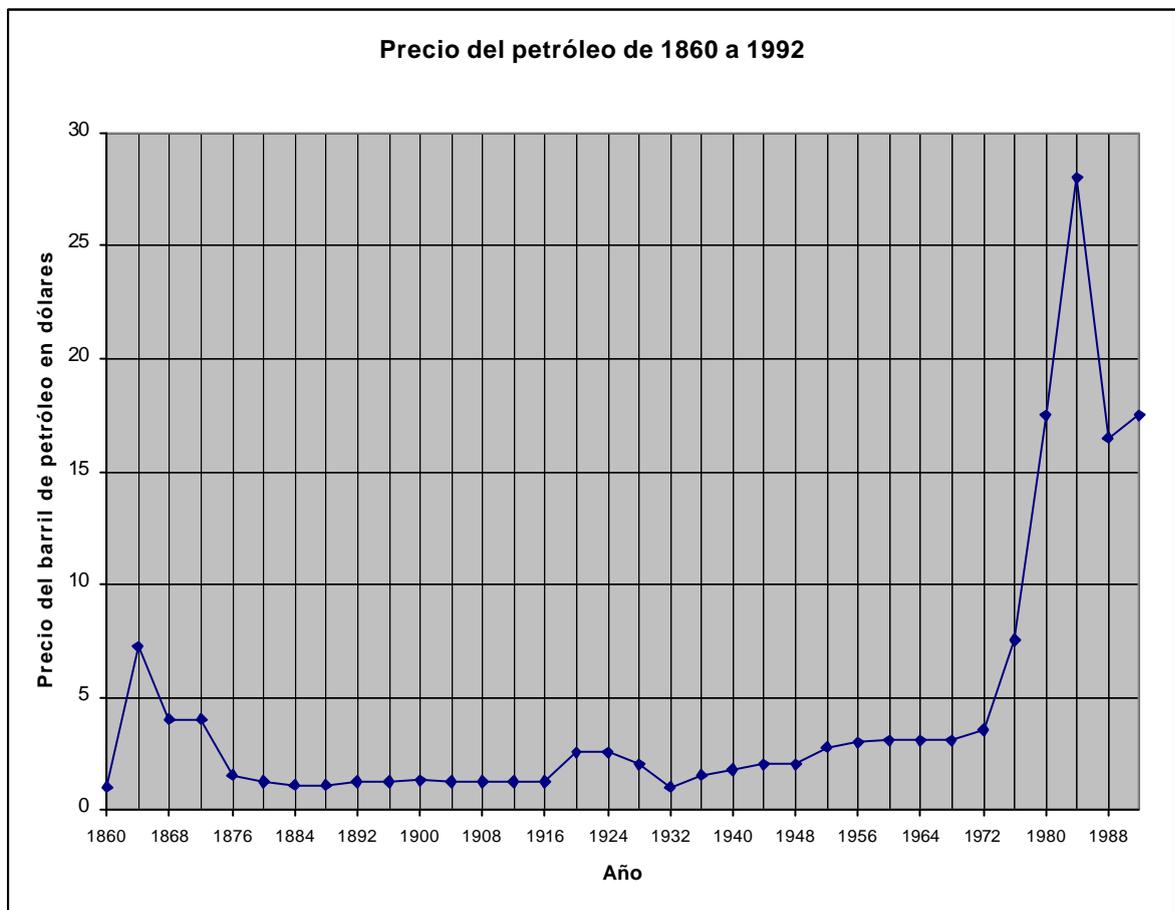


Figura 1.3 Precio del barril de petróleo en dólares de 1860 a 1992

habían alcanzado un máximo de explotación de 11.3 millones de barriles diarios de petróleo y no quedaba nada de producción sobrante para la demanda mundial.

Las siguientes percepciones universales garantizan el impacto duradero de las diversas crisis de petróleo mundiales:

- 1) El medio ambiente esta en grave amenaza por la contaminación, en gran parte contaminación atmosférica producida por los motores de combustión interna.
- 2) La seguridad del abastecimiento de crudo esta en juego, tanto por el agotamiento de las reservas como por los conflictos políticos y económicos mundiales.
- 3) Existe una necesidad real de conservar los recursos no renovables como el petróleo, del cual se obtienen varios productos derivados como plásticos, lubricantes y productos farmacéuticos.

Los problemas ambientales de hoy así como los impactos provocados por las crisis del petróleo provocan el resurgimiento del interés en los vehículos propulsados por fuentes de energía alterna.

### *5.1.3 Vehículos eléctricos para el futuro*

#### Vehículos híbridos

Los automóviles híbridos son considerados por muchos como la solución actual más viable para resolver en gran medida los problemas ambientales generados por los autos de combustión interna. Los diseños actuales permiten obtener un gran rendimiento de combustible como es el caso del Toyota Prius que rinde 22 km/l y es un 90% más limpio que el auto de combustión interna promedio.<sup>12</sup>

Existen dos clases principales de automóviles híbridos, en serie y en paralelo. En un modelo serie se utiliza un pequeño motor de gas o diesel como generador produciendo energía para el motor eléctrico y recargando el juego de

---

<sup>12</sup> <http://www.ccities.doe.gov/pdfs/snapshot.pdf>

baterías que usualmente utilizan. Las baterías también reciben energía a partir de un ingenioso sistema llamado frenos regenerativos los cuales capturan parte de la energía cinética del automóvil cuando este desacelera.

Los híbridos paralelos, actualmente en producción por algunas empresas automotrices, contienen dos sistemas de poder discretos, tanto el motor eléctrico como el de gas proporcionan directamente la energía para mover al auto. En un ejemplo de auto híbrido en paralelo este arranca con sus baterías eléctricas y las utiliza mientras se maneje a baja velocidad, cuando las baterías hayan perdido el 40% de su carga o se requiere desarrollar gran aceleración el motor de combustión interna entra en funcionamiento. La computadora del automóvil selecciona que tipo de planta de poder se utiliza realizando cambios prácticamente imperceptibles entre ambas. Ejemplos son el Toyota Prius comercializado en algunos naciones desde julio del 2000 con un precio actual de USD 20,500 <sup>13</sup> y el Honda Insight a la venta desde diciembre de 1999 cuyo valor actual es de USD 19,180.<sup>14</sup> Es importante considerar que el precio de estos automóviles es subsidiado por el fabricante ya que el costo de producción es de USD 35,000 para el Prius y de USD 28,000 para el Insight.<sup>15</sup>

El problema con los automóviles híbridos es en parte su complejidad de fabricación y costo ya que es más elevado que el de automóviles de gasolina similares en tamaño y lujo, así mismo no son automóviles que produzcan cero emisiones contaminantes.

#### Vehículos eléctricos con celdas de combustible

La celda de combustible, cuyo principio se demostró por primera vez en 1839, constituye un perfecto ejemplo de tecnología científicamente probada que no pudo encontrar ninguna aplicación práctica durante la vida de su inventor, de

---

<sup>13</sup> <http://www.toyota.com/vehicles/2004/prius/index2.html>

<sup>14</sup> [http://www.hondacars.com./models/model\\_overview.asp?ModelName=Insight&bhcp=1&Browserdetected=True](http://www.hondacars.com./models/model_overview.asp?ModelName=Insight&bhcp=1&Browserdetected=True)

<sup>15</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1ª edición; TJ International;193 págs.; Pág. 155.

hecho Sir William Robert Grove (1811-1896) expresó que los usos prácticos a su “batería de gas” no le interesaban en lo más mínimo.

La mayoría de los combustibles que utilizamos contienen cierta proporción de átomos de hidrógeno, el más simple de los elementos, combinados con átomos de carbón. Cuando el combustible se quema el hidrógeno se separa y se combina con el oxígeno de la atmósfera formando agua, liberando energía en este proceso. El hidrógeno por si solo constituye una fuente de energía muy valiosa ya que tiene la ventaja que el resultado de su proceso es agua pura, no existe ninguno de los productos contaminantes que surgen de la combustión de otras fuentes de energía como la gasolina, el diesel o el carbón. La razón por la cual no se utiliza el hidrógeno como combustible es porque resulta prácticamente imposible encontrarlo en estado puro, a pesar de ser un elemento muy común se encuentra mezclado con otros elementos y los métodos de separación resultan muy costosos. Los átomos de oxígeno e hidrógeno en el agua se pueden separar mediante un proceso denominado electrolisis, que consiste en hacer circular una corriente eléctrica a través del agua y recolectar los átomos de cada gas por separado en los puntos donde la corriente entra y donde sale. El hidrógeno también puede separarse del agua al calentarla a temperaturas superiores a los 2760 grados centígrados.

El hidrógeno puede ser utilizado para producir electricidad al mezclarlo con el oxígeno en una cámara cerrada llamada celda de combustible, los dos gases se vierten a la celda y el electrolito, generalmente ácido fosfórico o hidróxido de potasio, causa que ambos elementos se unan generando electricidad en el proceso. Los únicos productos de la reacción son calor y agua caliente haciendo de la celda de combustible una forma de producir energía limpia y conveniente. Una celda genera poco menos de un volt, pero las celdas de combustible pueden ser agrupadas y conectadas para producir más voltaje. En un auto con celdas de hidrógeno puro las emisiones contaminantes son inexistentes, no así en los autos equipados con reformadores o extractores de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Aunque los protectores del medio ambiente favorecen a las celdas de hidrógeno puro la industria automotriz se inclina a utilizar reformadores con los

combustibles familiares. En 1997 un proyecto conjunto entre la empresa Arthur D. Little, Latham y el Departamento de Energía de los Estados Unidos demostraron al público un reformador de gasolina, lo que implica un logro importante. La gasolina es uno de los combustibles más difíciles de reformar ya que contiene sulfuro, el cual contamina a las celdas de hidrógeno, pero el reformador desarrollado captura el sulfuro antes de que penetre a la celda. La tecnología de los reformadores de gasolina aprovecha la infraestructura actual de distribución de combustible, evita el tener que transportar en el automóvil un tanque lleno de hidrógeno, potencialmente peligroso en caso de accidente, y reduce de manera significativa la emisión de contaminantes comparado con un auto de combustión interna convencional. Sin embargo aún hay algunos problemas por afinar al reformar un combustible altamente refinado como la gasolina por lo que los fabricantes de autos se inclinan más a refinar el metanol. Es importante recordar que los vehículos equipados con estos dispositivos reformadores no cumplen con el principio de cero emisiones contaminantes.

El excedente de energía eléctrica generada en la noche, cuando hay poca demanda, puede ser utilizada para generar hidrógeno y oxígeno a partir de electrolisis y almacenar estos gases en estado líquido para su posterior distribución y en el futuro será posible la obtención del hidrógeno a partir de generación eléctrica de fuentes de energía renovables como la eólica o la solar.

Por otro lado los problemas de seguridad relativos al hidrógeno no deben ser minimizados pero tampoco deben descalificar al hidrógeno como una viable fuente de energía para propulsar a los automóviles del futuro.

## 5.2 IMPACTO AMBIENTAL

### 5.2.1 El problema ambiental

El impacto en el medio ambiente causado por vehículos con motores de combustión interna tiene un alcance muy profundo (ver figura 4). Los productos resultantes de la combustión son gases tóxicos que provocan contaminación y calentamiento de la atmósfera. El funcionamiento de estos motores, clasificados entre los dispositivos mecánicos menos eficientes del planeta, genera serios problemas ambientales y estos se pueden analizar de la siguiente manera:

- 1) Contaminación del aire
- 2) Efecto invernadero
- 3) Contaminación por desechos sólidos

El problema es más evidente en las zonas con mayor concentración de automóviles como las ciudades. Una posible solución es encontrar modos más eficientes de transporte que utilicen fuentes de energía alterna y limpia.

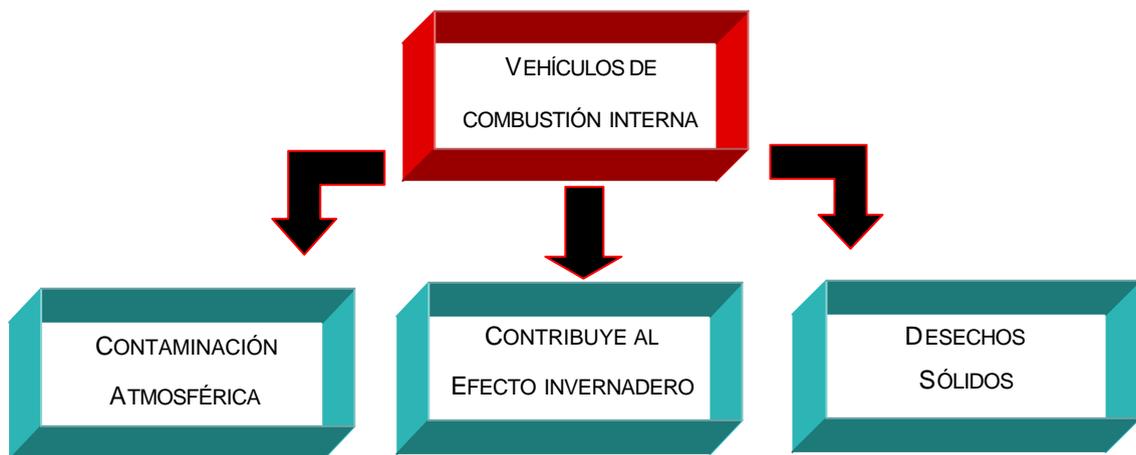


Figura 4. Problemas de contaminación relacionados con los motores de CI

## Contaminación del aire

La palabra contaminación ha entrado a formar parte del lenguaje cotidiano. Este término designa el conjunto de productos que, vertidos al medio ambiente, provocan un daño o perjuicio a los seres vivos. La contaminación del aire se ha convertido en uno de los problemas más serios en las comunidades urbanas.

A nivel nacional, la contaminación atmosférica se limita a las zonas de alta densidad demográfica o industrial. Las emisiones anuales de contaminantes en el país son superiores a 16 millones de toneladas, de las cuales el 65 % es de origen vehicular. En la Ciudad de México se genera 23.6 % de dichas emisiones, en Guadalajara el 3.5 %, y en Monterrey el 3 %. Los otros centros industriales del país generan el 70 % restante. De los contaminantes que recibe la atmósfera en el valle de México 15% son polvos que provienen de áreas carentes de una cubierta vegetal y el 85% son desechos de la combustión de más de 44.4 millones de litros de combustible que se consumen diariamente en esta área; distribuidos en 25% en la industria, 11% en los hogares, 9% en la producción de energía eléctrica y el 55% en los transportes.<sup>16</sup> El crecimiento acelerado de la población en la Ciudad de México, la expansión de la mancha urbana y los usos especializados del suelo, generan día con día una creciente necesidad de desplazamiento de personas y bienes; se requiere de más y mejores servicios de transporte. Los combustibles consumidos por los transportes, la industria, los servicios y en los hogares de la Ciudad de México y su zona metropolitana superan en mucho al gasto de energéticos de cualquier ciudad capital del país.

La contaminación del aire en la Ciudad de México es un fenómeno complejo en donde intervienen elementos como: cantidad de energéticos consumidos (gasolina, diesel, combustóleo, gas, etcétera); calidad y tipo de los combustibles; tipo, estado y operación de los equipos de combustión; el control de la combustión y de emisiones en vehículos, granulometría de los suelos; las condiciones meteorológicas y las condiciones físico-químicas de la atmósfera. La

---

<sup>16</sup> <http://www.pvem.org.mx/contaminación.htm>

contaminación atmosférica se expresa por un volumen considerable de gases provenientes principalmente de la combustión de diversos materiales; el bióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre son los más importantes compuestos que provocan cambios en la composición del aire, mismos que se manifiestan en la inversión térmica, lluvia ácida, efecto invernadero y la alteración de la capa de ozono.

La gasolina y el diesel son compuestos altamente complejos que no se queman de manera completa dentro del motor. Una combustión incompleta en las cámaras de ignición resulta en una salida de hidrocarburos y otros productos parcialmente quemados los cuales reaccionan posteriormente con la luz solar en la atmósfera. A continuación se enlistan los principales contaminantes atmosféricos.

- *Ozono ( $O_3$ )*. El ozono se forma cuando los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos se mezclan en presencia de luz solar. Al contrario de la capa superior de ozono en la atmósfera que nos protege de la radiación ultravioleta, la capa inferior de ozono que se forma por los procesos de combustión interna causa problemas a la salud tales como irritación de ojos y nariz, desencadena y complica el asma, retarda el aprendizaje y deteriora las defensas del cuerpo a las infecciones.
- *Partículas suspendidas*. Este material incluye una mezcla de distintas sustancias: polvo, suciedad, humo. Entre otras, las fuentes de partículas son las emisiones vehiculares, las fábricas, la actividad de la construcción, la quema de combustible a cielo abierto, las tolvaneras y los incendios. Otras partículas se forman en la atmósfera o por transformación de otras sustancias químicas. Son especialmente dañinas las muy pequeñas, menores a 10 micrómetros, ya que su pequeño tamaño les permite llegar a los pulmones.
- *Monóxido de carbono (CO)*. Es un gas incoloro e inodoro muy venenoso, que proviene sobre todo de la combustión incompleta de combustible y otros materiales orgánicos. Los mayores niveles de este gas se encuentran en estacionamientos cubiertos, casas con calentadores de gas, túneles, y

otros lugares en los que la combustión se realice en condiciones de pobre oxigenación. Al respirar este gas, se une con fuerza a la hemoglobina e impide el transporte de oxígeno hasta los tejidos, lo que conduce a distintos problemas de salud, desde simples dolores de cabeza por insuficiente oxigenación cerebral, confusión, somnolencia, disminución en la agudeza visual hasta la muerte.

- *Oxidos de nitrógeno (NOx)*. Afectan sobre todo al aparato respiratorio, y llegan a producir retraso en el crecimiento y afectar la respuesta inmune. Incluyen al óxido de nitrógeno (NO) que es un gas incoloro e inodoro el cual se convierte fácilmente en dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en presencia del oxígeno. El NO<sub>2</sub> es un gas venenoso de color marrón con un fuerte olor que destruye el tejido pulmonar.
- *Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)*. Al mezclarse con agua forma la lluvia ácida, que produce daños en monumentos, en la vegetación y en la materia viva microscópica en la tierra y cuerpos de agua. Es un irritante potente de las vías respiratorias y de los ojos, en las que también se combina con la humedad de las mucosas.
- *Plomo (Pb)*. El plomo en la gasolina es tan dañino que su uso ha disminuido drásticamente. El sistema nervioso central es el más afectado por este metal pesado, y en niños incluso concentraciones pequeñas provocan daños en la capacidad de aprendizaje, en el comportamiento y en la coordinación. La exposición del feto al plomo provoca bajo peso al nacer, prematuridad y desórdenes en el desarrollo mental.
- *Hidrocarburos*. Proviene principalmente de los vehículos, pero sólo el 20% deriva de las emisiones propiamente dichas, y el restante 80% procede de evaporación en distintos niveles (carburador, bomba de gasolina, etc.) debido a malas uniones entre estos elementos del motor de combustión interna. Su importancia radica en que al combinarse con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz del sol produce ozono. Algunos hidrocarburos son cancerígenos y provocan irritación en las membranas nasales.

Los fabricantes de automóviles son sometidos en la actualidad a cumplir con ciertos niveles de emisión de contaminantes así como un consumo promedio de gasolina en sus productos. Los procedimientos de control de contaminación son requisitos que cada automovilista debe cumplir periódicamente: afinación del automóvil, repuesto de filtros, bujías, verificación de contaminantes, etc. Esto contribuye a mantener un menor nivel de emisión de contaminantes pero aún así el problema persiste de manera tangible.

### Efecto invernadero

La atmósfera terrestre ha protegido durante millones de años a los seres vivos contra la radiación nociva proveniente del espacio exterior así como de la ganancia o pérdida excesiva de temperatura durante el día y la noche. Debido a la utilización global de motores de combustión interna la emisión de dióxido de carbono ha aumentado considerablemente y se ha incrementado la temperatura atmosférica, en el fenómeno que se conoce como efecto invernadero, alterando su funcionamiento en un lapso de tiempo relativamente corto.

