



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

“FRENO REGENERATIVO EN AUTOMÓVILES PARA USO
HÍBRIDO”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

RAÚL GUEVARA MACÍAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.	3
ÍNDICE DE FIGURAS.	4
INTRODUCCIÓN.	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	9
JUSTIFICACIÓN.	10
OBJETIVO GENERAL.	10
1. IMPORTANCIA DEL FRENO REGENERATIVO, USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE LOS AUTOMÓVILES EN LA CIUDAD Y SU IMPACTO AMBIENTAL.	11
1.1. Desarrollo histórico del freno regenerativo.	11
1.2. Importancia de la recuperación de energía en vehículos convencionales.	14
1.3. Frenada regenerativa.	15
1.4. Problemática ambiental a causa del CO ₂ producido por vehículos.	16
1.5. Protocolo Kioto y relación con el efecto invernadero.	19
2. CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES PARA EL USO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA (KERS).	21
2.1. Freno regenerativo.	21
2.1.1 Modelo de máquina eléctrica.	22
2.1.2. Sistema de engranajes planetarios.	22
2.1.3. Freno tradicional.	23
2.2. Funcionamiento básico del KERS (Kinetic Energy Recovery System) en la F1.	25
2.3. División de la tecnología KERS.	26
2.3.1. KERS mecánico.	26
2.3.2. KERS eléctrico.	26
2.3.3. Electrónica de potencia.	28
2.4. Partes indispensables del KERS.	29
2.4.1. Motor-generator.	29
2.4.2. Baterías.	30
2.4.3. Unidad de control.	30
2.5. Recarga regenerativa.	32
2.5.1. Sistemas de baterías de litio.	32
2.5.2. Regeneración de energía con volantes de inercia.	34
2.6. Pérdida de energía cinética.	34
2.7. Sistema híbrido.	36
2.7.1. Clasificación de vehículos híbridos.	36
2.7.2. Accionamientos híbridos.	38



3. USO DEL FRENO REGENERATIVO EN AUTOMÓVILES HÍBRIDOS.	41
3.1. Análisis comparativo en cuanto a costos de adquisición y combustible.	41
3.2. Condicionantes de la recarga de un automóvil híbrido.	46
3.3. Especificación de la batería de Ion-Litio, utilizada en el automóvil a estudio.	48
3.4. Descripción del sistema de freno regenerativo del automóvil híbrido a considerar. ..	49
3.4.1. Uso del freno regenerativo.	52
3.5. Pasos de una aceleración y una desaceleración del automóvil con freno regenerativo.	55
4. ANÁLISIS PARA LA REGENERACIÓN DE ENERGÍA.	56
4.1. Sistema mecánico del automóvil para la obtención de la energía cinética. ..	56
4.2. Análisis de potencia.	60
4.3. Análisis de energía.	63
4.4. Análisis de consumo energético.....	65
4.4.1. Planteamiento del modelo matemático del automóvil a estudio.	66
4.5. Comportamiento de un control por el método de Ziegler/Nichols para el freno regenerativo.....	68
5. MODOS, TIPOS DE MÁQUINAS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA HÍBRIDO	70
5.1. Características de los modos de las tres máquinas del automóvil híbrido.	70
5.2. Tipos de máquinas.	73
5.3. Simulación del comportamiento de la frecuencia de corriente y deslizamiento del rotor/estador del generador eléctrico.	74
6. EFICIENCIA DEL FRENO REGENERATIVO Y MEDIDAS DE SEGURIDAD EN AUTOMÓVILES HÍBRIDOS.	78
6.1. Eficiencia (η) de un motor eléctrico.	78
6.2. Medidas de seguridad más recomendables en automóviles híbridos.	79
CONCLUSIONES.	84
BIBLIOGRAFÍA.	86



ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1: Importancia del freno regenerativo, uso de la energía eléctrica de los automóviles en la ciudad y su impacto ambiental.	11
Tabla 1.1. Composición del aire seco puro (sin incluir partículas) a nivel del mar, partes por millón en volumen.....	19
Capítulo 2: Características y componentes para el uso del sistema de recuperación de energía cinética (KERS).	21
Tabla 2.1. Tiempo contra la descripción de la desaceleración.	24
Tabla 2.2. Relación de trabajo de las baterías de ion-litio.	33
Tabla 2.3. Partes del regulador de velocidad con recuperador de velocidad cinética.....	36
Tabla 2.4. Configuración de accionamiento híbrido.	39
Capítulo 3: Uso del freno regenerativo en automóviles híbridos.	41
Tabla 3.1. Datos de cálculo para la comparativa, Nissan Sentra 2013.	43
Tabla 3.2. Resultados del Nissan Sentra 2013.	43
Tabla 3.3. Datos de cálculo para la comparativa, Toyota Prius 2013.	44
Tabla 3.4. Resultados del Toyota Prius 2013.....	45
Tabla 3.5. Comparación de costos combustible-electricidad según kilometrajes.	45
Tabla 3.6. Datos característicos del Toyota Prius.	46
Tabla 3.7. "Tabla de resultados para recargas con tensión 220 V".	47
Tabla 3.8. Descripción de los pasos para la aceleración del motor eléctrico.....	55
Capítulo 4: Análisis para la regeneración de energía.	56
Tabla 4.1. Parámetros para el cálculo de la energía cinética.	58
Tabla 4.2. Parámetros para el cálculo de la energía cinética.	58
Tabla 4.3. Regla de sintonización de Ziegler/Nichols basada en la respuesta escalón de planta.	69



ÍNDICE DE FIGURAS.