En un invernadero convencional el vidrio permite pasar a las longitudes de luz cortas de manera más rápida que a las longitudes de luz largas, así el calor dentro del invernadero no puede escapar.

En el caso de la Tierra las componentes de luz con menores longitudes de onda así como la radiación ultravioleta proveniente del sol se absorben mientras que las componentes de la luz con mayor longitud de onda se irradian de regreso a la atmósfera. El vapor de agua y el  $\text{CO}_2$  son gases que absorben la radiación infrarroja, si la concentración de estos gases aumenta entonces también la cantidad de energía atrapada en la atmósfera aumenta, calentándola como consecuencia. El calentamiento atmosférico trae consigo una serie de consecuencias tales como: el derretimiento de las capas polares, el aumento del nivel del mar, modificación de los patrones de lluvia y temperatura, alteración general en los patrones climáticos e interferencia con el desarrollo de especies altamente sensibles a estos cambios climáticos (plankton) así como con procesos naturales de corrientes marítimas y de aire.

El dióxido de carbono es responsable en gran medida del calentamiento atmosférico debido al gran volumen en que se produce por la utilización de combustibles fósiles para generar energía. Estados Unidos es el primer país a nivel mundial en producir CO<sub>2</sub> con un promedio de 5.8 toneladas anuales por habitante. Existen otros gases que absorben la radiación infrarroja como el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) que aunque son emitidos en menores cantidades que el CO<sub>2</sub> colectivamente contribuyen al calentamiento global por su mayor capacidad de absorción calor.

Es importante recordar que el dióxido de carbono no es en si mismo perjudicial ya que se encuentra de manera natural en bajas concentraciones en el aire que respiramos, como se ilustra en la figura 5, y es esencial para la vida de las plantas (consumiendo CO<sub>2</sub> mediante el proceso de fotosíntesis).<sup>17</sup> Es perjudicial solo cuando alcanza altas concentraciones en las ciudades, donde es mayormente producido.

<b>Compuesto</b>	<b>Presión parcial en aire seco</b>
<b>Nitrógeno</b>	0.780
<b><u>Oxígeno</u></b>	<b><u>0.210</u></b>
<b>Argón</b>	0.0094
<b><u>Dióxido de Carbono</u></b>	<b><u>0.0003</u></b>
<b>Hidrógeno</b>	0.0001
<b><u>Neón</u></b>	<b><u>0.0000123</u></b>
<b>Helio</b>	0.000004
<b><u>Criptón</u></b>	<b><u>0.0000005</u></b>
<b>Xenón</b>	0.00000006

Figura 5. Compuestos principales

De las emisiones globales de dióxido de carbono es importante saber cuanto corresponde al producido por los automóviles de combustión interna. Algunos estudios recientes dan como resultado una emisión de 285 gramos por

<sup>17</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; Mc Graw-Hill; 310 págs., Pág.30.

km para vehículos pequeños de gasolina y de 1405 gramos por km para vehículos pesados de diesel.<sup>18</sup>

### Contaminación por desechos sólidos

Además de los gases tóxicos emitidos por los motores de combustión interna es necesario considerar los productos contaminantes tanto sólidos como líquidos producto del funcionamiento y mantenimiento de este tipo de motores. Tal es el caso del derrame de gasolina, anticongelante y aceite ocasionado por fugas en mangueras y juntas. Se generan además desechos por cambio de refacciones como filtros y bombas de aire, gasolina, aceite, cables de bujías, etc.

#### *5.2.2 Solución Ambiental*

Los vehículos eléctricos con baterías ofrecen una alternativa para resolver en gran medida los problemas de contaminación generados por los automóviles de combustión interna (ver figura 6).

- 1) Son vehículos que no producen emisiones contaminantes
- 2) No generan gases que contribuyen al calentamiento atmosférico
- 3) Producen una menor cantidad de desechos sólidos
- 4) Son altamente eficientes (los motores y controladores eléctricos tienen un 90% de eficiencia)

Al utilizar vehículos eléctricos de baterías no se tienen emisiones contaminantes ni de dióxido de carbono. Las emisiones de las plantas eléctricas asociadas con la producción de energía para abastecer a los automóviles

---

<sup>18</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., pág.31

eléctricos puede ser un tema de debate en cuanto a la efectividad de la solución que proporcionan estos vehículos.

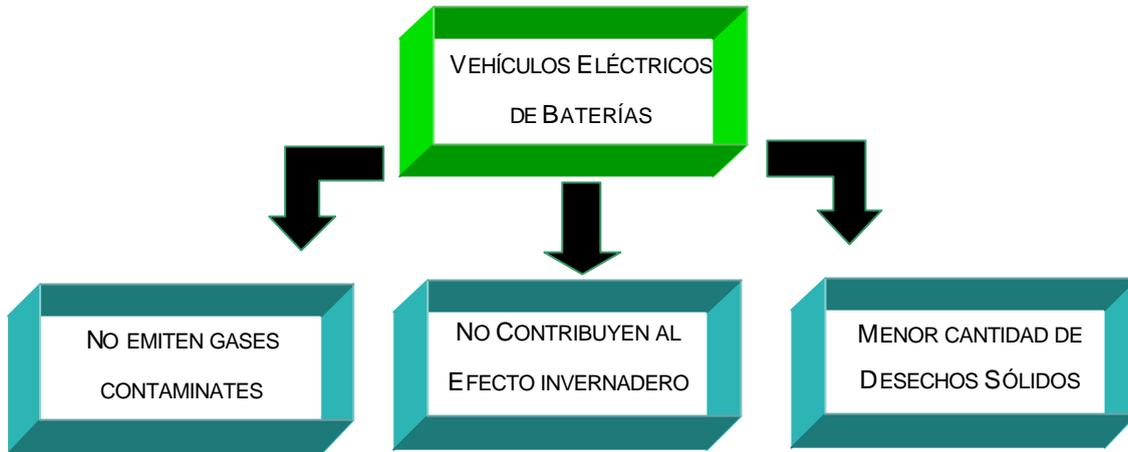


Figura 6. Ventajas ambientales de los vehículos eléctricos

Asumiendo que en México el número de automóviles eléctricos que actualmente circulan es mínimo pasarán muchos años antes de que el consumo de electricidad para recargar las baterías de los autos tenga un impacto significativo en la producción de energía. Por otro lado es mas sencillo controlar las emisiones contaminantes de 30 plantas de generación eléctrica que controlar la emisión de 2,500,000 vehículos. La mayor contaminación producida por las termoeléctricas se generaría en zonas lejanas a las ciudades, donde se ubican las plantas, lejos de millones de personas. Las emisiones de éstas, en todo caso, se incrementarían en la noche, que es el momento en el que la mayoría de los usuarios recargaría la batería de sus vehículos. Durante la noche un menor número de personas se expone a la contaminación y las emisiones foto sensitivas no reaccionan creando ozono y otros contaminantes.

La energía para suministrar a los vehículos de baterías será obtenida en un futuro muy próximo de fuentes de energía no contaminante como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, etc.

Antes de poder probar exactamente cuanto nos puede ayudar la utilización de vehículos eléctricos a resolver los problemas de contaminación ambiental así como el efecto invernadero es obvio que ayudará a resolverlo y por ende debemos encauzarnos hacia el desarrollo de los vehículos eléctricos así como a una infraestructura adecuada para sustentar su éxito.

Por su parte los únicos desechos relativos a la operación del motor de un auto eléctrico son las baterías. Las baterías de plomo ácido, las comunes hoy en día, son 97% reciclables, el ácido sulfúrico, el plomo e incluso el plástico del empaque son recuperables.

Otro aspecto importante es la eficiencia de los motores que propulsan a los automóviles. Los diseños actuales de motores de combustión interna representan la cima de su evolución, sin embargo están clasificados entre los dispositivos mecánicos más deficientes del planeta. En vehículos de gasolina solo el 15% de la energía producida por el motor se utiliza como energía mecánica para mover al automóvil.<sup>19</sup>

En contraste a los cientos de piezas y partes de los motores de gasolina que se mueven, los motores eléctricos solo tienen una, por eso son altamente eficientes. Hoy en día la eficiencia de los motores eléctricos es del 90% o más. Las baterías por su parte tienen una eficiencia del 75% aproximadamente.<sup>20</sup>

Es un hecho que la utilización de automóviles con motores diseñados para funcionar con derivados del petróleo ocasiona serios daños al medio ambiente y a la salud del hombre, problemas que se agudizan día con día al incrementarse el número de vehículos en las ciudades. Esa es la razón por la que se sugiere retomar el uso de vehículos eléctricos en la mayor brevedad posible.

---

<sup>19</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., pág.38

<sup>20</sup> Idém. Pág 38

### 5.3 EL AUTOMÓVIL ELÉCTRICO: MITOS Y VERDADES

Existen cuatro principales mitos que rodean a los automóviles eléctricos y que han logrado afectar la percepción del consumidor de manera negativa. Estos son:

#### Velocidad y aceleración

La creencia común es que los automóviles eléctricos no son rápidos, la verdad es que un auto eléctrico puede ser diseñado para alcanzar la velocidad que se desee. El 22 de octubre de 1999 el automóvil de carreras White Lightning rompió el record de velocidad de vehículos eléctricos al alcanzar los 409 km/hr.<sup>21</sup> En el rubro de automóviles comerciales el modelo Tzero de AC Propulsion acelera de 0 a 96 km/hr en 4.1 segundos<sup>22</sup> ubicándose en el rango de automóviles deportivos de alto desempeño. Otros vehículos eléctricos como el Honda CRX o el Impact de General Motors poseen mayor aceleración y velocidad que el auto de gasolina promedio. La velocidad de un auto eléctrico esta estrechamente relacionada con su peso, características aerodinámicas del chasis, capacidad del motor eléctrico y el voltaje de las baterías.

#### Distancia de autonomía

Este es tal vez el mito más comúnmente difundido de todos. La verdad es que los autos eléctricos pueden viajar tan lejos como la mayoría de las personas lo requieren. Un estudio recientemente realizado en Estados Unidos indica que el 98% de todos los recorridos diarios en una ciudad son menores a 80 km.

---

<sup>21</sup> [http://www.speedace.info/white\\_lightning.htm](http://www.speedace.info/white_lightning.htm)

<sup>22</sup> [http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero\\_Beats\\_Ferrari.htm](http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero_Beats_Ferrari.htm)

Encuestas realizadas por General Motors en Boston, Los Ángeles y Houston arrojan los siguientes resultados:

- Solo 8% de todos los recorridos son mayores a 40 km.
- Aproximadamente el 85% de todos los conductores manejan menos de 120 km diarios.<sup>23</sup>

Actualmente un automóvil eléctrico puede recorrer 120 km entre cargas utilizando componentes convencionales disponibles en el mercado<sup>24</sup>. El avance tecnológico en cuanto a baterías y materiales de fabricación ligeros han permitido obtener un mayor desempeño como lo muestra el modelo Tzero, discutido en el inciso anterior, que tiene una autonomía de operación de entre 130 y 160 km.<sup>25</sup> Vehículos con diseños especiales como el modelo Ford Ecostar alcanza los 365 km entre cargas<sup>26</sup> y el record mundial lo posee el Solectria Sunrise con 600 km.<sup>27</sup>

## Conveniencia

Los detractores de los autos eléctricos señalan que aún no existe la infraestructura adecuada para los automóviles de baterías. La realidad es que esa estructura ya esta disponible en nuestros hogares, basta cualquier contacto eléctrico, un cargador abordo y una extensión para recargar en algunas horas las baterías. Una infraestructura más funcional es sencilla de conseguir, se pueden construir en nuestros hogares así como en estacionamientos públicos y privados tomas eléctricas con salidas de 220 o 440 volts, lo que aumenta considerablemente la velocidad de carga. Así mismo se puede diseñar un auto con un parque de baterías intercambiable el cual puede ser reemplazado en pocos

---

<sup>23</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª. Edición; McGraw-Hill; 310 págs., pág.16

<sup>24</sup> ibid pág.23

<sup>25</sup> [http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero\\_Beats\\_Ferrari.htm](http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero_Beats_Ferrari.htm)

<sup>26</sup> <http://www.>

<sup>27</sup> <http://www.evuk.com.uk/hotwires/rawstuff/art24.html>

minutos en estaciones especiales, o incluso en las mismas gasolineras, por un parque totalmente cargado.

## Costo

Para poder apreciar las ventajas de tipo económico de un automóvil eléctrico es necesario realizar una comparación de este contra un vehículo de combustión interna. El motor de un automóvil de gasolina es un complejo dispositivo que convierte el calor producido por la combustión del carburante en energía mecánica, capaz de imprimir energía a las ruedas. El combustible que suele ser una mezcla de gasolina y aire se quema en el interior de los cilindros. La gasolina y el aire se mezclan y penetran la cámara de combustión en cuyo interior los pistones comprimen esta mezcla, que se enciende por la chispa proveniente de la bujía. Al inflamarse la explosión impulsa al pistón hacia abajo. El cigüeñal convierte el movimiento alternativo de subida y bajada de los pistones en rotatorio y transmite la energía a las ruedas a través del embrague, caja de cambios y diferencial. Se requiere de varios subsistemas para el adecuado funcionamiento del motor, estos son:

- Sistema de ignición, para controlar el momento en que inician las explosiones en las cámaras de combustión (distribuidor, bobina, bujías)
- Abastecimiento de combustible, para proporcionar la cantidad correcta de gasolina y aire en la mezcla (carburador, inyector de combustible, bomba de gasolina, mangueras, filtros)
- Sistema de enfriamiento y lubricación, para mantener la temperatura de operación dentro de un rango seguro (radiador, bomba de agua, termostato, sensores, mangueras, bomba de aceite, filtros)
- Sistema de escape, para liberar las emisiones producidas por la combustión de manera eficiente (mofle, convertidor catalítico)

El nivel de complejidad de operación se refleja también en la dificultad y costo de mantenimiento. En contraste un automóvil eléctrico posee un motor muy sencillo y eficiente, los sistemas de lubricación, enfriamiento, ignición y escape no se requieren más. La transmisión es más sencilla ya que solo se requieren cuando mucho dos velocidades al frente y una para la reversa. En caso de estar equipado con sistema de frenos regenerativos se aprovecha la energía cinética del auto para recargar el motor cuando este desacelera y no la disipa en calor como sucede con un automóvil convencional. Todas estas características hacen del auto eléctrico un vehículo más sencillo de mantener y reducen el costo de operación significativamente como se verá a continuación.

#### *5.4 COSTO DE OPERACIÓN*

La mejor forma de observar la reducción de costos es realizando una comparación directa entre vehículos similares, uno eléctrico y otro de gasolina. Se tomará como ejemplo la pick up Ranger 1991 en sus versiones con motor de gasolina y con motor eléctrico producidas ambas por Ford Motor Company.

En su versión eléctrica la Ranger utiliza un motor AC de 67 kW (90 Hp). Esta camioneta promedia un consumo de 0.27 kwh por cada km de recorrido. A un precio de \$ 0.70/kwh. da:

$$(0.27 \text{ kwh/km}) (\$ 0.70/\text{kwh}) = 18 \text{ centavos / kilómetro}$$

La pick up con motor de gasolina en su versión más económica de cuatro cilindros, (90 HP) promedia un consumo de 9.4 litros de gasolina por cada 100 km. Considerando el precio del litro de gasolina en \$ 6 se tiene:

$$0.094 \text{ litros / km} \times \$ 6 = 56 \text{ centavos / kilómetro.}$$

Esta pick up requiere además de mantenimiento periódico que incluye cambio de filtros, aceite, anticongelante, afinación, etc. Añadiendo el valor de los consumibles, mantenimiento periódico, verificaciones, etc. que es de unos \$6000 al año y considerando el promedio de kilómetros recorridos anuales (20,000 km).

$$(\$ 6000 / \text{año}) / (20,000 \text{ km} / \text{año}) = 30 \text{ centavos} / \text{kilómetro}$$

Sumando estas dos cifras se obtiene 86 centavos por kilómetro en contra del costo de 18 centavos por kilómetro que se obtiene de la pick up eléctrica.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre el precio de combustible de la pick up eléctrica y la de gasolina.

Tipo de combustible	Electricidad	Gasolina Regular
L/100 km (ciudad)	2.6	9.8
L/100 km (carretera)	3.1	8.4
L/100 km promedio	2.8	9.4
Costo anual de combustible (\$)	3360	11280

Esta tabla se construyó basada en los siguientes cálculos:

Precio del kW hora \$ 0.70.

Precio del litro de gasolina regular \$ 6

En el caso del vehículo eléctrico la cantidad km/l representa el número de kilómetros que se pueden recorrer utilizando una cantidad equivalente de electricidad a la energía contenida en un litro de gasolina.

Recorrido anual de 20,000 km.<sup>28</sup>

El desarrollo tecnológico en diseño y construcción de componentes electrónicos, motores eléctricos y baterías permitirá muy pronto fabricar autos eléctricos con mayor rendimiento en cuanto a velocidad, aceleración y eficiencia a menor costo. Esta tecnología automotriz, a diferencia de los motores de combustión interna, está en una etapa donde lo mejor está aún por venir.

---

<sup>28</sup> <http://www.fueleconomy.gov/feg/sbs/htm>

## **6 DISEÑO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO**

### *6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO*

El diseño de un automóvil eléctrico puede orientarse para cumplir con la función que se requiera, sin embargo el diseño de un vehículo para transitar diariamente en una ciudad involucra una optimización en ciertos parámetros que le permitan obtener al mismo tiempo un mejor desempeño en cuanto a velocidad, aceleración y rango de autonomía. El vehículo deberá ser ligero y el diseño de su chasis ofrecer una muy baja resistencia al viento, las pérdidas ocasionadas por la resistencia de rodamiento de las llantas, frenos, dirección, así como en la transmisión deberán ser mínimas.

El peso del vehículo es uno de los factores más importantes ya que afecta directamente la aceleración, la capacidad de subir cuestas, la velocidad y el rango de autonomía. Con la finalidad de cumplir con ciertos puntos de desempeño se tomará como parámetro de diseño una masa vehicular de unos 1130 kg.

#### *6.1.1 Peso y aceleración*

La segunda ley de Newton puede ser rescrita, para propósito de diseño automotriz como:

$$F_a = C_i W a \quad (1)$$

Donde:

$F_a$  .- fuerza de aceleración

$W$  .- peso del vehículo

$a$  .- aceleración

$C_i$  :- factor de masa que involucra la inercia de ciertas partes rotatorias del vehículo.<sup>29</sup>

De (1) se tiene que la fuerza requerida para mover el vehículo varía directamente con el peso de este.

El factor de masa ( $C_i$ ) varía según el peso del auto y la relación de engranes en la caja de transmisión. En los vehículos con motores de combustión interna se obtienen valores aproximados a los siguientes: Primera velocidad 2.4, segunda 1.5, tercera 1.2, cuarta 1.1. En los vehículos eléctricos, en los cuales la transmisión es más ligera y con menos partes, se tienen valores típicos de 1.2 a 1.06 dependiendo mas del peso del vehículo que de la relación de engranes<sup>30</sup>.

Nota: estas constantes están en sistema Británico.

En la tabla 6-1 se encuentra el valor de la fuerza en Newtons para valores de aceleración de 1 a 10 km/h s para el vehículo descrito anteriormente cuyo peso es de 11090.5 N. Estos valores se obtuvieron utilizando el sistema británico ya que las constantes  $C_i$  están calculadas para este sistema, los valores obtenidos se transformaron a MKS. Obsérvese que para una aceleración de 10 km/h s (lo que impulsa al vehículo de 0 a 100 km/h en 10 segundos) se requiere de una fuerza de 3328 N.