Capítulo 1: Importancia del freno regenerativo, uso de la energía eléctrica de los automóviles en la ciudad y su impacto ambiental.	11
Figura 1.1. 1968 AMC Amitron, el prototipo eléctrico.	11
Figura 1.2. AMC Amitron y su caja de baterías de litio.	11
Figura 1.3. Presentación del concepto Electrón AMC.	12
Figura 1.4. Perfil de conducción típica de tiempo vs velocidad.	14
Figura 1.5. Tensión de salida usando un reductor.	15
Figura 1.6. Atlas de concentración de CO ₂ en el océano superficial.	16
Figura 1.7. Emisiones anuales de CO ₂ .	17
Figura 1.8. Emisiones anuales de CO ₂ .	17
Figura 1.9. Datos obtenidos de núcleos de hielo hasta 1958, observatorio de Mauna Loa en Hawái eléctrico.	18
Figura 1.10. Efecto invernadero producido por el CO ₂ .	19
Capítulo 2: Características y componentes para el uso del sistema de recuperación de energía cinética (KERS).	21
Figura 2.1. Recuperación de energía cinética por medio del freno regenerativo.	21
Figura 2.2. Sistema de engranajes planetarios.	22
Figura 2.3. Freno de disco.	23
Figura 2.4. Tiempo y desaceleración durante un frenado hasta el estado de reposo del vehículo.	24
Figura 2.5. La energía cinética se transfiere desde la parte de atrás del eje a través de la caja de cambios y el motor a un motor-generador. Se convierte en energía eléctrica antes de ser almacenada en una batería.	25
Figura 2.6. Diagrama KERS mecánico.	26
Figura 2.7. Motor-generador.	26
Figura 2.8. El sistema original Flybrid Kinetic Energy recuperación (KERS).	27
Figura 2.9. Diagrama del sistema original Flybrid.	27
Figura 2.10. Relación entre electrónica de potencia, potencia, electrónica y control.	28
Figura 2.11. Unidad de control completa para un auto F1, KCU.	29
Figura 2.12. Esquema de la conexión del motor-generador.	30
Figura 2.13. Diagrama de bloques de la unidad de control del motor.	30
Figura 2.14. Diagrama del funcionamiento de la ECU (unidad de control del motor).	31
Figura 2.15. Circuito básico de las baterías de ion-litio.	32
Figura 2.16. Representación esquemática de una batería ion-litio tradicional.	33
Figura 1.17. Corte del sistema Williams, Volante de inercia.	34
Figura 2.18. Regulador de velocidad con recuperador de velocidad cinética.	35
Figura 2.19. Sistema híbrido en serie (en verde parte eléctrica y en rojo parte mecánica)	37
Figura 2.20. Sistema híbrido en paralelo (en verde parte eléctrica y en rojo parte mecánica).	37



Figura 2.21. Configuración de accionamiento híbrido.	38
Capítulo 3: Uso del freno regenerativo en automóviles híbridos.	41
Figura 3.1. Sentra 2013.	41
Figura 3.2. Toyota Prius Híbrido 2013.	42
Figura 3.3. Batería de Ion-Litio para Toyota Prius.....	48
Figura.3.4. Descripción de las partes de la batería de ion-litio.	49
Figura.3.5. Automóvil híbrido Toyota Prius.	49
Figura 3.6. Comparación del ciclo Atkinson con el Otto.	50
Figura 3.7. Motor Híbrido Toyota Prius.	51
Figura 3.8. Explosión del Generador eléctrico.....	52
Figura 3.9. Sistema ABS en rueda delantera.	53
Figura 3.10. Diagrama del freno regenerativo.....	54
Figura 3.11. Visualización de la aceleración.	55
Capítulo 4: Análisis para la regeneración de energía.	56
Figura 4.1. Diagrama del vehículo con el volante de inercia.	56
Figura 4.2. Volante de inercia del generador del Toyota Prius.....	57
Figura 4.3. Grafica para energía cinética.	59
Figura 4.4. a) Circuito compuesto de una fuente que alimenta una carga activa y reactiva, b) Diagrama fasorial del voltaje y las corrientes, c) Flujo de potencias activa y reactiva de la fuente a la carga.	61
Figura 4.5. a) Instrumentos utilizados para medir E, I, P y Q en un circuito, b) El diagrama fasorial se puede deducir de las lecturas del instrumento.	62
Figura 4.6. Especificaciones Máximo rendimiento par-velocidad para el Prius 2004.....	63
Figura 4.7. Diagrama de bloques del control.....	68
Figura 4.8. Respuesta de la sintonización de Ziegler/Nichols.	69
Capítulo 5: Modos, tipos de máquinas y simulación del comportamiento experimental del sistema híbrido.	70
Figura 5.1. Sistema de máquinas del vehículo híbrido.	70
Figura 5.2a. Diagrama de la corriente del rotor en el generador eléctrico.	74
Figura 5.2b. Frecuencia del rotor del generador eléctrico.	75
Figura 5.3a. Diagrama de deslizamiento del motor eléctrico.	75
Figura 5.3b. Frecuencia deslizamiento del motor eléctrico.....	76
Figura 5.3c. Frecuencia deslizamiento del motor eléctrico.	76
Figura 5.4. Mapa del rendimiento de un motor eléctrico.....	77
Capítulo 6: Eficiencia del freno regenerativo y medidas de seguridad en automóviles híbridos.	80
Figura 6.1. Etiqueta de advertencia en automóviles híbridos.	80
Figura 6.2. Inversor y convertidor de voltaje.	81



Figura 6.3. Componentes principales del sistema de alta tensión de un automóvil híbrido.
..... 81

Figura 6.4. Esquema de los componentes de seguridad para alta tensión de un automóvil
híbrido Toyota..... 83



INTRODUCCIÓN

La utilización de automóviles híbridos es una gran ventaja para el ahorro de combustibles fósiles, ya que al sustituir los automóviles convencionales, los recursos naturales serían menos explotados. En México, el petróleo es la principal fuente de insumos para generar combustible en los sectores de transporte e industria, en el transcurso del tiempo se ha ido agotando, necesitando cada vez más puntos donde explotar el crudo y en consecuencia los costos de los combustibles se han elevado cada día más.

Los vehículos híbridos son de costo elevado, por lo que los autos de combustión interna al no serlo son los más utilizados en la actualidad; por lo tanto, es prioritario fabricar un automóvil híbrido que cuente con más ventajas sobre el automóvil convencional, teniendo en cuenta que se debe de trabajar en esta tecnología mejorando el diseño de los mismos, abaratando la producción y que este genere un ahorro de energía al utilizarlos para que este tipo de automóvil en un futuro sea utilizado con mayor frecuencia.

Se debe de tomar en cuenta los siguientes factores:

- Eliminar emisiones contaminantes, sobre todo el CO₂.
- Reducción de ruido ambiental.
- Mejorar el costo de la autonomía del automóvil híbrido; a través de nuevas tecnologías como la que se propondrá en el presente trabajo que es la energía cinética.
- Financiamientos de adquisición más viables, como los de los automóviles convencionales.
- Diseños más llamativos para los compradores.

Por lo que, en los capítulos que conforman esta tesis, se da a conocer una importante tecnología, es decir que se puede tener una recuperación de energía cinética en los automóviles híbridos con el simple hecho de frenar; teniendo este sistema el cual consta de un generador eléctrico o motor eléctrico que nos ayuda a recuperar dicha energía.

Para este caso es necesario utilizar un freno regenerativo, donde tome la energía liberada por el sistema y la convierta en energía eléctrica limpia y funcional; entendiendo como energía limpia aquella que no genera ningún tipo de residuo contaminante, todo esto, mientras sucede la desaceleración. Con esta importante situación, el freno regenerativo produce menos desgaste, recarga las baterías, reduce la acumulación de calor en el motor y mejora la autonomía confiable.

Este estudio propone ayudar a describir las condiciones del funcionamiento del sistema de recuperación de energía cinética y convertirla en eléctrica para obtener el máximo aprovechamiento del mismo, contrario a lo que hoy en día se utiliza como la explotación inmoderada de los recursos naturales y la alta inversión económica.



Por esta razón, el uso de esta tecnología debe ser explotada, que necesariamente se convierte en un vehículo híbrido cuya mayor ventaja de este tipo de generación eléctrica es que, el recurso se encuentra siempre activo cuando se hace uso del sistema de frenado, tal es el caso de que en las grandes ciudades como la Ciudad de México al existir el problema del tráfico, que es muy cotidiano en consecuencia el uso del freno se utiliza con una frecuencia muy alta, con esto el sistema funciona mejor ahorrando recursos.

La desventaja actual de este sistema implementado en los vehículos híbridos es el elevado costo de la producción de los mismos; además, la capacidad de la recarga eléctrica es lenta y los fabricantes prefieren tener autos híbridos y/o eléctricos utilizando la electricidad proporcionada por un sistema de red eléctrica, es decir, conectándolo; sin embargo, si el mismo vehículo produce por sí solo esa energía eléctrica aunque el costo del sistema sea elevado, a largo plazo será menor pues el ahorro se verá favorecido en diversos recursos y en la obtención de energía.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los vehículos convencionales a base de motores de combustión interna se han utilizado durante más de un siglo, pero la creciente demanda de vehículos con un menor consumo y menor emisión de contaminantes, así como la creciente escasez de combustible fósil, preparan el terreno a un nuevo enfoque de diseño de autos a futuro.

Para resolver el problema, se han realizado estudios que permiten convertir la energía cinética de un auto en energía eléctrica, que se almacena en los momentos en que se requiera frenar, ya sea para disminuir su velocidad o para mantenerla cuando una fuente externa actúa sobre ella, así aprovechando su energía al máximo. La combinación inteligente de esta tecnología en un sistema híbrido puede conseguir ahorros de combustible notables y una considerable disminución en la emisión de gases y tener una mejor autonomía.



JUSTIFICACIÓN

Las fuentes de energía actuales no son renovables; en consecuencia, está la necesidad latente de los sistemas híbridos para no agotar las primeras.

La energía es un tema prioritario a nivel mundial y la principal fuente es el petróleo, pero este es finito y a la vez los patrones de consumo del hombre están modificando en forma peligrosa el medio ambiente y agotando sus reservas; esto ha llevado a realizar trabajos de investigación para dar solución a este problema.

Esta tesis tiene el propósito de dar una opción en el uso y ahorro de energía eléctrica en sistemas de propulsión aprovechando el frenado regenerativo así como eliminar emisiones contaminantes, sobre todo el CO₂, reducción de ruido ambiental. Mejorar el costo de la autonomía del automóvil híbrido; a través de nuevas tecnologías como la que se propondrá en el presente trabajo que es la energía cinética.

Este trabajo contribuye a dos áreas de investigación: el ahorro de energía y el control inteligente.

Dando una ganancia de ahorro de combustible en consecuencia ahorro económico y ambiental

OBJETIVO GENERAL

Se dará a conocer distintos ámbitos sobre el freno regenerativo en automóviles para uso híbrido, tratando los siguientes temas:

1. Importancia del freno regenerativo, uso de la energía eléctrica de los automóviles en la ciudad y su impacto ambiental.
2. Características y componentes para el uso del sistema de recuperación de energía cinética (KERS).
3. Uso del freno regenerativo en automóviles híbridos.
4. Análisis para la regeneración de energía.
5. Modos, tipos de máquinas y simulación del comportamiento experimental del sistema híbrido.
6. Eficiencia del freno regenerativo y medidas de seguridad en automóviles híbridos.