TABLA 6-1		
a (km/h s)	a (m/s <sup>2</sup> )	F <sub>a</sub> (Newtons)
1	0.28	332.8
2	0.56	665.6
3	0.83	998.4
4	1.11	1331.2
5	1.39	1663.7
6	1.67	1996.76
7	1.94	2329.3
8	2.22	2662.3
9	2.50	3175.3
10	2.78	3327.9

<sup>29</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.132

<sup>30</sup> Idém.132

### 6.1.2 Capacidad para subir cuestas

En el momento que un automóvil sube una cuesta se necesita una fuerza o empuje adicional definido como:

$$F_h = W \text{ sen } (f') \quad (2)^{31}$$

Donde:

$F_h$  .- fuerza requerida para subir la cuesta

$W$  .- peso del vehículo

$f'$  .- ángulo de inclinación en grados

La tabla 6.2 muestra la fuerza  $F_h$  para diez valores de inclinación y el vehículo eléctrico cuyo peso es de 11090.5 N. En la columna de la derecha se encuentra el valor de  $F_h$ .

TABLA 6-2	
angulo $f'$	$F_h$ (N)
0	0
5	969.6
10	1925.9
15	2870.4
20	3973.2
25	4687
30	5545.2
35	6361.2
40	7128.8
45	7842.2

---

<sup>31</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs, pág.133

### 6.1.3 Peso y velocidad

La velocidad máxima que puede alcanzar cualquier automóvil depende de varios factores y uno de ellos es el peso. De estudios de ingeniería automotriz se tiene:

$$HP = Fv / k \quad (3)^{32}$$

Donde:

HP .- potencia del motor

F .- torque en Nm

v .- velocidad en m/s

k .- constante métrica

Rescribiendo la ecuación que define la segunda ley de Newton como

$$a = (1/m) F \quad (4)$$

Y como  $m = W/g$  y  $F = (kHP/v)$  se pueden sustituir obteniendo

$$A = k(g/v)(HP/W) \quad (5)$$

Despejando la variable v

$$v = k(g/a)(HP/W) \quad (6)$$

---

<sup>32</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994;1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.133

Donde:

W .- peso en Newtons

g .- constante gravitacional  $9.78 \text{ m/s}^2$ .

En la ecuación (6) se observa que para cualquier aceleración dada si el peso se incrementa la velocidad disminuye ya que estos son inversamente proporcionales.

#### *6.1.4 Peso y rango de autonomía*

Dada la ecuación

$$V = d / t \quad (7)$$

Donde:

d .- distancia

t .- tiempo

Sustituyendo (6) en (7) y despejando la distancia:

$$d = k(g/a) (HP/W) t \quad (8)$$

De la ecuación (8) se observa como la distancia que se puede recorrer varía inversamente con el peso del vehículo.

#### *6.1.5 Fuerza de arrastre aerodinámica*

El diseño de los aviones, submarinos y trenes de alta velocidad han incorporado durante décadas la forma de “gota de lluvia” en su estructura, con la finalidad de oponer una menor resistencia aerodinámica. En la industria automotriz este principio no ha sido utilizado de manera trascendente ya que los fabricantes opinan que resulta poco atractivo al consumidor, pero en un auto eléctrico, donde

las baterías proveen tan solo el uno por ciento de la potencia de la gasolina, el diseño aerodinámico se vuelve crucial.

La fuerza aerodinámica varía al cuadrado de la velocidad a la que se viaja. Se define con la siguiente ecuación:

$$F_d = (C_d a V^2) / q \quad (9)$$

Donde

$F_d$  .- fuerza de arrastre aerodinámico en N

$C_d$  .- coeficiente aerodinámico del vehículo

$a$  .- es el área frontal del auto en  $m^2$

$V$  .- es la velocidad en km/h

$q$ .- constante métrica <sup>33</sup>

Para minimizar la fuerza de arrastre en una velocidad dada es necesario minimizar el coeficiente  $C_d$  y el área frontal  $a$ .

El coeficiente  $C_d$  tiene que ver directamente con el diseño aerodinámico del chasis y las turbulencias de aire que se crean alrededor del automóvil. Este coeficiente ha declinado significativamente con la evolución de los diseños automotrices, por ejemplo los modelos de Ford en 1920 tienen un  $C_d$  de 0.85, los modelos de 1950 un  $C_d$  de 0.50 y el Ford Thunderbird 2004 tiene un  $C_d$  de 0.38. <sup>34</sup> Es importante saber que a pesar de que este coeficiente ha ido declinando con los nuevos diseños un vehículo convertible moderno llega a tener un  $C_d$  de hasta 0.6. <sup>35</sup> Esto es porque el coeficiente aerodinámico tiene que ver con cualquier

---

<sup>33</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994;1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.137

<sup>34</sup> <http://www.automotive.com/reviews/12/2004/ford/thunderbird/walkaround.htm>

<sup>35</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994;1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.138

turbulencia ocasionada incluso por ventanas abiertas, en automóviles sin toldo y en las cajas de las camionetas.

En la tabla 6.3 se muestra como influyen diferentes áreas del vehículo en el coeficiente aerodinámico total.<sup>36</sup> Contrario a lo que se puede pensar la parte posterior del vehículo contribuye en más del 33% del  $C_d$  por si sola, seguida por los flancos de las ruedas con el 21%, el área inferior del auto con 14% y con el área frontal hasta el cuarto lugar con 12%.

TABLA 6-3

Coeficiente $C_d$	
Zona	% del total
Carrocería parte trasera	33.3
Flancos de las llantas	21.4
Carrocería parte inferior	14.3
Carrocería parte frontal	11.9
Proyecciones exteriores	7.1
Compartimiento del motor	6
Fricción PIEL	6
Total	100

Es por esta razón que vehículos con diseños aerodinámicos tan sofisticados como el Impact 1 de GM tienen un chasis muy redondeado, sin proyecciones exteriores y solo con dos pequeñas aberturas hacia el compartimiento del motor, con tapaderas en las llantas traseras, el área inferior está cubierta por una placa plana y consta de un parabrisas con un gran ángulo de inclinación logrando así tener un  $C_d$  de 0.19.<sup>37</sup>

#### *El viento relativo contribuye al coeficiente aerodinámico*

El  $C_d$  se mide nominalmente a 15.5 grados Centígrados y una presión barométrica de 76.2 cm de mercurio y sin viento. En realidad se tiene siempre alguna cantidad de viento por lo que se debe añadir este efecto a la ecuación de fuerza de arrastre aerodinámico. Esto sería el arrastre adicional causado por el

<sup>36</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs, pág.138

<sup>37</sup> <http://www.innerauto.com/innerauto/text/fuel97.html>

viento en contra del vehículo (causado por corrientes áreas aleatorias). La ecuación, en sistema británico ya que los coeficientes  $C_{rw}$  están calculados para este, que define al factor relativo de viento  $C_w$  esta dada por:

$$C_w = (0.98(w/V)^2 + 0.63(w/V))C_{rw} - 0.40(w/V) \quad (10)$$

Donde

$w$  .- promedio de la velocidad del viento en la zona (mph)

$V$  .- velocidad del auto en mph

$C_{rw}$  .- coeficiente de viento relativo relacionado al coeficiente aerodinámico del auto.

Se tiene un valor típico de  $C_{rw} = 1.4$  para sedanes, 1.2 para vehículos deportivos y de 1.6 para camionetas (o sedanes conducidos con las ventanillas abiertas).<sup>38</sup>

En la tabla 6.4 se muestra  $C_w$  calculada para siete distintas velocidades (mph), asumiendo un valor de 7.5 mph (velocidad promedio del viento) para  $w$  y con los tres valores típicos de  $C_{rw}$ .

$C_{rw}$ $w=7.5$ mph	Factor $C_w$ 5 mph	Factor $C_w$ 10 mph	Factor $C_w$ 20 mph	Factor $C_w$ 30 mph	Factor $C_w$ 45 mph	Factor $C_w$ 60 mph	Factor $C_w$ 75 mph
1.2	3.18	0.92	0.29	0.162	0.092	0.062	0.047
1.4	3.81	1.13	0.37	0.206	0.118	0.081	0.061
1.6	4.44	1.33	0.44	0.25	0.144	0.100	0.076

Para obtener la fuerza total aerodinámica ( $F_{td}$ ) se tiene entonces:

$$F_{td} = F_d + C_w F_d \quad (11)^{39}$$

<sup>38</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs, pág.139

<sup>39</sup> Idém. Pág. 139

En la tabla 6.5 se utilizan valores de  $C_d$  y área (a) para distintos tipos de vehículos y se calcula su  $F_d$  para cinco velocidades distintas. Obsérvese como esta fuerza es igual en un auto pequeño convertible y en una camioneta.

TABLA 6-5			Fuerza de arrastre aerodinámica $F_d$ (N)				
VEHICULO	$C_d$	área (m)	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
compacto	0.3	1.7	9.5	37.9	85.2	151.4	237
grande	0.32	2	12.3	49.4	111	197.5	308.5
van	0.34	2.4	15.5	62	139.5	248	388.4
pick up	0.45	2.2	18.9	75.7	170.4	303	474
roadster	0.6	1.7	18.9	75.7	170.4	303	474

Nota: En la elaboración de la tabla 6-5 se trabajo en sistema británico y los resultados se convirtieron a MKS.

Finalmente en base a (11) se construye la tabla 6-6 donde se tienen los valores de la fuerza total aerodinámica  $F_{td}$  para el vehículo en diseño.

TABLA 6-6			Fuerza total aerodinámica $F_{td}$	
vel viento	Velocidad(km/h)	$F_{td}$ (N)		
12 km/h	10	7.4		
	20	15.6		
Crw	30	28.4		
	40	46		
1.2	50	68.3		
	60	95.3		
peso EV	70	127.1		
	80	163.6		
11090.5 (N)	90	204.9		
	100	250.9		
Coeficiente	110	301.6		
	120	357		
Área frontal	130	417.2		
	140	482.1		
1.7 m <sup>2</sup>				

### 6.1.6 Fuerza de resistencia al rodamiento

La mayoría de las llantas convencionales han sido optimizadas para lograr una buena adhesión al pavimento, son anchas y con dibujos amplios. Al diseñar un vehículo eléctrico de baterías es necesario pensar en neumáticos con otras características de diseño que ofrezcan menor resistencia al rodamiento.

La resistencia al rodamiento se define como

$$F_r = C_r W \cos (f'') \quad (12)$$

Donde:

$C_r$  .- factor de resistencia al rodamiento

$W$  .- peso del vehículo

$f''$  .- ángulo de inclinación<sup>40</sup>

El factor  $C_r$  puede ser utilizado como una constante para estimaciones prácticas.

Para un vehículo con una masa inferior a 2270 kg  $C_r$  se aproxima a:

- 0.015 para superficies duras (concreto o pavimento)
- 0.08 superficies semiduras
- 0.30 superficies blandas (tierra o arena)<sup>41</sup>

Algunos fabricantes de llantas como Michelin, Firestone y Goodyear construyen llantas para lograr un mayor ahorro de combustible que resultan excelentes para aumentar el desempeño de un auto eléctrico.

---

<sup>40</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs, pág.141

<sup>41</sup> Ibid, pág.142

Mediante estudios de ingeniería sobre pérdidas de rodamiento en llantas de automóviles se tiene la siguiente relación:

$$F_{\text{tire}} = C_t (W_{\text{tire}}/d) (t_h/t_w)^{1/2} \quad (13)$$

Donde:

$F_{\text{tire}}$  .- es la fuerza de resistencia al rodamiento de la llanta

$C_t$  .- es una constante basada en las pérdidas elásticas de la llanta

$W_{\text{tire}}$  .- es el peso en la llanta

$d$  .- es el diámetro exterior de la llanta

$t_h$  .- es la sección lateral de la llanta

$t_w$  .- es la ancho <sup>42</sup>

En esta formula se observa que la fuerza al rodamiento se ve afectada por el material de construcción de la llanta (más duro es mejor), la carga (menos peso es mejor), el tamaño (a mayor diámetro mejor) y la razón alto ancho (una menor razón  $t_h/t_w$ ) es mejor.

Adicional a la resistencia ofrecida por los neumáticos existe la resistencia ocasionada por el sistema de frenos y de dirección del automóvil. La resistencia ocasionada por estos sistemas puede ser considerada como una constante para términos prácticos y es de 0.002 y 0.001 respectivamente. Juntas suman 0.003 o una fuerza adicional de 3 Newtons requeridas para mover un vehículo de 1000 N en un terreno horizontal. Para la mayoría de los propósitos se puede tomar el valor nominal de  $C_r$  como 0.015 (pavimento)<sup>43</sup> con el valor nominal de fuerza de resistencia de frenos y dirección de 0.003, dando un total de 0.018. Esto generaría una resistencia de rodamiento de 199.63 N para un vehículo de 1134 kg. A 60 km/h la fuerza de fricción aerodinámica es de 95.34 N, aproximadamente la mitad de la contribución de la fuerza de resistencia al rodamiento. La figura 6.5 muestra

---

<sup>42</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs, pág.143

<sup>43</sup> Idem, pág.144.

la fuerza de arrastre aerodinámico y la resistencia al rodamiento en el EV propuesto para varias velocidades. Estas dos fuerzas junto con la de aceleración y la fuerza requerida para subir cuestas constituyen la fuerza de propulsión. Obsérvese en la grafica de la figura 6.5 como la componente de resistencia al rodamiento es la de mayor importancia hasta que el vehículo alcanza una velocidad de 90 km/h.

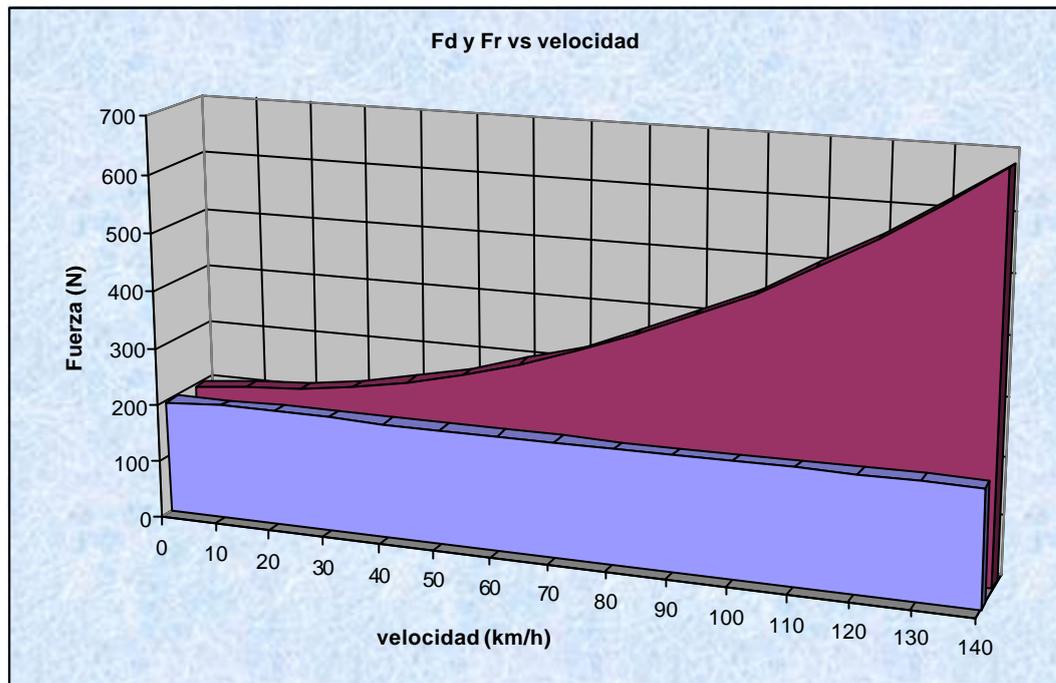


Figura 6.5

Veamos brevemente las partes básicas de un auto de combustión interna para comparar con la simplicidad de un auto eléctrico.

### *Transmisión*

La función principal de la transmisión es adaptar la potencia del motor hacia las ruedas motrices de la siguiente manera:

- Convertir el torque y la velocidad del motor en movimiento de las llantas
- Cambiar de dirección (marcha hacia enfrente y reversa)
- Permitir diferentes velocidades de rotación en las llantas durante las vueltas (diferencial)
- Permitir el subir cuestas pronunciadas

- Maximizar el rendimiento de combustible

### *Motor*

Provee la potencia o torque para propulsar el vehículo

*Embrague.* Separa o interrumpe el flujo de potencia del motor de tal modo que se pueden cambiar los engranes de la caja de cambios para avanzar en la dirección o velocidad requerida.

*Caja de cambios.* Cuando se requiere arrancar el auto, o cuando este tiene que subir una pendiente, necesita un par motriz mayor que cuando rueda por una carretera llana. La caja de velocidades permite al motor suministrar en todo momento a las ruedas el esfuerzo de tracción necesario, cualesquiera que sean las condiciones de marcha del coche. Se utilizan varios engranes que proporcionan una amplia gama de relaciones de velocidad entre el motor y las ruedas.

*Diferencial.* Permite a las ruedas motrices girar a diferente velocidad ya que cuando un auto vira la llanta exterior gira más rápidamente que la interior. También traslada la fuerza de rotación 90 grados en vehículos con tracción delantera con motor longitudinal y todos los de tracción trasera.

*Semiejes.* Transfieren la potencia del diferencial a las llantas.

La transmisión para un auto eléctrico difiere de la anterior ya que un motor eléctrico proporciona el torque máximo desde el arranque, (0 RPM) mientras uno de combustión interna debe alcanzar cierto número de revoluciones para llegar a su torque y potencia máximas. Es por esto que un motor eléctrico puede ser acoplado directamente al diferencial o a los semiejes y acelerar el vehículo desde cero sin necesidad de embrague y caja de cambios (en algunos diseños incluso no se requiere el diferencial), todo se controla en base al flujo de corriente hacia el motor.

## 6.2 POTENCIA Y TORQUE DE UN MOTOR ELÉCTRICO

Utilizando las ecuaciones

$$1 \text{ HP} = 743.65 \text{ Nm/s} \quad (14)$$

$$1 \text{ HP} = FV / 2676.77 \quad (15)$$

donde V.- velocidad en km/h.<sup>44</sup>

De la primera ecuación se observa que se requiere de 1 HP para levantar 743.65 Newtons una distancia de un metro en un segundo. En la segunda ecuación se relaciona la fuerza y la velocidad, por ejemplo se requiere 1 HP para mover 267.6 N a 10 km/h, pero también se pueden mover 1338 N a 2 km/h con 1 HP. En la primera instancia se define un caso en el cual el automóvil viaja por un camino nivelado, el segundo describe el caso en el que el mismo vehículo sube una cuesta. La potencia es entonces igual a la fuerza o torque por la velocidad pero se necesita especificar esta fuerza y velocidad. Por ejemplo, en el caso del EV en diseño se tiene que a 80 km/h la fuerza total de propulsión es de 363.27 N. Utilizando la ecuación (15)

$$\text{HP} = (363.27 \times 80) / 2676.77 = 10.85$$

Se necesitan solamente 11 HP, en las ruedas, para propulsar el auto a 80 km/h. Realmente un motor eléctrico de tan solo 20 HP puede propulsar fácilmente un vehículo de 1814 kg a 80 km/h, hecho que sorprende a quienes piensan en un motor de gasolina típico para estos vehículos (de unos 120 HP).<sup>45</sup> Esto es porque existe una diferencia sustancial en la forma que se mide la potencia de ambos motores. En los motores de CI la potencia es medida a un número específico de RPM en la cual se obtiene el torque máximo. Por otra parte la potencia en bs motores eléctricos es medida bajo convenciones o condiciones establecidas, y es

---

<sup>44</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs.pág. 152

<sup>45</sup> Idem.

en base a cierto nivel de salida proporcionado por el motor sin sobrecalentarse durante una hora o más. Como se puede ver en la figura 6.7 la potencia nominal del motor eléctrico es 2 o 3 veces inferior a la potencia máxima que puede desarrollar.