Así como permite al lector conocer la evolución, estructura, construcción y operación de un sistema de recuperación de energía cinética funcional, basado en el empleo versátil de la energía térmica y eléctrica, favoreciendo al medio ambiente y optimizando el consumo mínimo de recursos no renovables.

Al igual hacer una comparación entre un carro convencional (combustión interna) y el vehículo híbrido.



CAPÍTULO 1

IMPORTANCIA DEL FRENO REGENERATIVO, USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE LOS AUTOMÓVILES EN LA CIUDAD Y SU IMPACTO AMBIENTAL

1.1. Desarrollo histórico del freno regenerativo

Un ejemplo temprano del freno regenerativo fue desarrollado en 1967 para el vehículo Amitron de American Motors Corporation (AMC) y Gulton Industries. Este vehículo era accionado completamente por baterías en fase prototipo, estas se recargaban por frenado regenerativo, lo que incrementaba el rendimiento del automóvil.



Figura 1.1. 1968 AMC Amitron, el prototipo eléctrico. (ref.1)

Sus formas no eran las más agraciadas, pero aun así, conserva ese encanto de los prototipos de la década de los '60.

Además, pese a eso, tuvo una gran acogida entre el público durante su presentación. Parece mentira, pero es así.

Su tecnología era equiparable a la actual, salvando las diferencias, claro está. Casi se puede decir que la mayoría de elementos que nos presentan ahora como revolucionarios ya estaban presentes entonces. Por ejemplo, los frenos servían para **regenerar la carga de las baterías.**



Figura 1.2. AMC Amitron y su caja de baterías de litio. (ref. 1)

Por supuesto, las baterías no son la panacea de la vanguardia, puesto que contaba con dos tipos de baterías: unas de litio-níquel y otras de níquel-cadmio. Las primeras



funcionaban cuando el coche viajaba a velocidades sostenidas, mientras que el segundo tipo de baterías se utilizaba en las aceleraciones.

Las baterías de litio fueron diseñadas para velocidades constantes. Durante la aceleración, las baterías de níquel-cadmio debían cortar en breve para impulsar la Amitron desde cero a 50 mph (80 km / h) en 20 segundos. Un sistema de regeneración de energía de freno automáticamente cambiaba los motores de accionamiento de los generadores porque el vehículo desaceleraba, de forma que las baterías podían recargar, lo que aumentaba el alcance del automóvil. La primera prueba en ruta fue en 1968 con un sedán Rambler American. En ese momento, el vicepresidente de Diseño de American Motors, Richard A. Teague, estaba trabajando en un auto llamado "el Voltswagon"

No contaba prestaciones de escándalo como por el ejemplo el Tesla Roadster, pero no era eso lo que se buscaba. El AMC Amitron era un coche de ciudad, con lo que sus 80 km/h de velocidad máxima eran más que suficientes para su cometido. Eso sí, a pesar de su aerodinámica carrocería, para alcanzar la máxima velocidad necesitaba 20 segundos. Su autonomía era de unos excelentes 240 km por carga.

Otra de sus ventajas respecto a anteriores prototipos similares era su peso. El conjunto de baterías sólo pesaba 91 kg, una cifra a tener en cuenta dada la fecha de la que estamos hablando. Contaba con capacidad para tres ocupantes.

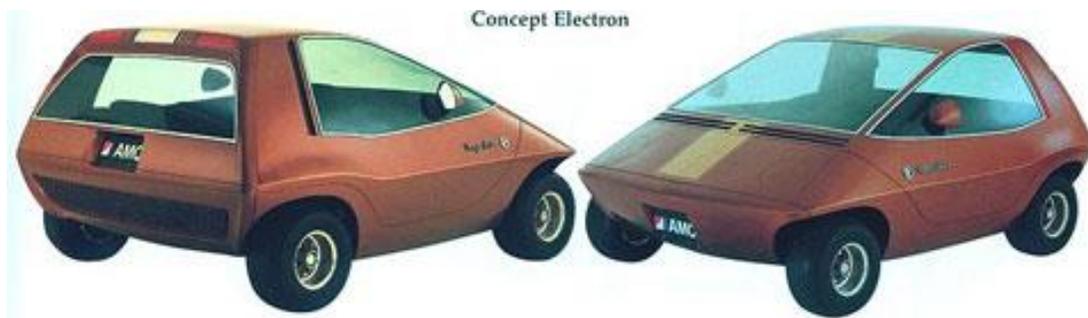


Figura 1.3. Presentación del concepto Electron AMC. (ref. 1)

En 1977, American Motors Corporation volvió a la carga con los coches de ciudad eléctricos y presentó el AMC Electron. Prácticamente igual en el planteamiento y en su diseño, sucumbió de igual forma a los costos de producción.



El uso del KERS (Kinetic Energy Recovery System), o freno regenerativo, se introdujo en los monoplazas de Fórmula 1 en el año 2009 al finalizar los tests en el Circuito de Montmeló, siendo la escudería BMW los primeros en implementar con relativo éxito este nuevo dispositivo. Los pilotos de la escudería Nick Heidfeld y Robert Kubica, que se encontraban entre los pilotos con más peso corporal de la Fórmula 1 mostraron su preocupación debido a que el peso reglamentario de los coches siguió siendo el mismo por lo que los pilotos que tenían mayor peso tenían menor lastre a repartir en el coche.

La escudería Toyota empezó la temporada en el Gran Premio de Melbourne sin el sistema KERS.

Ferrari presentó su modelo F60 el 12/01/2009 con el sistema KERS incorporado y lo utilizó en el Gran Premio de Australia en Melbourne.

Renault fue el primer equipo en confirmar que usaría el sistema KERS en el Gran Premio de Australia la semana del 06/04/2009.

En la actualidad existe la aplicación del "*frenado regenerativo en vehículos eléctricos e híbridos*". Los informes relacionados al tema solo dan una idea general de su principio de funcionamiento. De igual forma, los artículos relacionados con el tema nos dan una base teórica para la comprensión del frenado regenerativo.

- En el artículo "Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle", de S. R. Cikanek y K. E. Bailey, se analiza el sistema de frenado regenerador (RBS) para un vehículo eléctrico híbrido paralelo (PHEV), que realiza la recuperación de la energía del vehículo. Se hace una descripción del algoritmo del frenado regenerativo y de resultados de simulación de un modelo dinámico del PHEV que usa frenado regenerativo.^[1]
- En el artículo "Modeling and simulation for hybrid electric vehicles. II. Simulation", de Xiaoling He y Hodgson, J.W, se utiliza el modelo de un vehículo eléctrico híbrido (HEV) basado en el modelo desarrollado para un HEV paralelo construido en la Universidad de Tennessee, Knoxville (UT-HEV). Los resultados de la simulación para el UT-HEV predicen el funcionamiento del vehículo y proporcionan la mejora del control del vehículo. El modelo de la simulación proporciona la capacidad para la recuperación de energía por medio del frenado regenerativo, en función de la velocidad y la aceleración.^[2]
- En el artículo "Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter", de Juan W. Dixon, Micah Ortúzar y Eduardo Wiechmann, se representa un sistema de control para un vehículo eléctrico con baterías y ultracapacitores. El propósito de este dispositivo es permitir aceleraciones y desaceleraciones del vehículo eléctrico con pérdida mínima de energía, y el uso mínimo del banco de baterías. En los momentos de desaceleración el freno



regenerativo convierte la energía cinética en energía eléctrica la cual es almacenada en el ultracapacitor. [3]

1.2 Importancia de la recuperación de energía.

Cuando conducimos, durante cualquier trayecto, no está el 100 % del tiempo extrayendo energía del vehículo. Obviamente no siempre es el motor el que nos empuja, porque no siempre se frena y en ocasiones hay tramos con pendientes favorables a la marcha. Desde hace algún tiempo, los fabricantes de vehículos se han propuesto recuperar parte de la energía que se malgasta en frenadas, y en un vehículo eléctrico este sería un aspecto fundamental. El uso de la frenada regenerativa puede aportar una energía muy valiosa para los acumuladores de forma que, bien gestionada, se alargue la autonomía del vehículo con solo usarlo. Sería bueno introducir un pequeño cambio en la mentalidad del conductor a favor de la autonomía de las baterías, acostumbrándose a utilizar con previsión el freno para usar cuanto más el primer tramo del pedal de frenada exclusivamente regenerativa. Prescindiendo de la actuación de los frenos mecánicos es como más energía se logra recuperar. [4]

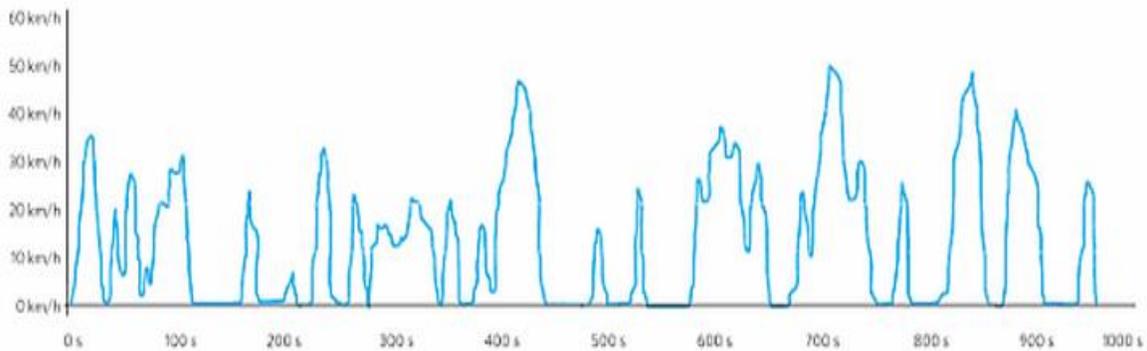


Figura 1.4. Perfil de conducción típica de tiempo vs velocidad. (ref. 2).

En la figura 1.4 se muestran las características de un perfil de conducción. Se observa que, con una conducción normal y habitual, hay muchísimos momentos en los que se puede recuperar energía (cada tramo con pendientes negativas es una desaceleración). Si se piensa en un vehículo eléctrico puro, no tiene sentido hablar del sistema start/stop, pero en un híbrido, y en conducción por ciudad, el hecho de apagar el motor de combustión cuando no se utiliza puede suponer un ahorro de combustible de hasta 10%. [5]

En el vehículo eléctrico, queda resaltada la importancia que tiene la recuperación de energía en las frenadas. Además, para simular la retención de un motor de combustible en un vehículo convencional, la gestión electrónica también permite recuperar energía, aprovechando la recreación del freno motor al que estamos acostumbrados. El lógico afán



de recuperar energía exige a las baterías la capacidad de ser cargadas con la máxima celeridad posible, de forma que puedan absorber la mayor parte de la energía que el motor, funcionando como generador, pueda proporcionarles eventualmente. Así, aparte de la capacidad de suministrar cantidades elevadas de potencia (energía instantánea), una característica importante a tener en cuenta en los acumuladores es su potencia de recarga (cantidad de energía que son capaces de absorber por unidad de tiempo).^[5]

1.3. Frenada regenerativa

Aquí lo importante cuando se acciona el pedal de freno, es que en el primer tramo se usa solo la capacidad de frenada que el motor eléctrico ofrece al trabajar como generador. Esta electricidad se aprovecha para cargar los acumuladores. Si se continúa accionando, entran en juego los frenos mecánicos convencionales. Hay que controlar electrónicamente la cantidad de energía que se aprovecha de la frenada, ya que en desaceleraciones muy potentes se podrían dañar los acumuladores.