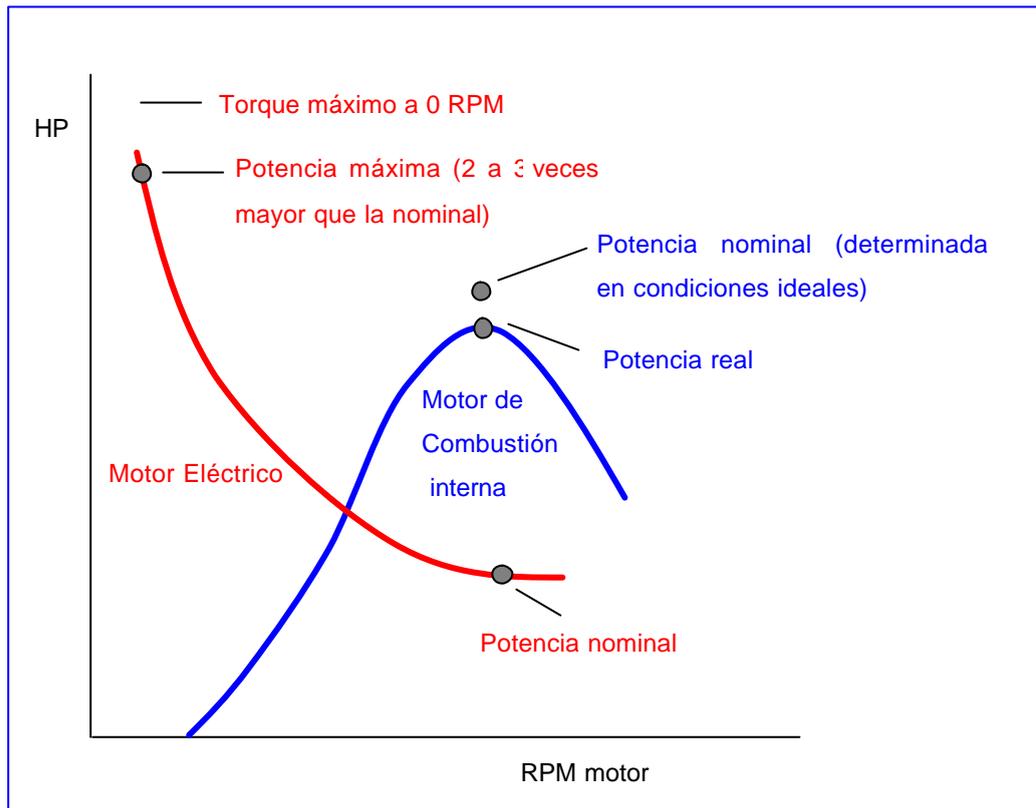


Fig 6.7

### 6.3 CÁLCULO DE TORQUE REQUERIDO Y ELECCIÓN DEL MOTOR

La potencia disponible en el motor debe ser igual a la fuerza demandada para vencer las fuerzas de arrastre y de fricción.

Potencia del motor = Resistencia (aceleración + cuestas + rodamiento + arrastre aerodinámico)

Utilizando la ecuación que relaciona fuerzas se tiene:

$$\text{Fuerza (F)} = F_a + F_h + F_r + F_{td} \quad (16)$$

$$F = C_i W_a + W \operatorname{sen} f' + C_{rw} \cos f'' + F_d (1 + C_w) \quad (17)$$

Utilizando la fuerza como punto de partida se calcula la potencia requerida en el motor para propulsar el vehículo eléctrico en condiciones reales.

Utilizando las siguientes relaciones<sup>46</sup>

$$\text{HP} = (\text{Torque} \cdot \text{RPM}) / 5252 \quad (18)$$

$$\text{RPM}_{\text{llanta}} = \text{mph (revoluciones/milla)} / 60 \quad (19)$$

y sustituyendo la ecuación (19) en (18) da:

$$\text{HP}_{\text{llanta}} = (\text{Torque}_{\text{llanta}} \cdot \text{mph} \cdot \text{revoluciones/milla}) / (5252 \times 60) \quad (20)$$

utilizando<sup>47</sup>

$$\text{HP}_{\text{motor}} = \text{HP}_{\text{llanta}} / n_o \quad (21)$$

donde  $n_o$  es la eficiencia general de la transmisión. Sustituyendo la ecuación (20) en (21) se obtiene

$$\text{HP}_{\text{motor}} = (\text{Torque}_{\text{llanta}} \cdot \text{mph} \cdot \text{revoluciones/milla}) / (315120 \times n_o) \quad (22)$$

El torque de la llanta<sup>48</sup> se obtiene mediante la siguiente ecuación:

---

<sup>46</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.153

<sup>47</sup> Idem. Pág. 153

<sup>48</sup> Ibidem. Pág. 131

$$\text{Torque}_{\text{llanta}} = (F(5280)/2 \pi) / (\text{revoluciones/milla}) \quad (23)$$

Al introducir en la ecuación (22) los valores de torque, velocidad y revoluciones/milla (basadas en el diámetro de las llantas) se obtendrá la potencia requerida del motor.

Se partirá de una velocidad de diseño de 80 km/h. La masa aproximada del vehículo de baterías para dos tripulantes propuesto es de unos 1134 kg y su área frontal de 1.67 m<sup>2</sup>. Se tomará como coeficiente de fricción aerodinámico el valor de 0.3 y como el factor de viento relativo 1.2. Ambos valores se basan en datos de vehículos similares, aerodinámicos y pequeños. Se utiliza la velocidad del viento promedio, 12 km/h. Se propone la utilización de llantas P195/50R15. La fuerza de resistencia al rodamiento es de 199.62 N (ver figura 6-5). El cálculo de la fuerza  $F_d$  se realizó a través de la ecuación (9). El cálculo del factor  $C_w$  es con (10). La eficiencia general de la transmisión, por ser manual, es de 0.91.

En la tabla 6-7 se obtienen los valores de F a partir de la sumatoria de fuerzas definidas por (17) así como el torque en la llanta definido por (23). En la misma tabla se observa como para la velocidad de diseño elegida se tiene una fuerza de 365 N. El torque para la misma velocidad es de 114.72 Nm. Las revoluciones/millas para el tamaño de las llantas propuestas son 889.2. Transformando estos valores a sistema británico y sustituyendo en la ecuación (22) se obtiene la potencia mínima requerida en el motor.

$$\text{HP}_{\text{motor}} = 12$$

TABLA 6-7 TORQUE REQUERIDO PARA EV con pendiente del 0% y velocidad constante

Parámetros	masa (kg)	Cd	área front (m)	coef Crw	viento km/h	llantas	revs/mile
	11090	0.3	1.67	1.2	12	P195/50R15	889.20

Eficiencia general de la transmisión 0.91
--

vel (km/h)	Fa	Fh	Fr	Ftd	Sumatoria de fuerzas	Torque llanta
	Fuerza de aceleración	Fuerza de inclinación	resistencia al rodamiento	Fuerza de tracción		
10	0	0	199.62	7.4361	207.07	59.60
15	0	0	199.62	10.9026	210.53	60.60
20	0	0	199.62	15.5524	215.18	61.93
25	0	0	199.62	21.3855	221.01	63.61
30	0	0	199.62	28.4019	228.03	65.63
35	0	0	199.62	36.6015	236.23	67.99
40	0	0	199.62	45.9845	245.61	70.69
45	0	0	199.62	56.5507	256.18	73.73
50	0	0	199.62	68.3001	267.93	77.12
55	0	0	199.62	81.2329	280.86	80.84
60	0	0	199.62	95.3489	294.98	84.90
65	0	0	199.62	110.6482	310.28	89.30
70	0	0	199.62	127.1308	326.76	94.05
75	0	0	199.62	144.7967	344.43	99.13
80	0	0	199.62	163.6459	363.28	104.56
85	0	0	199.62	183.6783	383.31	110.32
90	0	0	199.62	204.8940	404.52	116.43
95	0	0	199.62	227.2930	426.92	122.88
100	0	0	199.62	250.8752	450.50	129.66

$\Sigma \quad F = Fa + Fh + Fr + Ftd$

En la tabla 6-8 se muestra el torque requerido para el funcionamiento adecuado del EV, los parámetros de diseño son los mismos que en la tabla 6-7. Esta vez si existe la fuerza de inclinación ( $F_h$ ) y se calcula para cinco valores distintos en el rango de velocidad de 10 a 100 km/h. En la figura 6.8 se grafican estos valores.

TABLA 6-8

TORQUE LLANTA REQUERIDO (N m)

velocidad km/h	PORCENTAJE DE INCLINACION					
	0%	5%	10%	15%	25%	50%
10	59.60	218.80	376.90	532.44	831.74	1480.83
15	60.60	219.80	377.90	533.43	832.74	1481.83
20	61.93	221.13	379.24	534.77	834.08	1483.16
25	63.61	222.81	380.92	536.45	835.76	1484.84
30	65.63	224.83	382.94	538.47	837.78	1486.86
35	67.99	227.19	385.30	540.83	840.14	1489.22
40	70.69	229.89	388.00	543.53	842.84	1491.92
45	73.73	232.93	391.04	546.57	845.88	1494.96
50	77.12	236.32	394.42	549.95	849.26	1498.35
55	80.84	240.04	398.14	553.68	852.98	1502.07
60	84.90	244.10	402.21	557.74	857.04	1506.13
65	89.30	248.50	406.61	562.14	861.45	1510.53
70	94.05	253.25	411.36	566.89	866.19	1515.28
75	99.13	258.33	416.44	571.97	871.28	1520.36
80	104.56	263.76	421.86	577.40	876.70	1525.79
85	110.32	269.52	427.63	583.16	882.47	1531.55
90	116.43	275.63	433.74	589.27	888.57	1537.66
95	122.88	282.08	440.18	595.72	895.02	1544.11
100	129.66	288.86	446.97	602.50	901.81	1550.89

Obsérvese que en esta tabla la inclinación se da en base a un porcentaje. Una inclinación del 0% representa 0°, 5% representa 2.86°, 10% representa 5.71°, 15% representa 8.53°, 25% representa 14.03° y 50% representa 26.56°. Así mismo una inclinación del 100% es de 45° y un valor infinito de inclinación corresponde a 90°.

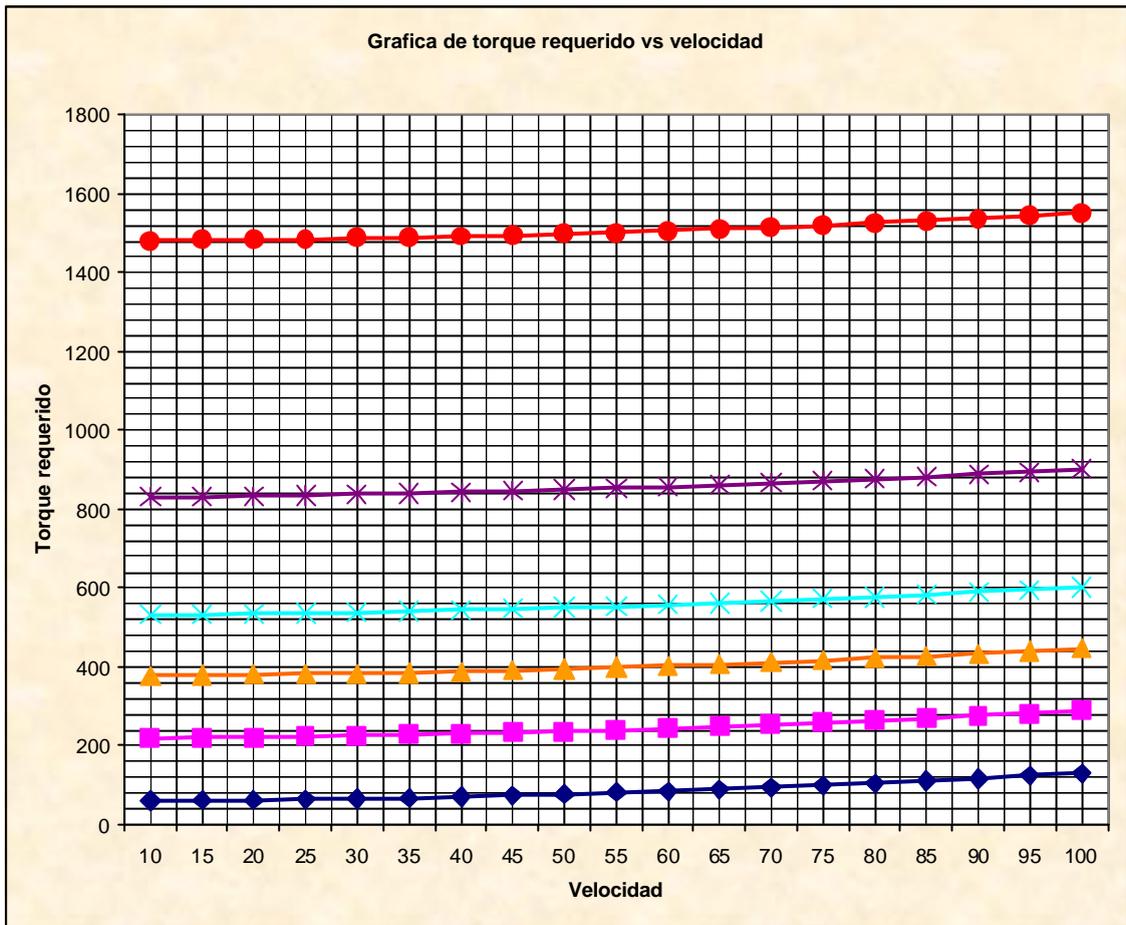


Figura 6.8

Después de elegir el motor que cumpla con la potencia requerida se utilizara la documentación que acompaña a este buscando información sobre torque y corriente contra el desempeño de velocidad. A partir de las tablas o gráficas de la documentación se obtendrán las RPM en las cuales el motor eléctrico proporciona la potencia nominal. Utilizando este valor de RPM del motor y las RPM de las llantas obtenidas en (19) se obtendrá la mejor relación en la caja de cambios.

$$\text{Relación de marcha} = \text{RPM}_{\text{motor}} / \text{RPM}_{\text{llantas}} \quad (24)$$

Este valor, o el más cercano, es la mejor velocidad de marcha para el auto en diseño.

### *Cálculo del torque requerido*

En base al resultado obtenido de 12 HP se utilizará un motor comercial de Advanced DC Motors, el modelo FB1-4001 que es un motor DC en serie. Un motor de AC opera a elevadas RPM y debe utilizar complejos y costosos controladores, los motores de imán permanente son muy eficientes pero solo en una banda muy estrecha de velocidad lo que no los hace muy aptos para las condiciones a las que se somete un motor de auto eléctrico, los motores DC en derivación son muy caros y no poseen gran capacidad de aceleración. Es por esto que se ha elegido un motor DC en serie. El modelo FB1-4001 es pequeño, tiene una masa de 65 kg pero utilizándolo a 120 volts produce 25 HP y su potencia pico es de 85 HP, es importante contar con potencia extra para mejorar el desempeño en cuanto a aceleración y velocidad. A partir de la curva de torque contra velocidad proporcionada por el fabricante al utilizar este motor a 120 volts y usando la ecuación (18) se tiene:

$$\text{HP} = (\text{Torque} \cdot \text{RPM}) / 5252 = (25 \cdot 4600) / 5252 = 21.89$$

Este motor produce aproximadamente 22 HP a 4600 RPM a 34 Nm de torque y 170 A. Ahora calculamos las RPM de las llantas utilizando la ecuación (19),

$$\text{RPM}_{\text{llantas}} = (\text{mph} \cdot \text{revoluciones/milla}) / 60 = (50 \cdot 814.2) / 60 = 678.54$$

Para obtener la mejor relación de transmisión se usa la ecuación (24)

$$\text{Relación de marcha} = \text{RPM}_{\text{motor}} / \text{RPM}_{\text{llantas}} = 4600 / 678.54 = 6.78$$

Se utilizará una transmisión manual de tres velocidades para el vehículo eléctrico. Para efectos de análisis se tomarán las relaciones finales de una

transmisión convencional<sup>49</sup>, los valores son: primera velocidad 13.66, segunda 7.18 y tercera 4.63. La relación de marcha se aproxima bastante a la segunda velocidad lo que significa que el vehículo puede funcionar prácticamente utilizando solo esta velocidad.

Ahora se puede preparar la hoja de cálculo relacionada con el torque disponible mostrada en la tabla 6-9. En esta tabla encontramos los valores de corriente, torque y RPM del motor eléctrico en las tres primeras columnas de la izquierda. Las relaciones de la caja de cambios desde primera hasta tercera van de izquierda a derecha a través de la hoja. El resultado final es el torque disponible en las ruedas a una velocidad del vehículo dada para cada una de las relaciones de transmisión.

TABLA 6-9		CALCULO DEL TORQUE DISPONIBLE (Nm)						
Velocidad			Primera	Primera	Segunda	Segunda	Tercera	Tercera
Relación final de marcha			13.66	13.66	7.18	7.18	4.73	4.73
Multiplicador motor torque			12.4306		6.5338		4.3043	

Corriente motor	Torque motor	RPM motor	Torque llanta	Velocidad vehículo	Torque llanta	Velocidad vehículo	Torque llanta	Velocidad vehículo
100	13.5	7750	168.1	67.69	88.3	128.78	58.2	195.48
125	20.3	6400	252.1	55.90	132.5	106.35	87.3	161.43
150	27.0	5000	336.1	43.67	176.7	83.08	116.4	126.12
170	33.8	4600	420.2	40.18	220.9	76.44	145.5	116.03
190	40.6	4100	504.2	35.81	265.0	68.13	174.6	103.42
210	47.3	3900	588.3	34.06	309.2	64.80	203.7	98.37
230	54.1	3700	672.3	32.32	353.4	61.48	232.8	93.33
250	60.8	3500	756.3	30.57	397.5	58.16	261.9	88.28
270	67.6	3400	840.4	29.70	441.7	56.50	291.0	85.76
290	74.4	3350	924.4	29.26	485.9	55.67	320.1	84.50
305	81.1	3250	1008.4	28.39	530.1	54.00	349.2	81.98
320	87.9	3150	1092.5	27.51	574.2	52.34	378.3	79.45
335	94.6	3050	1176.5	26.64	618.4	50.68	407.4	76.93
355	101.4	3000	1260.5	26.20	662.6	49.85	436.5	75.67
370	108.2	2950	1344.6	25.77	706.7	49.02	465.6	74.41
390	114.9	2900	1428.6	25.33	750.9	48.19	494.7	73.15
405	121.7	2850	1512.7	24.89	795.1	47.36	523.8	71.89
420	128.4	2800	1596.7	24.46	839.3	46.53	552.9	70.63
440	135.2	2750	1680.7	24.02	883.4	45.70	582.0	69.36

<sup>49</sup> Build Your Own Electric Vehicle; Bob Brant 1994; 1ª edición; Mc Graw -Hill; 310 págs,pág.157

En la figura 6-9 se grafican estos valores. Las curvas representan el torque que puede brindar el motor a las llantas a una velocidad dada. Para pendientes pronunciadas o en caso de requerir una aceleración considerable se utilizaría la primera velocidad. En tercera velocidad el torque es mínimo pero se pueden superar los 190 km/h.