Chopper de frenado

Los convertidores DC/DC se les llaman también Buck. En los automóviles, utilizamos uno de ellos para evacuar la energía de las frenadas que no es posible recuperar. Se puede dar el caso de que la frenada sea muy fuerte y provoque una tensión tan elevada que la batería no pueda absorber toda la energía generada. Otro ejemplo, aunque difícil, sería que la batería estuviese llena al 100% y el coche quisiera recuperar energía de una frenada muy prolongada. Es en estos casos cuando actúa el chopper de frenado. Siendo importante este dispositivo que consiste simplemente en una resistencia, conectada a un interruptor que permite el paso de la corriente a través de ella, provocando que la energía se pierda en forma de calor.^[6]

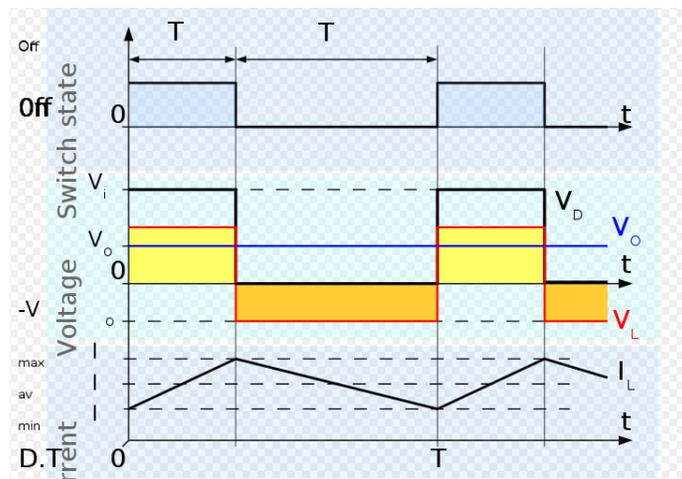


Figura 1.5. Tensión de salida usando un reductor. (ref. 3)



En la figura 1.5 se observa que la energía almacenada en la bobina se incrementa en estado ON (interruptor cerrado) y se disminuye durante el estado OFF (interruptor abierto). La bobina se usa para transferir energía desde la entrada a la salida.

La importancia de esto radica en la solución que adoptan algunos fabricantes, aunque no todos, por lo que se está haciendo es disipar la energía en forma de calor, algo muy peligroso. Si no está bien dimensionada, esta resistencia auxiliar puede provocar graves consecuencias en el funcionamiento del vehículo y en la seguridad de sus integrantes.^[6]

1.4. Problemática ambiental a causa del CO₂ producido por vehículos

Los vehículos en general son el primer foco de contaminación en las ciudades, tanto por los contaminantes emitidos como por el ruido. El sector del automóvil es el único que ha registrado tasas importantes de aumento de CO₂ en los últimos años. En las grandes ciudades y especialmente en la Ciudad de México provoca el gran porcentaje de la contaminación.^[7]

- Los principales contaminantes específicos de los vehículos son: vapor de agua, CO₂, CH₄, N₂O, O₃, hidrocarburos no quemados y compuestos orgánicos volátiles (COV).
- El efecto contaminante, a efectos del calentamiento global, de algunos CFC es del orden de hasta 11000 veces el de CO₂, el CH₄ los 24.5 veces y el N₂O unas 320 veces.

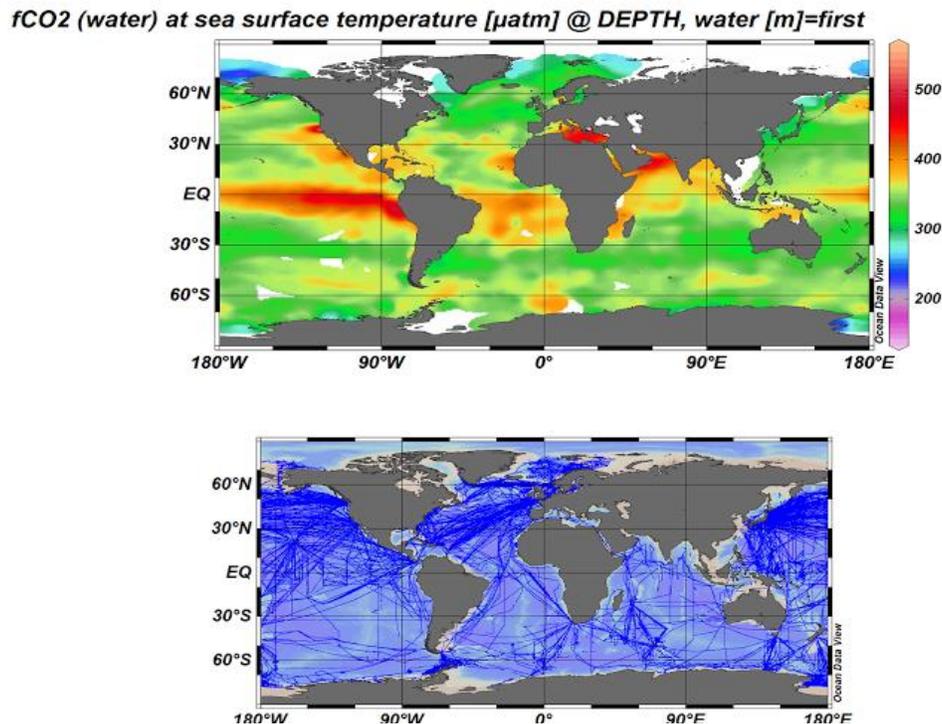
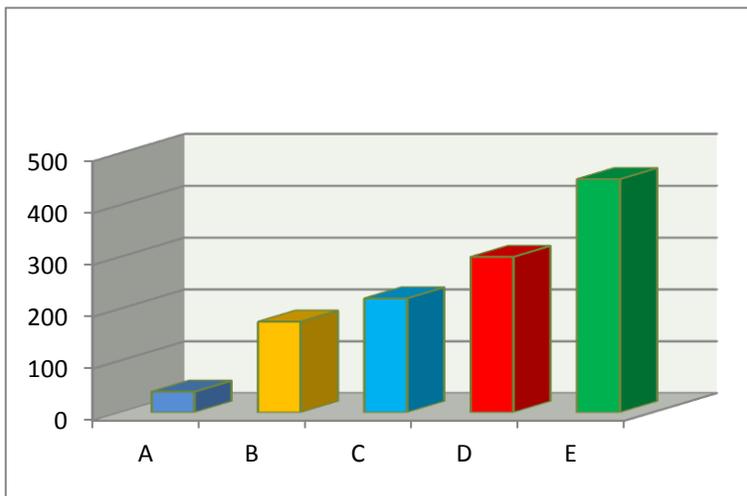