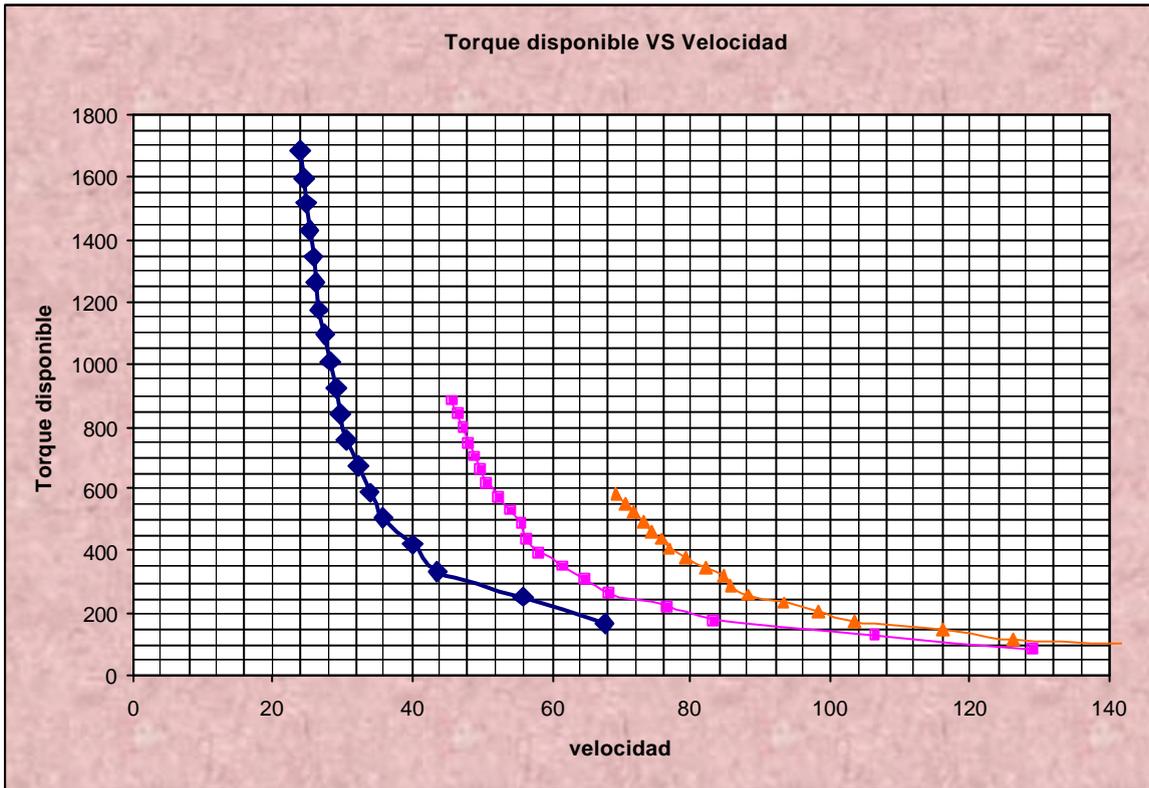


Figura 6-9

A continuación se muestran graficados juntos (figura 6-10) los resultados obtenidos del cálculo de torque requerido contra el torque disponible. El área utilizable se encuentra a la izquierda y por debajo de la curva de la relación de marcha utilizada delimitada en la parte inferior por la curva de torque requerido según la pendiente del terreno. Lo ideal es operar el vehículo en la parte más baja de las curvas del torque disponible para lograr un menor consumo de corriente y maximizar el rango de recorrido, sin embargo, es importante no rebasar las RPM máximas del motor ni utilizarlo durante mucho tiempo en velocidades muy altas. En primera velocidad se pueden subir pendientes de hasta 50% de inclinación o

bien acelerar a razón de 15 km/h s. Si bien se puede manejar hasta 67 km/h en esta relación con un mínimo de consumo de corriente, 100 A (ver tabla 6-9), esto puede dañar al motor si se mantiene esa velocidad durante mucho tiempo ya que alcanza 7750 RPM. Al cambiar a segunda velocidad se tiene la capacidad de subir cuestas de hasta el 25% de inclinación o aceleración de 8 km/h s y una velocidad máxima de 128 km/h. Al viajar a 70 km/h se consumen unos 190 A pero las revoluciones del motor son solo 4100 por minuto. Finalmente en la tercer velocidad se pueden alcanzar 160 km/h con 125 A y 6400 RPM en el motor.

Esta combinación de motor y transmisión resulta muy eficiente ya que se obtiene un rango de operación aceptable por ser un motor muy pequeño, sin embargo los rendimientos de aceleración y velocidad son comparables con los automóviles de combustión interna como se verá mas adelante.

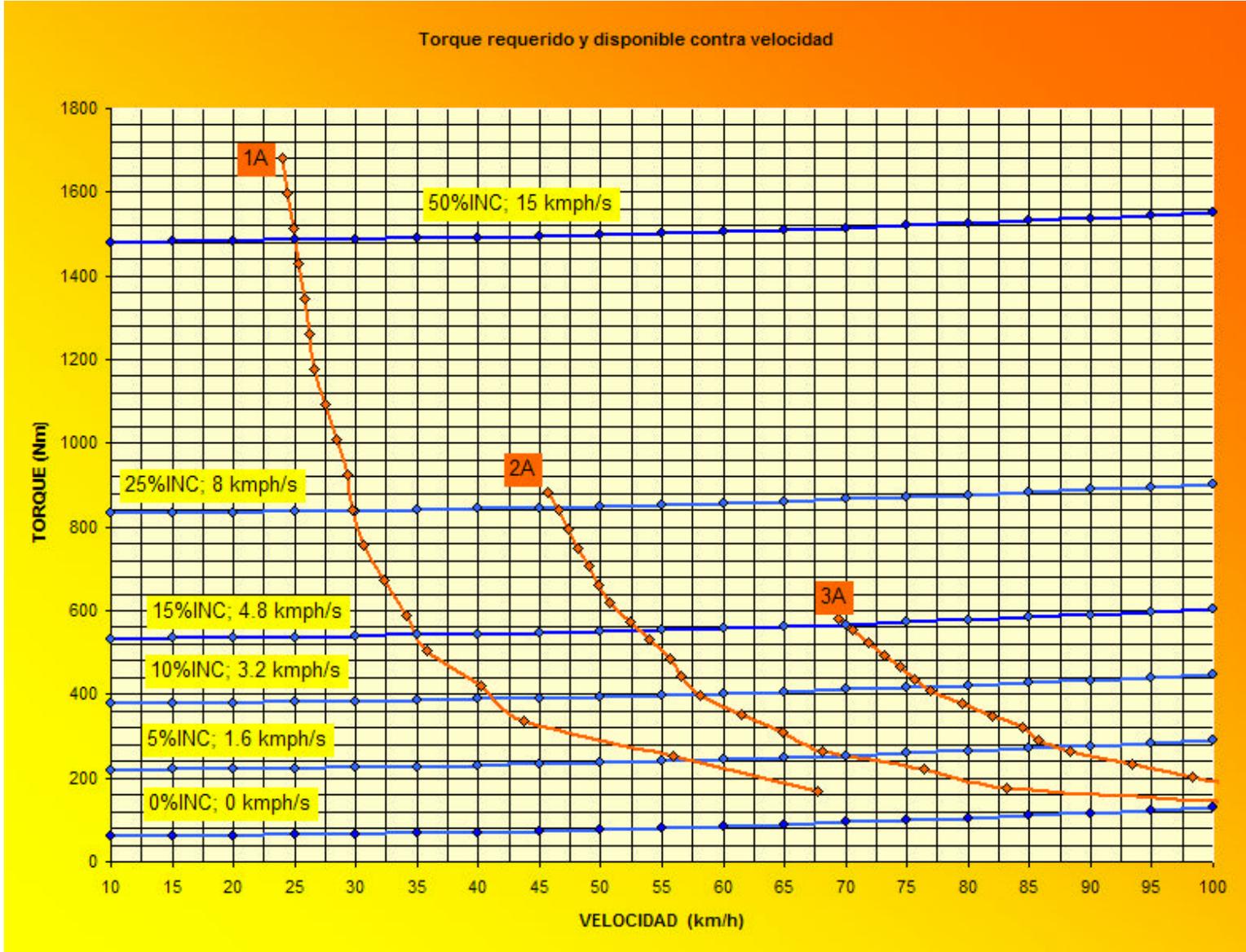
El controlador se encarga de regular el flujo de potencia de las baterías al motor del auto. Los avances en electrónica han permitido el diseño de controladores muy eficientes que permiten alcanzar un buen desempeño a precio accesible. Existe en el mercado una gran variedad de controladores de DC y AC, para el desarrollo de esta tesis se elegirá un modelo comercial.

La elección de un controlador adecuado para el motor FB1-4001 no es muy difícil. Se puede utilizar un modelo Curtis-PMC 1231C ya que tiene un rango de operación de 96 a 144 V DC, la impedancia es apropiada para funcionar con el motor, contiene protección para sobrevoltaje, esta contenido en un disipador de calor a prueba de agua y su masa es de tan solo unos 8.5 kg.<sup>50</sup>

---

<sup>50</sup> <http://www.kta-ev-com/sale>

Figura 6-10



## **7 BATERÍAS**

Durante los más de 100 años de historia de los vehículos eléctricos la capacidad de la batería ha sido siempre el factor limitante del éxito de este tipo de automóviles. El restringido rango de autonomía de un auto eléctrico es causado por la limitada capacidad de almacenar energía de las baterías convencionales y se comprende aún más si se toma en cuenta que una batería de plomo-ácido tiene una densidad de energía de 35 Wh/kg comparado con la densidad de energía de la gasolina que es más de 2000 Wh/kg.<sup>51</sup>

Sin embargo, el creciente avance tecnológico ha arrojado el desarrollo de diversos tipos de baterías. En términos generales se busca una mayor densidad de energía y de potencia, lo cual no es muy difícil de conseguir teóricamente, sin embargo, obtener ambas simultáneamente así como un largo tiempo de vida, capacidad de operar eficientemente a través de un amplio rango de temperaturas, con un bajo costo de manufactura y de operación ha demostrado ser más difícil de alcanzar.

En este capítulo se verán los diversos tipos de baterías: el primer grupo formado por tres clases de baterías de plomo-ácido, el segundo formado por 4 tipos de baterías basadas en níquel, el tercero son 4 baterías que operan a elevadas temperaturas y finalmente las baterías concebidas para el futuro basadas en litio y metal-aire. Antes se definen tres conceptos fundamentales relacionados con las baterías.

### **7.1 CONCEPTOS**

**Densidad de poder.** Es la potencia disponible en una batería en cualquier momento (bajo condiciones óptimas), se mide en watts por kilogramos de batería.

---

<sup>51</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; pág.65

Este parámetro va estrechamente relacionado a la aceleración y velocidad máxima que el auto puede obtener de sus baterías.

**Densidad de energía.** Es la energía disponible en una batería durante cierto tiempo (bajo condiciones óptimas), se mide en watts hora por kilogramos de batería. Este parámetro va estrechamente relacionado a la distancia máxima de recorrido que el auto puede obtener de sus baterías.

**Tiempo de vida útil.** Es el número de veces que puede aceptar una batería ser descargada en un 80% de su valor máximo antes de requerir que se sustituya. En la mayoría de las clases de baterías la densidad de energía y de potencia disminuye en cada ciclo de descarga. Una meta aceptable para este punto es de unos 1000 ciclos, que representan aproximadamente tres o cuatro años de utilización.<sup>52</sup>

## 7.2 CLASES DE BATERÍAS

### *Baterías de plomo – ácido*

La batería de plomo-ácido fue inventada en 1859 por Gastón Planté y utilizada por primera vez en un vehículo eléctrico en 1881 en Francia por G. Trouvé, se trataba de un triciclo eléctrico capaz de alcanzar 10 km/h.<sup>53</sup>

A pesar de contar con un desarrollo de más de cien años estas baterías tienen una densidad de energía relativamente baja, de 25 a 35 Wh/kg, comparándolas con las primeras baterías de Planté, que tenían una densidad de energía de unos 18 Wh/kg. Esta ligera mejoría se debe en su mayor parte a la utilización de plásticos ligeros para el casco de la batería más que algún avance tecnológico trascendente. La densidad de potencia es de 150 W/kg, suficiente para otorgar una aceleración adecuada.<sup>54</sup>

Estas baterías son muy afectadas por las bajas temperaturas, a 10°C o menos la densidad de energía y de potencia disminuyen considerablemente. Un

---

<sup>52</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; pág.67

<sup>53</sup> *Ibid.* Pág.69

<sup>54</sup> *idem.* pág. 69

vehículo eléctrico con estas baterías requiere de un sistema de calefacción y aislamiento térmico para operar efectivamente en climas fríos.

El tiempo de vida útil de una batería de plomo-ácido es de unos 1000 ciclos de carga y descarga o el equivalente a tres años. Después de 100 años de desarrollo este tipo de baterías es conocido mejor que ningún otro, su utilización para autos eléctricos es bastante común y los problemas relativos a su instalación y mantenimiento pueden ser resueltos con facilidad.

#### *Baterías de plomo – ácido avanzadas*

Con la finalidad de resolver algunos problemas relativos a las baterías convencionales de plomo-ácido se han desarrollado nuevas técnicas de construcción y procesamiento. Se ha mejorado la retención del material activo del electrodo durante la carga y descarga con corriente elevada, el peso de los materiales inactivos ha decrecido al utilizar plásticos y fibra de carbono en el casco, conectores, terminales y separadores. También se ha optimizado la mezcla entre los materiales activos y el electrolito utilizando electrodos más delgados así como sistemas de circulación que evitan la estratificación del electrolito.

El resultado de estas acciones ha mejorado significativamente los parámetros de operación. La densidad de energía es de 45 Wh/kg, la densidad de potencia es de 250 W/kg y alcanza 1500 ciclos de descarga.<sup>55</sup> Sin embargo el costo de estas baterías puede ser de más del doble que las de plomo-ácido convencionales.

#### *Baterías de plomo – ácido con válvulas reguladas*

El desarrollo posterior de las baterías de plomo-ácido avanzadas ha dado como resultado las baterías con válvulas reguladas (VRLA). Este avance se logró a través de la investigación de ALABC (Advanced Lead-Acid Battery Consortium) con la premisa de que existe aún gran potencial en las baterías de plomo-ácido.

---

<sup>55</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; pág.70

El interés inicial de ALABC era el mejorar el parámetro de energía específica en las baterías, con la finalidad de lograr un mayor rango de autonomía, pero pronto consideraron que esto era un problema secundario si se lograba recargar las baterías rápidamente. Por rápido se entiende el tiempo que un conductor estaría dispuesto a esperar en una estación especializada para recargar sus baterías. Con este requerimiento en mente se fijaron las siguientes metas:

- Energía específica de 50 Wh/kg para obtener autonomía de 160 km.
- Potencia específica de 150 W/kg.
- Costo menor a USD 150/k Wh
- Vida útil mayor a 500 ciclos de descarga total
- Carga rápida: 50% en 5 minutos y 80% en 15 minutos<sup>56</sup>

La potencia específica y el costo de las baterías actuales se consideran equivalentes o superiores a las metas seleccionadas así que el desarrollo se enfocó a los otros tres parámetros.

La energía específica mejoro del valor obtenido en los primeros modelos, 43 Wh/kg, al reducir la masa total de la batería usando electrodos de plomo-calcio con un alto contenido de estaño, logrando así placas más delgadas sin deterioro sensible con el tiempo y mejorando la cohesión con el electrolito.

La introducción de este tipo de electrodos también contribuyo a mejorar el tiempo de vida útil ya que disminuyen considerablemente la expansión que sufren estos, la cual provoca una perdida progresiva de contacto entre las partículas del material activo. El otro factor determinante en la vida útil de la batería es el régimen de carga utilizado. Este factor es menos crítico en baterías de plomo-ácido convencionales ya que los gases que se crean por sobrecarga escapan libremente a la atmósfera. Sin embargo las VRLA requieren una operación óptima en el ciclo interno de oxígeno y un método de carga muy sofisticado.

La carga rápida se logra mediante un procesador que controla la razón de carga mientras monitorea la temperatura de la batería y la resistencia interna. Se

---

<sup>56</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; pág.72

utiliza un algoritmo interactivo que envía pulsos de corriente y voltaje constante en ciclos de un segundo de muy alta corriente y pausas de diez milisegundos en las cuales se mide el valor de la resistencia interna. Este método de carga rápida es un parte aguas en tecnología para vehículos eléctricos sin embargo existen algunos puntos por resolver en lo que respecta a la existencia de estaciones que brindarían este servicio.

### *Baterías de níquel – hierro*

Estas baterías fueron inventadas por Thomas Edison en 1901 para proveer a los vehículos eléctricos de una mayor autonomía que la proporcionada por las baterías de plomo – ácido.

El níquel es el electrodo positivo, el electrolito es usualmente hidróxido de potasio, el electrolito negativo es de hierro. Durante el proceso de recarga se produce un importante nivel de gasificación por lo que se debe realizar en un lugar bien ventilado. La batería sufre de un importante nivel de auto descarga, hasta un 5% de la energía almacenada se pierde en 4 horas de inactividad. Añadiendo azufre o litio inhibe en cierta forma la auto descarga tan elevada.

En desarrollos recientes se han obtenido baterías con 50 Wh/kg, a diferencia de los 25 Wh/kg de los primeros modelos. Esta mejora se debe al mayor aprovechamiento de los materiales activos y por la reducción en peso de los componentes inactivos. Las acciones tomadas incluyen el uso de electrodos fabricados con fibras y recubiertos de níquel, así como compuestos de níquel grafito.

La batería de níquel hierro pierde capacidad en bajas temperaturas, aunque avances recientes han permitido operarlas satisfactoriamente a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Son capaces de alcanzar 100 W/kg como máxima densidad de potencia, aceptable para una adecuada aceleración en un vehículo, sin embargo esta cifra es afectada significativamente por el estado de carga. Tiene un amplio ciclo de vida útil de unas 2000 descargas.<sup>57</sup>

---

<sup>57</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; págs.75-76

### *Baterías de níquel – zinc*

La batería recargable de níquel-zinc se inventó en 1899 y en 1920 se construían comercialmente. Su desventaja era el corto ciclo de vida útil, debido a la acumulación de partículas en la placa de zinc durante la recarga. En años recientes la alta densidad de energía y de potencia disponibles en esta batería ha despertado el interés para su utilización nuevamente. La densidad de energía es de 70 Wh/kg y la densidad de potencia es de 150 W/kg, a pesar de varias nuevas técnicas utilizadas la vida útil es de tan solo 300 ciclos de descarga. Estas baterías tienen una amplia tolerancia a la temperatura de utilización (-39 a 81°C) y un bajo nivel de auto descarga (60 % de descarga en 30 días de inactividad).

La disponibilidad y el costo del níquel no permiten hacer estimaciones económicas precisas, pero es posible que el mejor estimado, al igual que en las baterías de níquel-hierro, es de unos USD 150 a 200 por kWh.<sup>58</sup>

### *Baterías de níquel – cadmio*

Las baterías de níquel cadmio se construyen con un electrodo positivo de níquel y un electrodo negativo de cadmio. Cuentan con una densidad de energía de 50 Wh/kg y una densidad de poder de 200 W/kg. Son capaces de aceptar altas razones de carga y descarga, lo que ha llamado la atención de diversos fabricantes automotrices. Nissan ha reportado tiempos de recarga de 15 minutos utilizando diseños especiales de batería con paredes disipadoras de calor.

El número de ciclos de descarga profunda es de 2000, lo que compensa en cierta forma, el elevado costo de las baterías. Las baterías de este tipo se encuentran en pequeños niveles de producción. Peugeot-Citroen es posiblemente el mayor consumidor con miles de Peugeot 106 vendidos desde octubre de 1995. GM, Renault y Ford también han considerado su utilización en vehículos como el Th!nk que puede recorrer 96 km a una velocidad promedio de 88.5 km/h.

Debido a la naturaleza tóxica del cadmio, el reciclaje de las baterías de níquel cadmio es una operación compleja y ha inhibido en cierta forma su utilización.<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup> *Ibid.* Págs.76-77

### *Baterías de níquel-hidruro de metal*

Las baterías de níquel hidruro de metal han remplazado a las de níquel-cadmio en varios vehículos eléctricos en años recientes ya que ofrece un mejor desempeño sin los riesgos tóxicos del cadmio.