Figura 1.6. Atlas de concentración de CO₂ en el océano superficial. (ref.4)



Los nuevos carburantes con menor el azufre (S), con aditivos oxigenados (como el EMTB), los catalizadores y el control computarizado de la combustión, dan lugar a una mejor combustión y a una menor emisión de contaminantes. En las gasolinas se ha eliminado el plomo (Pb), aunque continúan cantidades de tóxicos como el benceno y tolueno, y en el diésel se emite mucho material en partículas.^[7]

Un vehículo con un consumo de 71-100km/hr, si circula unos 10000 km al año emite: 31 kg de gases al día (11.3 toneladas al año, con 1.46 toneladas de CO₂, equivalentes a 146 g de CO₂/km). La normativa de 2012 la más actualizada impone que los 120 g CO₂/km a los fabricantes de vehículos, con sanciones importantes para los que la superen.^[7]



- A. Motocicletas, 40 millones de toneladas
- B. Trenes, 175 millones de toneladas
- C. Aviones, 220 millones de toneladas
- D. Camiones/autobuses, 300 millones de toneladas
- E. Coches, 450 millones de toneladas

Figura 1.7. Emisiones anuales de CO₂. (ref. 5)

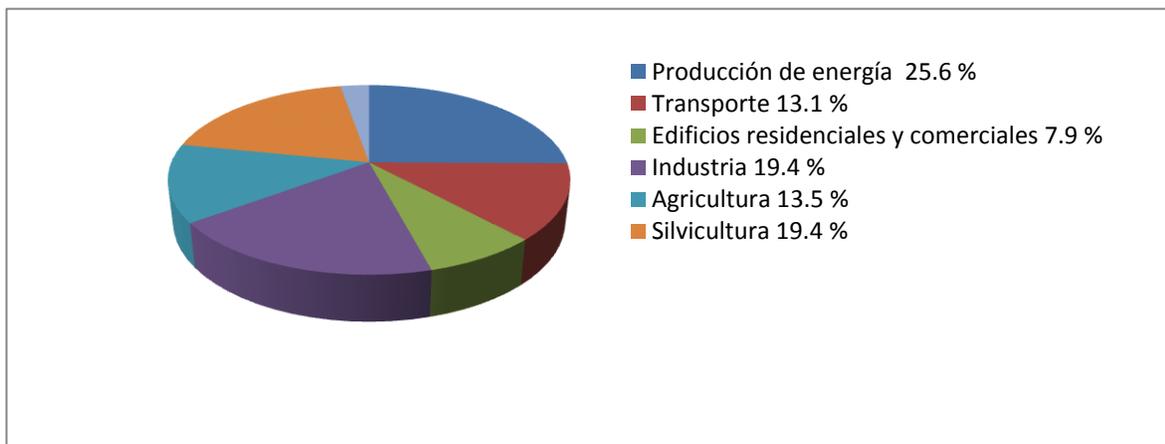


Figura 1.8. Emisiones anuales de CO₂. (ref. 5)



Los automóviles producen gran cantidad de residuos, tanto en la fase de servicio como cuando están inservibles. Antes del 2005 la recuperación debía ser del 85% del peso, y debería pasar al 95% en 2015, aunque los fabricantes lo consideran difícil en el aspecto global de los residuos que puede generar en su ciclo de vida. Los residuos del automóvil rondan los 60 kg/persona y año.^[7]