La compañía Ovonic Battery de GM ha sido el principal proveedor de tecnología de níquel-hidruro de metal y ha desarrollado gran experiencia en aplicaciones orientadas a vehículos eléctricos.

La batería esta formada por un electrodo negativo de aleación de hidruro de metal y un electrodo positivo de hidróxido de níquel. Las celdas pueden tolerar bastante bien las sobrecargas y descargas excesivas, con la consecuente sencillez de administración y cuidado de las baterías.

Contienen una densidad de energía de más de 70 Wh/kg con una densidad de poder de 200 W/kg. Puede tolerar más de 600 ciclos completos de carga y ser recargada desde cero hasta el 80% de su capacidad en 35 minutos en modelos recientes que utilizan enfriamiento basado en circulación de aire o líquido.

Otros fabricantes de esta tecnología son Varta, SAFT y Matsushita, esta última empresa diseño una batería que soporta 1550 ciclos completos de carga y su potencial ha sido demostrado en el vehículo Solectria Sunrise que recorrió 600 km con una sola carga.

### *Baterías de sodio – azufre*

Esta tecnología inicio su desarrollo en los Laboratorios de Investigación Ford en Deaborn, Estados Unidos, a principios de 1960 como una alternativa para solventar el problema de baterías con insuficiente densidad de energía y de poder para su utilización en vehículos eléctricos.

Su construcción es mediante un colector de corriente que contiene un electrodo positivo, de azufre líquido, separado por un sello de beta-alumina de el electrolito de sodio. En este electrolito de sodio se encuentra embebido el electrodo negativo metálico. Durante la descarga, los iones negativos de sodio

---

<sup>59</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook 2001; 1a edición; TJ International; págs.193; pág.77

producidos en el electrodo negativo son transportados a través del separador poroso hacia el electrodo positivo, reduciendo el azufre en iones de polisulfuro.

Es necesario mantener una temperatura de unos 350°C para la operación óptima de la batería<sup>60</sup>, lo cual requiere de sofisticados métodos de construcción así como un sistema de calentamiento auxiliar durante la carga y en los periodos de inactividad. Es muy importante no permitir que la temperatura de la batería caiga de los 200°C ya que el electrolito de sodio se congela. La reactivación es lenta y el congelamiento del sodio puede ocasionar daños a la batería debido a los esfuerzos mecánicos inducidos.

La batería de sodio azufre tiene una alta densidad de energía de 100 Wh/kg, una densidad de poder de 150 W/kg y 1000 ciclos de descarga profunda. Existen ciertos puntos que causan preocupación en la utilización de esta batería tales como la fuga de material corrosivo en caso de accidente. Se han realizado pruebas exhaustivas tales como golpes, caídas, incendios y exposición a fallas eléctricas sin que las baterías presenten riesgos serios a los usuarios. Estas baterías fueron utilizadas en los modelos eléctricos Ford Ecostar pero la producción se detuvo debido a algunas fallas registradas en estos vehículos. En diciembre de 1995 terminó el desarrollo de estas baterías sin considerar el importante avance que se tenía. Se reportó que esta medida era en realidad por la cancelación de los requerimientos de cero emisiones en California, sin embargo, el éxito relativo de las baterías de cloruro de sodio – níquel tuvo mucho que ver.<sup>61</sup>

#### *Baterías de sodio – cloruro de níquel*

La compañía AEG-ZEBRA, subsidiaria de Daimler-Benz, es el principal constructor de este tipo de baterías. Actualmente esta a prueba en un sinnúmero de autos eléctricos y hay planes serios para su construcción a nivel comercial.

El sodio y cloruro de níquel en combinación con un electrolito de cloroaluminato de sodio se utiliza en la fabricación de estas baterías (conocidas

---

<sup>60</sup> Lightweigh Electric/Hybrid Vehicle Desing; Ron Hodkinson y John Fenton,2001;SAE International 253 págs,pág 132

<sup>61</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook,2001; 1a edición; TJ International; 193 págs, pág.79-80

también como baterías Zebra o Beta). Si se llega a congelar el electrolito se convierte en partículas pequeñas, haciendo la reactivación más sencilla y sin provocar problemas de esfuerzos mecánicos en la batería.<sup>62</sup>

Tiene una densidad de energía de 100 Wh/kg, y una densidad de poder de 150 W/kg y puede alcanzar 1200 ciclos de operación, equivalentes a ocho años de vida. El tiempo de recarga es de unas 6 horas y la temperatura de operación esta en un rango de 300°C. Las celdas están contenidas en una caja sellada, con doble pared y al vacío. Entre la pared interna y la externa se encuentra un material aislante térmico que en el vacío de  $1.10^{-1}$  mbar tiene una conductividad de 0.006 W/mK. Con esto se tiene una temperatura de 5 a 10 °C sobre la ambiental en la pared externa de la batería.

En caso de accidente es menos peligrosa que las baterías de sulfuro de sodio por las características inherentes de su composición química.

#### *Baterías de litio- sulfuro de hierro*

Este tercer tipo de baterías de “alta temperatura” tiene un gran potencial para su aplicación en vehículos eléctricos. El litio es particularmente aceptable por su potencial como electrodo dando una gran posibilidad de almacenamiento de energía, sin embargo es altamente reactivo, lo que limita el tipo de electrolito ha utilizar y requiere de precauciones adicionales en la construcción y operación de las baterías basadas en este elemento.

La batería tiene un ánodo sulfuro de hierro y un cátodo de litio-aluminio sumergidos en un electrolito no inflamable de sal derretida. La temperatura de operación es muy alta, 450°C, lo que conlleva a los problemas de empaque, aislamiento y calentamiento. Las ventajas son 150 Wh/kg de energía específica y una densidad de potencia de 300 W/kg. Los ciclos de descarga total son 1000, cumpliendo con las metas fijadas por la USABC, pero se requiere de complejos sistemas de carga ya que presenta una pobre resistencia a la sobrecarga. Existen también problemas ambientales por la naturaleza toxica del litio.<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook,2001; 1a edición; TJ International; 193págs, pág.80-81.

<sup>63</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook,2001; 1a edición; TJ International; 193págs, pág.82

### *Baterías de Litio-polímero*

El litio también se ha utilizado en un tipo totalmente distinto de baterías en las cuales se utilizan polímeros conductores en vez de sal derretida, permitiendo operar las baterías en un rango menor de temperatura. Las baterías de este tipo han sido desarrolladas por Hydro Québec, 3M y USABC en conjunto. Han demostrado capacidades de 150 Wh/kg y 300 W/kg operando entre 80 y 120°C, sin embargo es posible su operación a temperatura ambiente con una reducción en sus prestaciones. Su fabricación es sólida y las hace invulnerables a vibraciones y golpes, su empaque puede ser diseñado con flexibilidad y según especificaciones del cliente. Se han construido algunos módulos de 20 V y 119 A que pueden ser utilizados en vehículos eléctricos pequeños con prestaciones de 240 a 320 km de autonomía.<sup>64</sup>

### *Baterías de litio-ion*

Existen varios programas para desarrollar aun más esta tecnología para la utilización en vehículos eléctricos, tanto en Japón (Sony) como en Europa (SAFT y Varta) y Estados Unidos (Duracell) con apoyo del Gobierno Japonés, la Comisión Europea y la USABC.

El futuro desarrollo de estas baterías consiste en remplazar el electrolito líquido por una membrana de gel. Esta tecnología Ion-litio plástico utiliza un laminado de carbón para el electrodo negativo y dióxido de manganeso para el positivo produciendo una densidad de energía de 125 Wh/kg y un tiempo de vida útil de mas de 1000 ciclos.

Sony anunció recientemente el desarrollo de una batería de 35 kWh con un ciclo de vida estimado de 3500 ciclos de descarga y una densidad de energía de 120 Wh/kg.<sup>65</sup>

Actualmente esta tecnología es más apropiada para su utilización en teléfonos celulares, computadoras portátiles y cámaras de video, pero sus

---

<sup>64</sup> idem

<sup>65</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook, 2001; 1a edición; TJ International; 193 págs, pág.83

propiedades energéticas, flexibilidad de construcción y economía las convierten en viables para propulsar autos eléctricos a mediano plazo.<sup>66</sup>

### *Baterías de metal-aire*

Los electrodos metálicos que pueden ser utilizados en estas baterías son: zinc, aluminio, magnesio y litio. De todos, el zinc y el aluminio son los más útiles para la aplicación en vehículos eléctricos.

Todas las baterías de metal-aire requieren de un delgado cátodo de aire y de un electrolito alcalino acuoso tal como hidróxido de potasio. El cátodo absorbe oxígeno del aire en la descarga y expulsa oxígeno durante la carga. La descomposición del electrolito toma lugar al ser expuesto prolongadamente al aire y puede ser seriamente afectado al variar la humedad y el contenido de dióxido de carbono. Esto provoca que la batería sea sellada y no entre aire durante la inactividad, en actividad el aire debe ser filtrado, con humedad y contenido de CO<sub>2</sub> controlados. Los electrodos de aluminio y zinc deben ser reemplazados periódicamente y reprocesados para su nueva utilización

La densidad de energía en estas baterías es muy alta, 220 Wh/kg en aluminio-aire y 200 Wh/kg para zinc-aire, sin embargo la densidad de potencia es muy baja en aluminio-aire, de unos 30 W/kg, la de zinc-aire es de 80 a 140 W/kg. La baja densidad de potencia de aluminio-aire hace necesario utilizar en paralelo batería esclavas para lograr una adecuada aceleración y obtener la habilidad de absorber energía al utilizar frenos regenerativos.

En Israel, la empresa Electric Fuel ha desarrollado cartuchos intercambiables de zinc, que se retiran de la batería cuando están descargados y se reemplazan por otros nuevos. Las unidades descargadas se reprocesan en una estación central de recarga. Actualmente se realizan pruebas en la Oficina Postal Alemana una flotilla de vans utilizando estas baterías, su rango de distancia entre cargas es de 300 km.<sup>67</sup>

---

<sup>66</sup> Lightweigh electric/Irbid vehicle desing; Ron Hodkinson y John Fenton,2001;SAE International 253 págs,pág 127

<sup>67</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook,2001; 1a edición; TJ International; 193págs, pág.84-85

La tabla 7.1 enlista diversos tipos de baterías<sup>68</sup>. Las baterías más utilizadas son las de plomo-ácido pero la investigación y desarrollo esta enfocada también en las baterías de níquel-hidruro de metal, litio-ion y litio polímero. El desarrollo en las baterías de sodio-azufre ha cesado.

En la tabla 7.2 están los voltajes por celda de las baterías de la tabla 5.1 así como los materiales utilizados en el ánodo, cátodo y electrolito<sup>69</sup>. El voltaje por celda es importante ya que determina el número de celdas requeridas para ensamblar una batería con un voltaje determinado y por ende su complejidad, tamaño y confiabilidad. Las celdas de litio-ion se muestran particularmente superiores en este punto.

Finalmente la tabla 7.3 muestra las expectativas a corto y largo plazo de la USABC en varios rubros que deben cumplir las baterías comerciales con el fin de posicionar a los autos eléctricos en el mercado de forma definitiva<sup>70</sup>.

---

<sup>68</sup> *Ibid*, pág.66

<sup>69</sup> *Ibid*, pág.68

<sup>70</sup> *Idém*, pág.69

Tipo de batería	Temperatura de operación (° C)	Ciclos de vida	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Costo \$ por kWh
Plomo-ácido	Ambiente	1000	35	150	60
Plomo-ácido avanzada	Ambiente	1500	45	250	200
Plomo-ácido Válvula regulada	Ambiente	700+	50	150+	150
Níquel - hierro	Ambiente	2000	50	100	150-200
Níquel-zinc	Ambiente	300	70	150	150-200
Níquel-cadmio	Ambiente	2000	50	200	300
Níquel-hidruro de metal	Ambiente	2000+	70	200	250
Sodio-azufre	350°C	1000	110	150	150
Sodio-cloruro de níquel	300°C	700+	100	150	250
Litio-sulfuro hierro	450°C	1000	150	300	200
Litio-polímero	80 – 120°C	1000	200	350	150
Litio-ion	Ambiente	1000+	120-150	120-150	150
Aluminio-aire	Ambiente	-	220	30	-
Zinc-aire	Ambiente	200	200	80-140	100

Tabla 7.1

Tipo de batería	Voltaje en la celda	Material del ánodo	Material del cátodo	Composición del electrolito
Plomo-ácido	2.1	PbO <sub>2</sub>	Pb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Plomo-ácido avanzada	2.1	PbO <sub>2</sub>	Pb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Plomo-ácido Válvulas reg	2.1	PbO <sub>2</sub>	Pb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Níquel - hierro	1.2	Ni	Fe	KOH
Níquel-zinc	1.7	Ni	ZnO <sub>2</sub>	KOH
Níquel-cadmio	1.2	Ni	Cd	KOH
Níquel-hidruro de metal	1.23	Ni	Hidruro de metal	KOH
Sodio-azufre	2.1	S	Na	?Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sodio-cloruro de níquel	2.1 – 2.2	NiCl	Na	?Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Litio-sulfuro hierro	1.75 – 2.1	FeS <sub>2</sub>	LiAl o LiSi	LiCl/KCl
Litio-polímero	2 – 2.5	Li	V <sub>6</sub> O <sub>13</sub> + acetileno negro	(PEO) <sup>12</sup> LiClO <sub>4</sub>
Litio-ion	3.6	Carbón	LiCoO <sub>2</sub>	Orgánico
Aluminio-aire	1.5	Al	O <sub>2</sub>	KOH
Zinc-aire	1.65	Zn	O <sub>2</sub>	KOH

Tabla 7.2

PEO.- óxido de polietileno

Parámetro	Mediano plazo	Largo plazo
Precio	<USD 150 / kWh	<USD 100/kWh
Distancia de autonomía	240 km	322 km
Distancia de recorrido total	160,000 km	160,000 km
Tiempo de vida	5 años	7 a 10 años
Energía específica	80 Wh/kg	200 Wh/kg
Poder específico	150 W/kg	400 W/kg
Temperatura ambiente de operación	-30°C a 65°C	-40°C a 85°C
Carga norma	6 h	3 a 6 h
Carga rápida	< 15 min	< 15 min

Tabla 7.3

En cuanto a la selección de la batería apropiada para el automóvil eléctrico de esta tesis se tienen las siguientes propuestas:

Utilizar un juego de diez baterías de 12 V cada una de Ni – MH. Saft produce este tipo de módulos en conjunto con la industria automotriz (GM). Su producto provee un desempeño muy atractivo para los vehículos eléctricos ya que su densidad de energía (69 Wh/kg) es suficiente para extender la distancia de autonomía de un vehículo eléctrico pequeño hasta 150 km. Entre sus ventajas principales se tiene que cada modulo tiene una masa de 18.6 kg, por lo que se requerirían menos de 200 kg de baterías para alcanzar el rango propuesto. Su temperatura de operación es de -10 °C a 45 °C y su vida útil es de 1200 ciclos completos de carga y descarga. Entre las desventajas de utilizar este tipo de baterías se encuentra el elevado costo de estas, que puede ser más del doble que las baterías de plomo ácido avanzadas, y la disponibilidad del producto. Actualmente solo se venden por lotes a empresas automotrices y no a particulares. Sin embargo el objetivo de la tesis es diseñar un automóvil eléctrico que sustituya de manera sustancial a los automóviles de combustión interna en la ciudad y esto provocaría un gran consumo de baterías de Ni – MH con lo cual su precio y disponibilidad serían más factibles.

La utilización de baterías de plomo ácido es otra alternativa, ya que se han logrado importantes resultados, en su modalidad con válvulas reguladas tenemos hasta 50 Wh/kg de densidad de energía, por otra parte las baterías avanzadas de plomo – ácido tienen una gran densidad de potencia de 250 W/kg. Si bien para lograr una autonomía de 150 km se requieren unos 500 kg de estas baterías no se deben descartar ya que día a día se logran avances en sus características de tiempos de recarga y densidad de energía además de que son las más baratas en el mercado, se pueden conseguir sin ningún problema y son reciclables casi en su totalidad. Existe una variedad de fabricantes entre los que destaca Trojan con sus modelos 27TMH y 5SHP.

## **8 CARGADOR DE BATERÍAS**

Una parte muy importante en el ciclo energético de un auto eléctrico es la carga de energía en las baterías. La disponibilidad de sistemas de carga eficientes y rápidos es un factor vital para determinar si un vehículo eléctrico es apropiado o no para ser utilizado como un transporte regular.

La mayoría de los autos eléctricos serán recargados sin duda alguna en los hogares de sus dueños y si estos vehículos son utilizados en recorridos cortos dentro de la ciudad como estadísticamente se espera entonces la carga convencional de ocho horas de una toma de 3 ó 4 kW parece adecuada. Sin embargo, si lo que se pretende es que los vehículos eléctricos sustituyan a los vehículos con motores de combustión interna se requiere forzosamente de métodos más rápidos y efectivos de carga.

A continuación se describen algunos métodos de carga, básicos y sofisticados, para las baterías de plomo – ácido y aquellas basadas en níquel así como las implicaciones de infraestructura requerida.

### *8.1 CONCEPTOS*

**Estado de carga.** El voltaje en la batería, la resistencia interna y la cantidad de ácido sulfúrico combinado con las placas en un momento dado son indicativos de la cantidad de energía en la batería en ese momento. Con frecuencia esta relación se da como un porcentaje relativo al valor de carga total. Tradicionalmente el estado de carga se medía con la gravedad específica del electrolito pero en la actualidad se determina electrónicamente en base al voltaje.

**Gravedad específica del electrolito.** La gravedad específica es la razón entre el peso de un cierto volumen de líquido dividido por el peso de un volumen igual de agua. La gravedad específica de cualquier material se define como su densidad dividida entre la densidad del agua, que tiene una gravedad específica de 1. El ácido sulfúrico concentrado tiene una gravedad específica de 1.830 y en una batería totalmente cargada que se encuentre a una temperatura de 26.6°C el ácido sulfúrico y el agua se mezclan en una proporción uno a cuatro para producir

una gravedad específica de 1.275. El ácido sulfúrico representa alrededor del 36% del peso del electrolito.<sup>71</sup>

La gravedad específica no es un punto relevante en otros tipos de baterías, pero en las de plomo – ácido lo es ya que la cantidad de ácido sulfúrico que se combina con las placas en un momento dado es directamente proporcional a la razón de descarga y es por tanto un indicador del estado de carga.

**Gasificación.** Cuando la carga de la batería se acerca al valor máximo ocurre un fenómeno en el cual hidrógeno (H<sub>2</sub>) escapa por el cátodo de la batería y oxígeno (O<sub>2</sub>) escapa por el ánodo. Esto sucede ya que cualquier corriente para cargar la batería más allá de la requerida para liberar los radicales de sulfuro de las placas metálicas ioniza el agua en el electrolito y comienza el proceso de electrólisis (separación del agua en oxígeno e hidrógeno) por esta razón las baterías requieren que se les añada agua periódicamente. La mayoría del volumen de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se recombinan para formar vapor sin embargo la presencia del hidrógeno, altamente inflamable y explosivo, obliga a realizar la recarga en lugares ventilados.

**Igualación.** Con el paso del tiempo las celdas de una batería de plomo – ácido empiezan a mostrar diferencias en su estado de carga. Estas diferencias pueden ser causadas por temperatura, materiales empleados, construcción, estado del electrolito en cuanto a estratificación, etc. La forma de corregir estas diferencias es con una sobrecarga de corriente controlada en la batería. Con esta se logra igualar las características de las celdas al elevar el voltaje de manera sustancial después de que la batería ha recibido una carga completa.

**Acumulación de sulfato.** El tiempo de vida de la batería es definido por el hecho de que los radicales de sulfato SO<sub>4</sub> no se remueven en su totalidad de las placas durante el proceso de recarga. En tanto más tiempo los sulfatos permanezcan adheridos a las placas es más difícil removerlos. Con la finalidad de alargar el ciclo de vida útil de la batería se debe mantener esta en un estado de carga y realizar igualación regularmente.

---

<sup>71</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310,pág.218

**Capacidad** es la medida de cuanta energía puede contener la batería y depende de los siguientes factores.

- Área o tamaño de las placas en contacto con el electrolito
- Peso y cantidad de material en las placas
- Número de placas y tipo de separadores entre estas
- Cantidad y gravedad específica del electrolito
- Edad de la batería
- Condición de la celda, acumulación de sulfato, sedimentación
- Temperatura
- Razón de descarga

Obsérvese que los cuatro primeros puntos tienen que ver con el diseño y construcción de la batería, los siguientes dos con su historial y los últimos con las condiciones de operación en un instante dado.

La capacidad nominal de un acumulador suele expresarse en términos de amperes-hora (Ah). Un acumulador que tiene una capacidad de 80Ah teóricamente proveerá una corriente de 1A durante 80 horas, una corriente de 2A durante 40h o una corriente de 4A durante 20h.

**Rating** de la batería; se refiere a la razón en que puede ser cargada o descargada. En forma de ecuación se tiene

$$\text{Rating de la batería} = \text{Capacidad} / \text{Ciclo de tiempo}^{72}$$

En esta ecuación el rating se da en amperes para una capacidad en Ah y un ciclo en horas.

En términos prácticos una batería con capacidad de 100Ah (conocida como razón C/100) no necesariamente será capaz de entregar 100A en una hora (razón C/1). Extraer 10A de una batería totalmente cargada de 100Ah da una razón C/10 mientras que la misma corriente dará una relación menor de C/40 para una batería

---

<sup>72</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310, pág.221

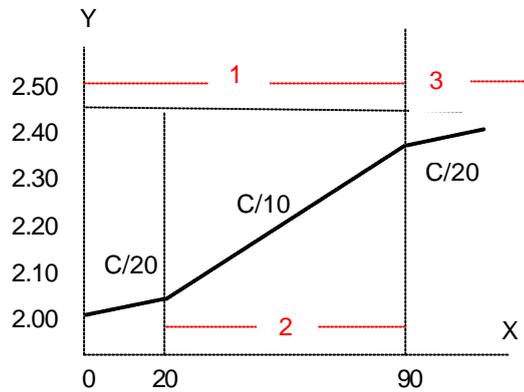
de 400Ah. En otras palabras, las baterías pequeñas deben entregar energía más rápidamente en relación a su tamaño, o bien, las baterías grandes tienen razones menores de descarga en relación a su capacidad.

La capacidad de las baterías comerciales esta estandarizada por el Concejo Internacional de Baterías (BCI) y la capacidad durante 20 horas es una forma de rating a las baterías. Esta es la capacidad de una batería medida durante 20 horas, es decir a una razón C/20. Todas las baterías deben proporcionar el 100% de su capacidad nominal en la razón C/20 si se descargan en 20 horas o más.<sup>73</sup>

Es importante tener en cuenta la velocidad de descarga y carga de energía en las baterías, ya que estos factores son críticos en la eficiencia y longevidad de esta. Debido a que los patrones de conducción de automóviles eléctricos son muy intermitentes las razones de descarga varían considerablemente. La energía requerida durante la aceleración es mayor que la razón C/20, sin embargo esta situación es momentánea y el ciclo de conducción urbana implica que durante varios lapsos las baterías no se someten a una razón de descarga mayor a C/20. La idea general aquí es evitar descargas fuertes en las baterías como lo son acelerones continuos. También es importante evitar descargar las baterías bruscamente cuando se encuentran por debajo del 20% de su estado de carga ya que esto reduce seriamente su ciclo de vida. Mientras que es muy difícil controlar con precisión el proceso de descarga no sucede así con la carga de energía a las baterías. Una razón de carga C/20 se puede utilizar entre 0 y 20% y aumentarla a C/10 entre 20 y 90%. Esta razón de carga es la mejor balanceada entre rapidez y eficiencia para recargar baterías de plomo-ácido. Por debajo del 90% de la carga esta se controla mediante la corriente para prevenir el daño en baterías vacías. Por arriba del 90% regresamos al valor C/20 ya que la capacidad de almacenar energía de las baterías se reduce cuando están prácticamente llenas. En este punto la carga se controla mediante el voltaje. Ver figura 8.1.

---

<sup>73</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310,pág.221



Curva ideal de carga de batería

X % del estado de carga

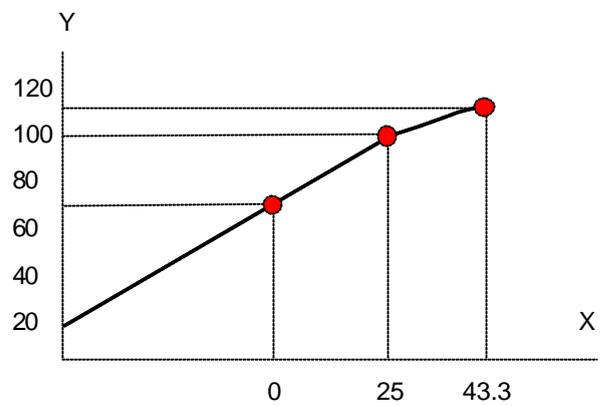
Y Volts por celda

1 Corriente regulada

2 Rango de operación

3 Voltaje regulado

8.1

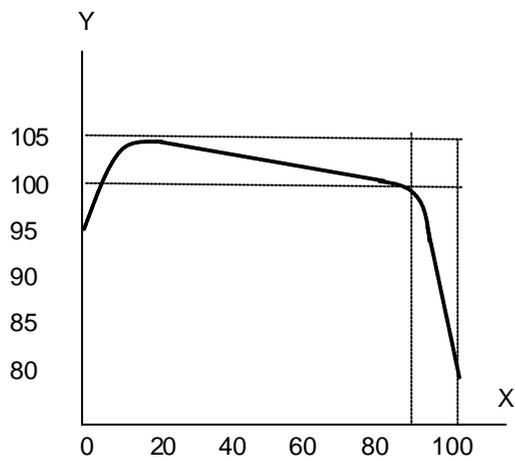


Capacidad de la batería vs temperatura

X Temperatura °C

Y % Capacidad utilizable

8.2



Capacidad de la batería vs vida útil

X % de vida útil

Y % de capacidad utilizable

8.3

La temperatura determina en parte el desempeño en las baterías de plomo ácido. Debido a que la energía almacenada en este tipo de baterías depende de reacciones químicas todos los parámetros de importancia se ven afectados por esta: capacidad, voltaje, corriente, etc. Estas baterías son más eficientes a una temperatura de 25°C y por ello la mayoría de los fabricantes prueban el desempeño de sus productos a esta temperatura. Obsérvese en el diagrama 8.2 como la salida de la batería es afectada seriamente por la temperatura, a 0°C solamente el 70% de la capacidad de la batería esta disponible mientras que a 43.3°C esta disponible el 110% de la capacidad. Las baterías no se congelan a 0°C por la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito. Esta concentración se incrementa a mayor temperatura y viceversa por ello es importante mantener a las baterías que operan a bajas temperaturas en valores cercanos a la carga total ya que si el electrolito se llega a congelar puede causar un daño permanente a la batería.

La edad también determina en parte el desempeño de las baterías como se puede ver en el diagrama 8.3. La capacidad de la batería comienza con un 95% cuando es nueva, crece hasta el 105% cuando ha sido utilizada aproximadamente durante el 20% de su vida útil. De aquí empieza a decaer levemente hasta el 90% de su ciclo de vida, después de este punto decae bruscamente.

Autodescarga. Debido a que toda batería tiene una resistencia interna esta se descargara sin realizar ningún trabajo. La temperatura y la edad de la batería son los factores principales que determinan la velocidad de este proceso. Una pérdida a la semana del 5% de capacidad es el promedio en las baterías de plomo-ácido.<sup>74</sup>

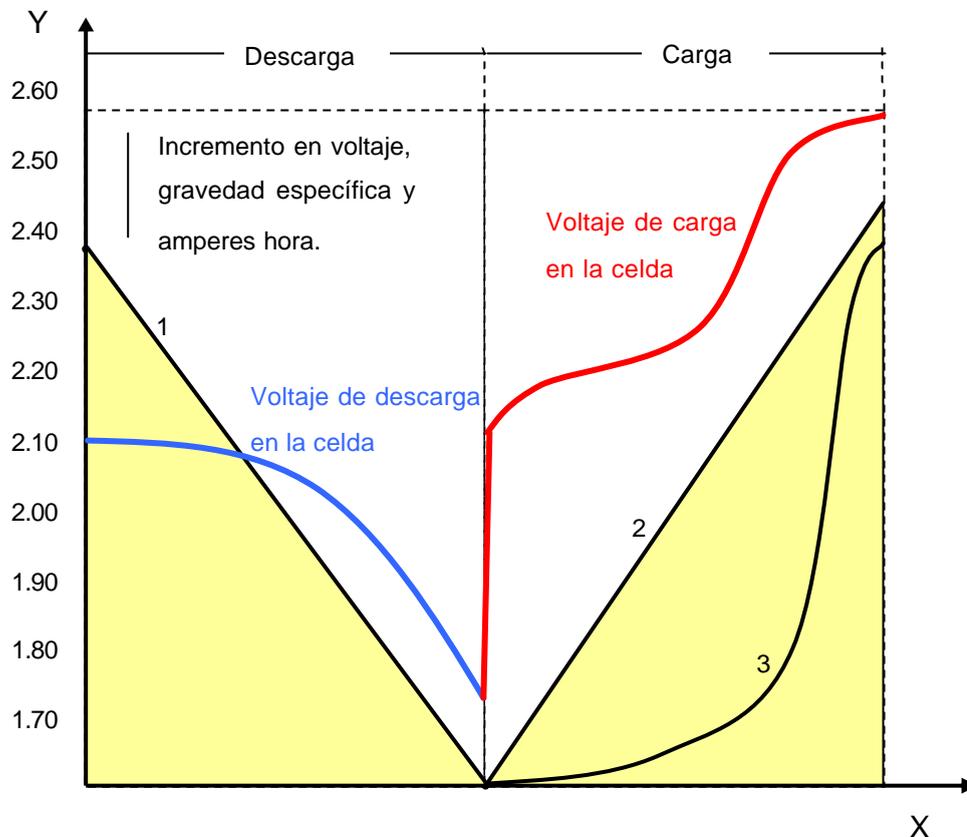
### *Ciclo de carga*

Los parámetros capacidad, voltaje en las celdas y gravedad específica aumentan cuando la batería se carga. Ver figura la figura 8.4.<sup>75</sup>

---

<sup>74</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310,pág.223

<sup>75</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310,pág.241



- X Tiempo (horas)
- Y Volts por celda
- 1 Variación en Ah y gravedad específica durante la descarga
- 2 Variación en Ah durante la carga
- 3 Variación de la gravedad específica durante la carga.

*Ampere hora.*- la medida de la capacidad en la batería y el porcentaje del estado de carga se muestra linealmente creciente. En este caso se suministra más amperes hora para reponer las pérdidas por calentamiento, etc.

*Voltaje en la celda.*- el voltaje se incrementa con grandes variaciones en la carga, por ello no resulta conveniente realizar mediciones del estado de carga de la batería utilizando este parámetro durante este ciclo. Obsérvese como el voltaje toma casi de inmediato el valor nominal de 2.1V; luego crece lentamente hasta adquirir un estado de carga del 80% (aproximadamente 2.35V); se incrementa

rápidamente hasta llegar al 90% (2.5V); y finalmente crece muy lentamente hasta su valor máximo (2.58V).

*Gravedad específica.*- la gravedad específica varía también de forma importante mientras la batería se carga, por ello realizar mediciones basadas en la gravedad específica durante este ciclo no es recomendable. En la primera parte del ciclo la gravedad específica varía muy poco ya que el proceso de reacción química apenas comienza, llega un momento en el que se incrementa rápidamente por la concentración de ácido sulfúrico y la formación de gases.

#### *Ciclo de descarga*

Los parámetros como lo son capacidad, voltaje en las celdas y gravedad específica decrecen cuando la batería se descarga. La figura 8.4 muestra cómo estos parámetros cambian.

*Ampere hora.*- la medida de la capacidad en la batería y el porcentaje del estado de carga (el área bajo la curva) se muestra linealmente decreciente desde la carga máxima hasta cero.

*Voltaje en la celda.*- el voltaje en la celda declina de forma predecible su valor nominal (2.1 volts totalmente cargada) hasta la descarga total (1.75 volts).

*Gravedad específica.*- La gravedad específica declina linealmente al descargarse la batería. Es directamente proporcional a la razón de descarga ampere hora.

## 8.2 EL CARGADOR DE BATERÍAS IDEAL

Cuando una batería de plomo ácido está prácticamente descargada o llena su habilidad para almacenar energía se reduce debido a cambios en la resistencia interna de las celdas. Intentar cargarla demasiado rápido durante estos periodos causa gasificación y calor excesivo dañando la batería y reduciendo su tiempo de vida. Idealmente se debe limitar la corriente a la batería hasta que se adquiere el 90% del estado de carga y posteriormente limitar el voltaje durante el último 10% del ciclo de carga. Cualquiera de los métodos por sí solo no es el procedimiento óptimo. En la gráfica 8.5 se muestra la carga ideal de la batería usando corriente

constante.<sup>76</sup> Si se tiene una batería con capacidad de 200 ampere hora se podría recargar en 10 horas suministrando 20A, desafortunadamente sin restricciones en el voltaje, este se puede elevar más allá del valor natural de las celdas (2.1 V), con un consecuente daño a la batería por sobrecarga. La gráfica de la figura 8.6 muestra la carga ideal de la batería utilizando voltaje constante.<sup>77</sup> El voltaje constante, usualmente determinado en el punto donde la gasificación comienza, causa un decremento en el flujo de corriente hacia la batería al pasar el tiempo. Sin restricciones en la corriente este método permite el paso de varias decenas de amperes en una batería totalmente descargada, alimentar 100A o más en una batería descargada reduce su tiempo de vida útil.

Ahora veamos el método ideal usando regulación de corriente y voltaje durante las cuatro fases del ciclo; de 0 a 20%; de 20 a 90%, de 90 a 100% y más allá del 100%. Ver figura 8.7.<sup>78</sup>

*Carga de 0 a 20%.* Para determinar la corriente a utilizar se usa la ecuación (1) que involucra a la razón C/20.<sup>79</sup>

$$(1) \text{ Corriente de carga} = \text{capacidad de la batería} / \text{tiempo} = C/20$$

Esto es para una batería con capacidad de 200 ampere-hora, la corriente de carga es

$$\text{Corriente de carga} = 200 / 20 = 10A$$

Se debe limitar la corriente de carga a 10A. la gráfica en la figura 8.7. muestra el resultado de la corriente limitada con el factor C/20, nótese como el voltaje aumenta gradualmente.

---

<sup>76</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310, pág.246

<sup>77</sup> Ibid. Pág.243

<sup>78</sup> Ibid. Pág 243

<sup>79</sup> Idem. Pág 243

*Carga de 20 a 90%.* En este intervalo se puede cargar la batería usando la razón C/10. Esta razón no es tan eficiente como C/20 ya que más energía se pierde en forma de calor, pero recarga más rápido las baterías. Utilizando razones aún menos eficientes, como C/5 o C/3 se puede recargar la batería en mucho menos tiempo en caso de ser necesario pero es importante observar la temperatura de manera que no se excede el límite permisible.

Utilizando la relación C/10 se suministran 20 amperes a una batería con capacidad de 200 ampere-hora. En la figura 8.7 se observa como el voltaje, después de un incremento abrupto por el ajuste en la corriente, se incrementa lentamente hasta llegar al 90% del estado de carga de 2.5V.

*Carga de 90 a 100%.* En esta parte se debe regresar a la razón C/20, o idealmente, cambiar a un método de voltaje constante con un valor fijo igual a la carga máxima de la batería que es de 2.58V. En la figura 8.7 se observa el resultado, la corriente suministrada a la batería decae rápidamente durante esta última etapa recargándola sin daños.

*Carga sobre el 100% (carga de ecualización).* La ecualización se utiliza para restaurar todas las celdas a un nivel equitativo de carga manteniendo así la batería en un nivel óptimo de eficiencia. También se usa para restaurar la capacidad de algunas baterías viejas y eliminar el salitre que se forma en las terminales. La carga de ecualización se controla sobrecargando la batería con una corriente constante a razón de C/20 y el voltaje máximo de 2.75V. se debe realizar solamente después de que la batería esta totalmente cargada y el proceso puede durar de 6 a 10 horas. Esta carga no debe ser realizada en razones mayores a C/20 y se deber realizar una vez por cada 10 ciclos de carga o al transcurrir un mes, lo que suceda primero. Es importante llevarlo a cabo en áreas bien ventiladas ya que produce niveles de gas mayores a los convencionales. Obsérvese nuevamente en la figura 8.7 el incremento en voltaje a 2.75 así como el incremento en corriente hacia el nivel de C/20.

Veamos ahora el tiempo involucrado en el proceso ideal de recarga de nuestra batería hipotética de 200 ampere-hora:

10 A (C/20) durante 5 horas = 50 Ah  
20 A (C/10) durante 7 horas = 140 Ah  
10 A (C/20) durante 1 hora = 10 Ah  
Total: 13 horas = 200 Ah

Se requieren aproximadamente 13 horas para cargar una batería con capacidad de 200 ampere – hora. Si durante la segunda etapa se recarga a razón de C/5 (40 A durante 3.5 horas) se reduce el tiempo total a 9.5 horas.

### 8.3 EL CARGADOR DE BATERÍAS REAL

Actualmente los cargadores de baterías utilizan una combinación de corriente constante y voltaje constante. Reducen el suministro de corriente durante el ciclo al ir incrementando el voltaje de la celda y sostienen un voltaje específico para el final de la carga. La gráfica 8.8 muestra el comportamiento general de los cargadores de baterías de plomo-ácido.<sup>80</sup> Se pueden conseguir varios modelos de cargadores en el mercado y para saber que especificaciones se requieren se puede usar la ecuación (2).

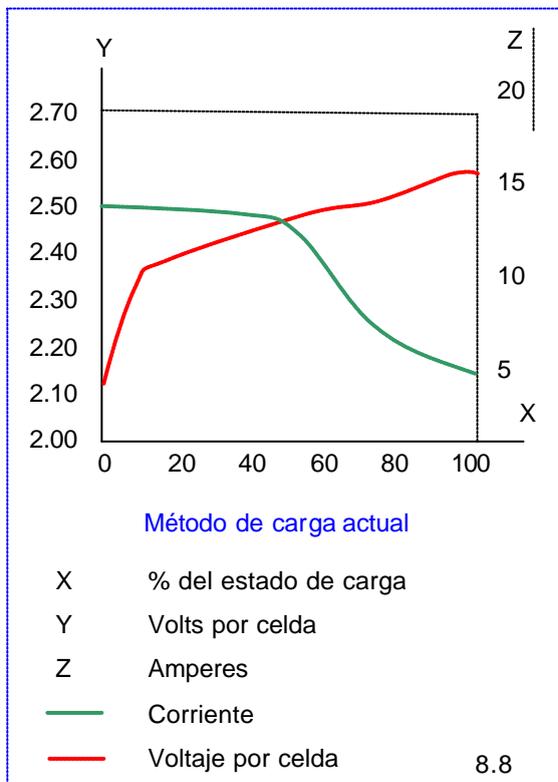
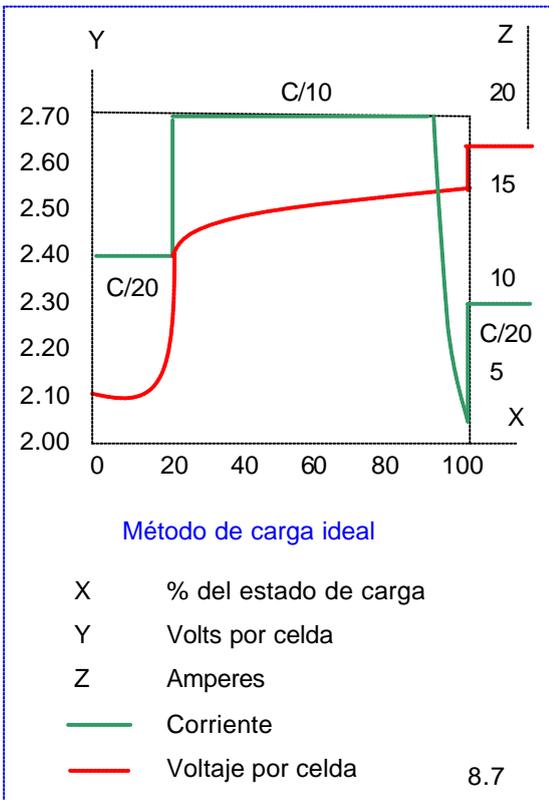
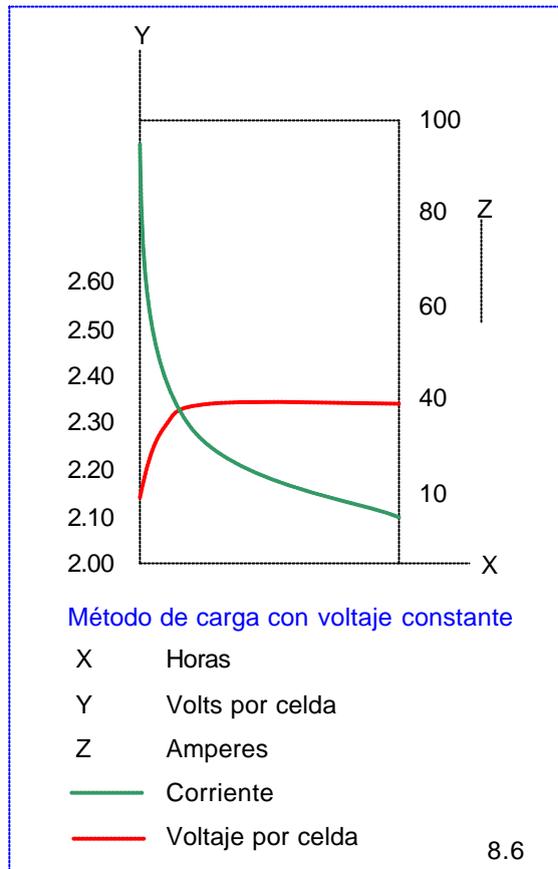
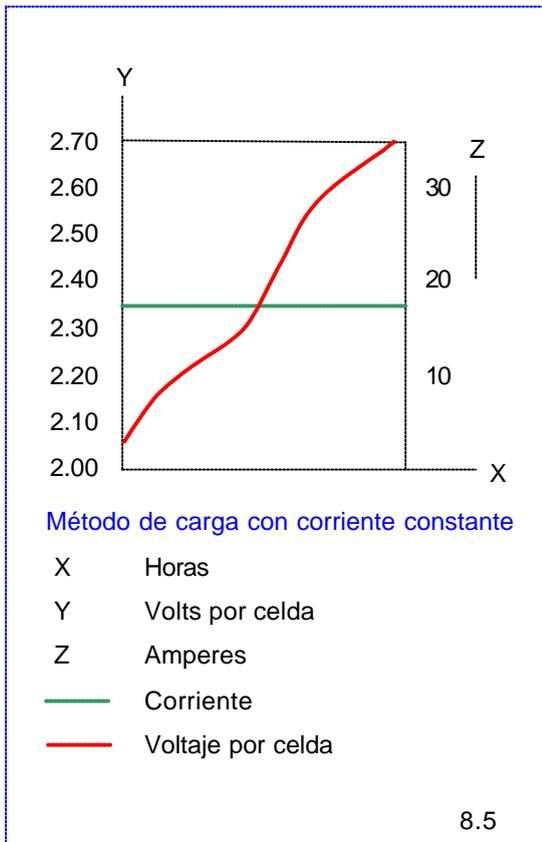
$$\text{Corriente de carga} = (\text{Capacidad de la batería} \times 115 \%) / \text{Tiempo} + \text{Carga DC}^{81}$$

En esta ecuación la corriente de carga determina el tamaño del cargador requerido, el 115% es un factor de eficiencia para contrarrestar las pérdidas, la carga DC es cualquier carga en el sistema eléctrico del EV, que es cero si se desconectan las baterías del sistema eléctrico en la recarga. En las instalaciones domésticas convencionales se pueden conectar cargadores de hasta 20A. Cargadores de mayor capacidad requieren de una instalación especial trifásica.

---

<sup>80</sup> Build Your Own Vehicle; Bob Brand 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310, pág.243

<sup>81</sup> Idém pág.245



#### 8.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE CARGA

Quizás el tiempo de recarga de baterías sea una de los inconvenientes que preocupen al consumidor potencial de autos eléctricos. A continuación se hablará de algunos métodos para obtener baterías con carga en menos tiempo así como una perspectiva de soluciones prácticas a corto plazo.

##### *Recarga con alto voltaje*

Algunos países han trabajado en el desarrollo de formas alternativas de recarga de baterías que consiste en alimentarlas con corriente directa de alto nivel, se requiere de instalaciones de 240 V AC e inclusive de 480 V AC. Aunque una batería común de plomo ácido sufriría daños irreparables las baterías más avanzadas con diseños especiales, como un mayor número de electrodos delgados, separadores y electrolito especiales, pueden ser cargadas en menos de la mitad de tiempo. Las baterías de níquel – cadmio pueden ser adaptadas a este proceso de carga rápida sin problemas.

##### *Reemplazo del juego de baterías*

Otro método para resolver el problema referente al prolongado tiempo que toma recargar las baterías es intercambiar estas cuando su energía este por agotarse por un juego con carga. Se requieren estaciones de servicio especializadas donde se pueden reemplazar las baterías en pocos minutos, de ser así las baterías deben ser propiedad de la estación de recarga y se deben reemplazar con garantía de que se encuentran en buen estado. Otro detalle importante es el diseño del vehículo para permitir el fácil reemplazo del juego de baterías que puede pesar hasta 500 kg. El último punto es más de carácter económico que técnico, ya que el costo de mantener un amplio almacén de baterías aunado a un sistema eficiente de carga rápida es elevado. Como ejemplo tenemos una estación de gasolina en la zona urbana la cual abastece de combustible a 1500 vehículos diarios en promedio, trasladando estos valores a vehículos eléctricos y asumiendo que se trata de baterías de plomo-ácido con un valor de USD 2000, implica una inversión inicial de USD 3,000,000 para reservas

de un solo día. Un almacén de baterías de cuando menos dos días se requiere para solventar fallas provocadas por maltrato o envejecimiento de estas. Añadiendo el costo del sistema de carga así como otras infraestructuras requeridas da un costo aproximado de USD 8,000,000. El obtener un margen considerable de ganancia con estaciones de recarga y volverlo así viable parece difícil, pero no es imposible.<sup>82</sup>

### *Infraestructura para autos eléctricos*

Con la finalidad de impulsar la venta a gran escala en el mercado al vehículo eléctrico se requiere, entre otras cosas, una infraestructura adecuada que permita la existencia de tres sistemas de recarga.

El primero, y también sería el más utilizado, es la instalación doméstica de carga, la cual constaría de 6kW como máximo, sin embargo la mayoría serían diseñadas con una capacidad de 3kW para una carga de 8 a 10 horas durante la noche. Un gran número de vehículos recargados durante la noche no representa ningún problema para la estación eléctrica e inclusive representa una ventaja al nivelar la demanda de energía durante la noche.

La segunda manera de carga es la conocida como “oportunidad para recargar” y requiere de la disponibilidad de cargadores públicos ubicados en estacionamientos de supermercados, universidades, empresas, centros comerciales, etc. Es posible que el máximo para estos cargadores públicos sea de 6kW por el alto costo que implica el construir la red de distribución de energía. El costo se puede reducir si los automóviles cuentan con cargadores ínter contruidos y también esto resolvería los diferentes requerimientos de carga para los distintos tipos de baterías que se utilicen.

Finalmente se tienen las estaciones de carga rápida en las cuales es posible obtener en 15 minutos un incremento del 20 al 80% de carga en la batería, la energía transferida a las baterías del automóvil es de unos 48kW. Asumiendo

---

<sup>82</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook, 2001; 1ª edición; TJ International. Págs. 193.pág.115

que la estación de carga sea capaz de abastecer energía a 20 autos requerirá de una red 1MW.<sup>83</sup>

#### *Técnicas de carga para baterías basadas en níquel*

Existen diferencias significativas entre la operación de las baterías basadas en níquel (níquel-hierro, níquel-zinc, níquel-cadmio y níquel-hidruro de metal) y las baterías de plomo-ácido discutidas en la sección anterior. En particular se tiene que las sobrecargas de corriente son menos críticas en las baterías de níquel ya que el ciclo interno de oxígeno, el cual absorbe el exceso de corriente de carga, es moderado por la gran razón de reducción del oxígeno en el electrodo negativo. Esto hace posible que las baterías de níquel puedan ser cargadas a una mayor razón sin perder agua. Las baterías de níquel-cadmio tienen la característica de aceptar hasta el 50% de carga de su capacidad máxima durante la etapa inicial de recarga. Al inicio se pueden obtener altas razones de carga con muy bajos voltajes en las celdas, cuando el estado de carga alcanza el 50% es necesario incrementar el voltaje para mantener la razón de carga ya que el ciclo interno de oxígeno demanda más corriente. Al utilizar altas razones de carga es necesario controlar la corriente para evitar incrementos excesivos de temperatura y presión dentro de la celda, esto se logra adecuadamente al tomar la temperatura y voltaje en circuito abierto de las celdas. La figura 8.9 muestra el voltaje de la celda y la temperatura durante una carga rápida sin control e ilustra la disminución en el voltaje de la celda, cerca de la carga total, causada por el incremento en la temperatura de ésta con la posible consecuencia de daño irreversible.<sup>84</sup>

Para cargar rápidamente las baterías de níquel es esencial utilizar cargas por pulsos con la finalidad de poder medir el voltaje en circuito abierto de la batería durante las interrupciones de corriente. Utilizando carga por pulsos junto con la medición de temperatura de las celdas se puede obtener un sistema de carga que suministre corriente en una gran razón durante el periodo inicial hasta que un voltaje preestablecido sea alcanzado, entonces la corriente de carga

---

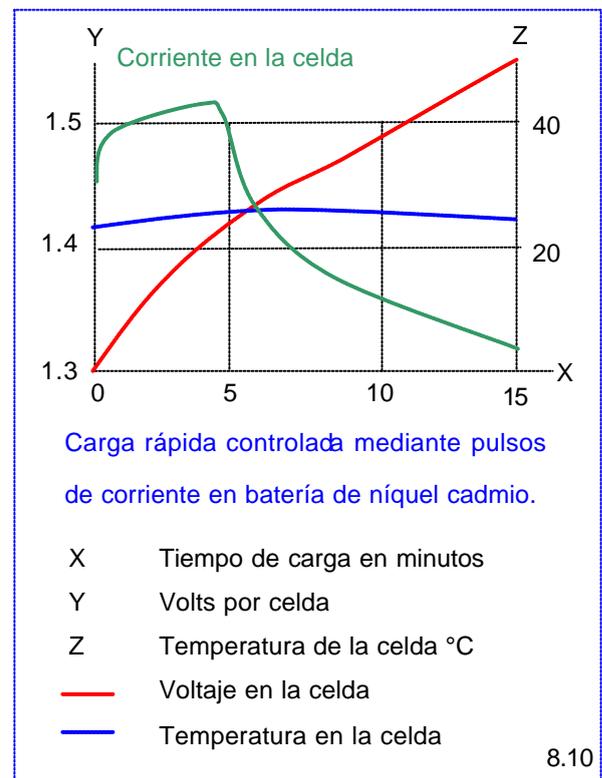
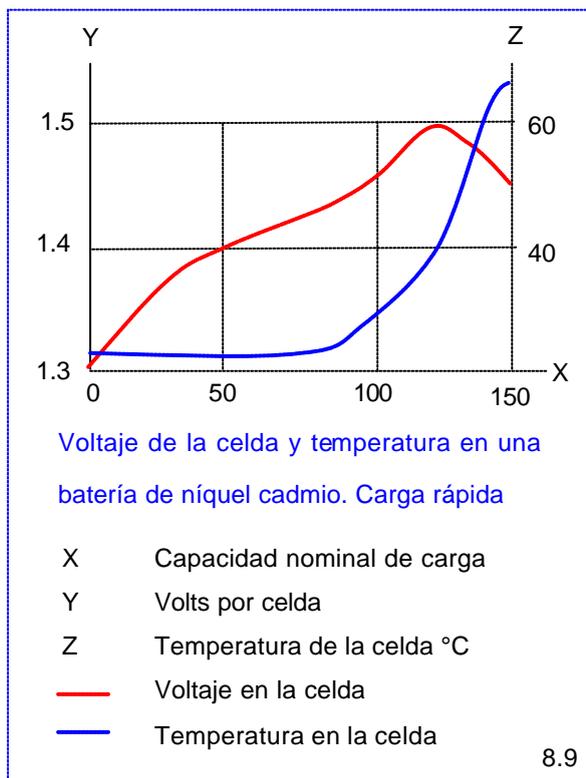
<sup>83</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook, 2001; 1ª edición; TJ International. Págs. 193.págs.116-118

<sup>84</sup> Idem. Pág.105

disminuirá constantemente para mantener la temperatura de las celdas prácticamente uniforme. La característica de este tipo de controlador se ilustra en la figura 8.10 es posible recargar baterías de níquel-cadmio en 15 minutos utilizando esta técnica.<sup>85</sup>

Las baterías de níquel-hidruro de metal son similares en prácticamente todos los aspectos a las de níquel-cadmio y el reemplazar unas por otras en un sistema no debe representar problema alguno.

Una característica importante presente en algunas baterías de níquel es el fenómeno conocido como “efecto memoria”. Cuando las baterías son sujetas a un número importante de cargas y descargas parciales sin ser descargadas completamente se forman cristales sobre el electrodo reduciendo su área de contacto y causando un aparente decremento en el voltaje y en su capacidad. Este “efecto” puede ser rápidamente corregido al realizar una descarga completa seguida por una carga total.



<sup>85</sup> The Electric Car; Michael H. Westbrook, 2001; 1ª edición; TJ International. Págs. 193.pág.106

En la selección del cargador de baterías para el automóvil eléctrico de la tesis se tiene la opción de adquirir un cargador de SAFT o Matsushita si se equipa con baterías de Ni – MH o un cargador como el K & W Modelo BC – 20 si utiliza baterías de plomo – ácido. Este último modelo se equipa en el automóvil y permite recargar baterías en cualquier lugar con una toma de 120 V AC, su masa es de solo 4.5 kg y cuenta con sistemas de protección de sobrevoltaje.

Finalmente en la figura 8.11 se muestra en un diagrama de bloques la conexión de los principales elementos del vehículo eléctrico, como lo son las baterías, el cargador, el controlador y el motor.

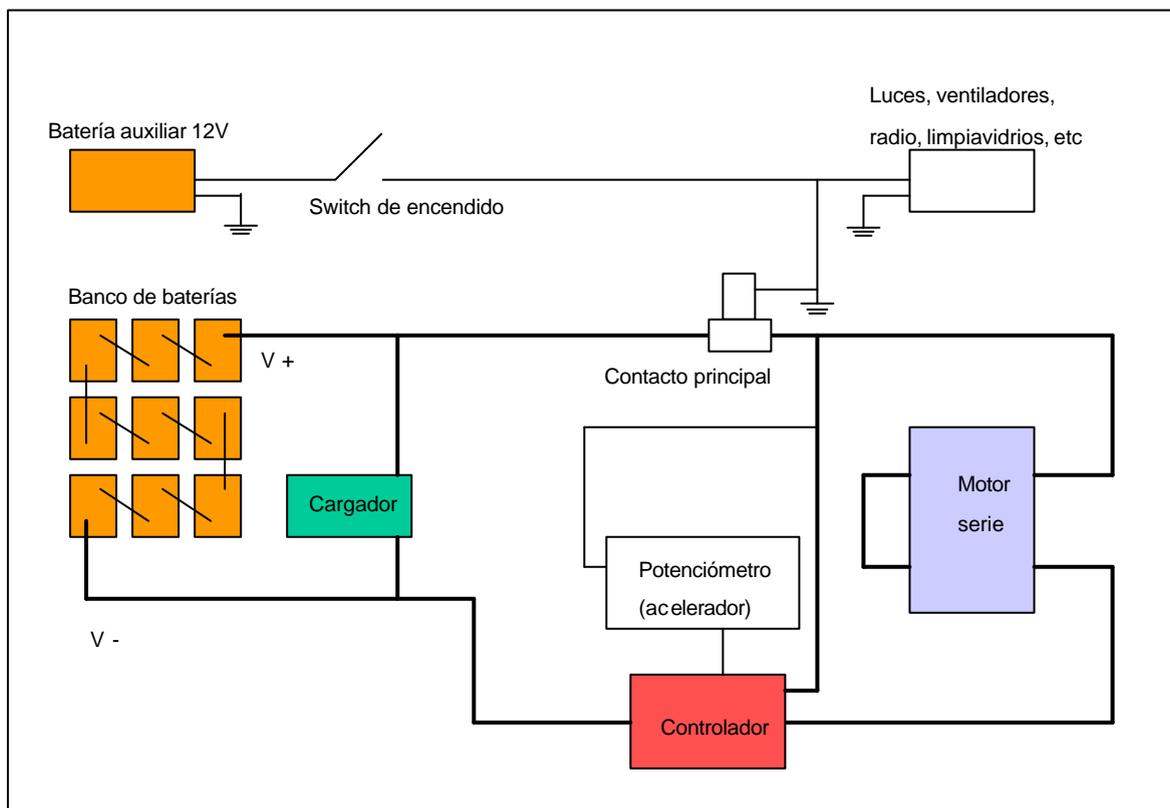


Figura 8.11



## Bibliografía

The Electric Car; Michael H. Westbrook, 2001; 1ª edición; TJ International. Págs. 193

Build Your Own Vehicle; Bob Brant 1994, 1ª edición; Mc Graw Hill; Págs. 310

Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design; Ron Hodgkinson y John Fenton, 2001; SAE International  
253 págs

Forward Drive; Jim Motavalli 2000; 1a. edición; TJ International; 193 páginas

<http://www.kta-ev-com/sale>

<http://www.innerauto.com/innerauto/text/fuel97.html>

<http://www.automotive.com/reviews/12/2004/ford/thunderbird/walkaround.htm>

<http://www.fueleconomy.gov/feg/sbs/htm>

<http://www.evuk.com.uk/hotwires/rawstuff/art24.html>

[http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero\\_Beats\\_Ferrari.htm](http://www.acropulsion.com/press%20releases/tzero_Beats_Ferrari.htm)

[http://www.speedace.info/white\\_lightning.htm](http://www.speedace.info/white_lightning.htm)

<http://www.pvem.org.mx/contaminación.htm>

<http://www.toyota.com/vehicles/2004/prius/index2.html>

[http://www.hondacars.com./models/model\\_overview.asp.?ModelName=Insight&bhcp=1&Browserdetected=True](http://www.hondacars.com./models/model_overview.asp.?ModelName=Insight&bhcp=1&Browserdetected=True)

<http://www.ccities.doe.gov/pdfs/snapshot.pdf>