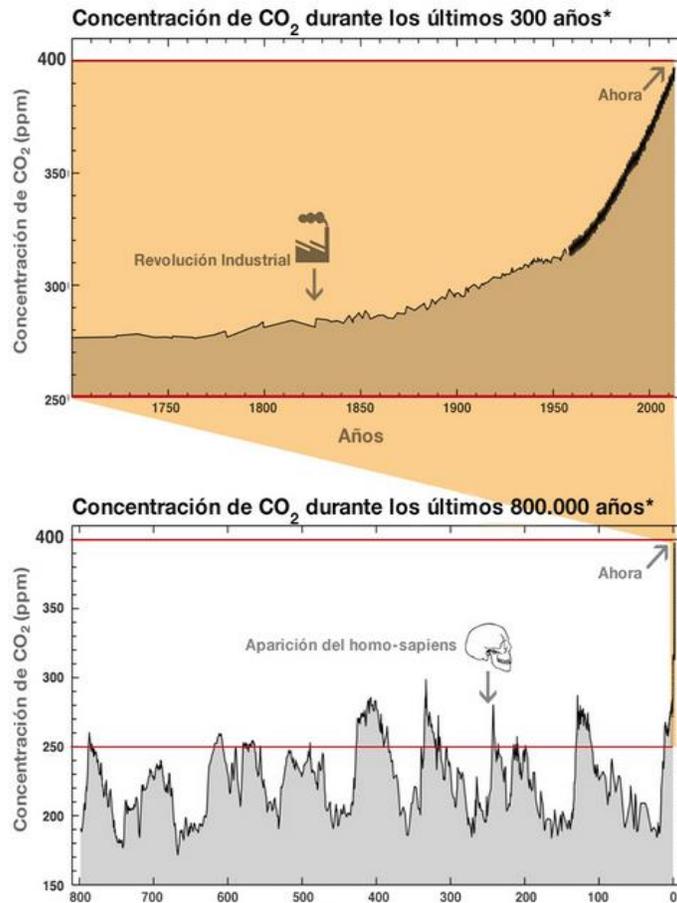


Figura 1.9. Datos obtenidos de núcleos de hielo hasta 1958, observatorio de Mauna Loa en Hawai. (ref.6)

Un informe del Consejo Nacional de Investigación (EE UU) indica que disminuirán las precipitaciones en la región mediterránea entre un 5% y un 10% por cada grado de calentamiento.^[8]



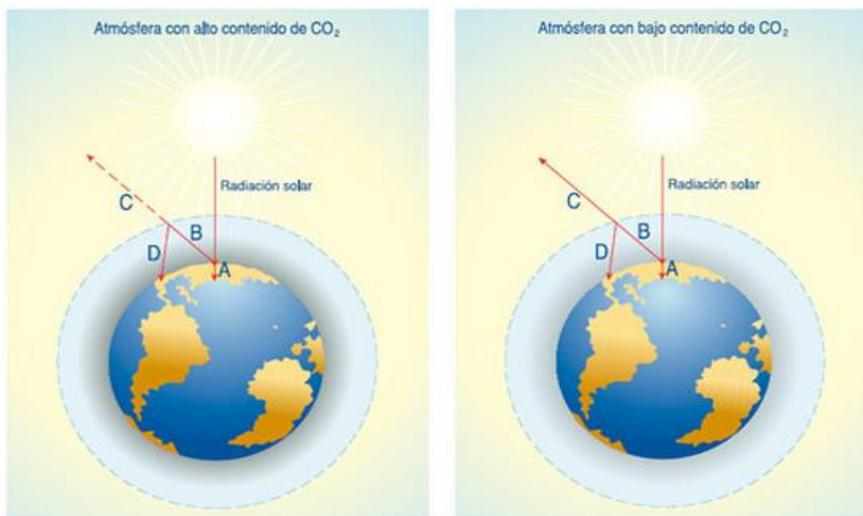
COMPUESTO	PPM (VOL) ^t	MG/NM ³	% (VOL)
Nitrógeno, N ₂	780840	8.95 x10 ⁹	78.09
Oxígeno, O ₂	209460	2.74 x10 ⁸	20.95
Agua, H ₂ O
Argón, Ar	9340	1.52 x10 ⁷	0.93
Dióxido de carbono, CO ₂	315	5.67 x10 ⁵	0.03
Neón, Ne	18	1.49 x10 ⁴	0.002
Helio, He	5.2	8.50 x10 ²	0.0005
Metano, CH ₄	1.0-1.2	7.20 x10 ²	0.0001
Criptón, Kr	1	3.43 x10 ²	0.0001
Óxido nitroso, N ₂ O	0.5	9.00 x10 ²	0.00005
Hidrogeno, H ₂	0.5	4.10	0.00005
Xenón, Xe	0.08	4.29 x10 ²	0.00001

Tabla 1.1. Composición del aire seco puro (sin incluir partícula) a nivel del mar, partes por millón en volumen (ref. 7)

1.5. Protocolo Kioto y relación con el efecto invernadero

La atmósfera permite que parte de la radiación solar llegue a la Tierra. Ésta refleja hacia el espacio parte de la energía que llega, pero la atmósfera absorbe parte de ésta, alcanzando una temperatura de equilibrio de unos 15 °C. ^[8]

Se entiende por efecto invernadero el cambio climático provocado por un aumento de la temperatura ambiental a consecuencia de una mayor concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera que aumenta la proporción de energía absorbida. ^[9]



- A. Energía absorbida por la Tierra.
- B. Energía calorífica reflejada por la Tierra.
- C. Fracción de energía reflejada devuelta al espacio.
- D. Fracción de energía reflejada absorbida por la atmósfera.

Figura 1.10. Efecto invernadero producido por el CO₂. (ref. 8)



Como puede verse en la figura 1.10, cuanto mayor sea la concentración de CO₂ en la atmósfera, mayor será D en relación a C, con lo que la temperatura de la Tierra aumenta para restablecer el equilibrio. La intensa utilización de los combustibles fósiles es posiblemente la principal causa del efecto invernadero. ^[9]

En la cumbre de Kioto se alcanzó un acuerdo destinado a limitar las emisiones de seis gases de "efecto invernadero, en un porcentaje aproximado de al menos un 5 % en los países industrializados para el período 2008-2012, tomando como referencia para tres de ellos (dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)) en comparación a las emisiones de 1990, y para el resto, principalmente de origen industrial (HFC, PFC y SF₆), el año 1995. ^[9]



CAPÍTULO 2

COMPONENTES DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA

2.1. Freno regenerativo

Inicialmente se definirá el concepto de freno regenerativo, es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es almacenada en unos acumuladores o baterías para un uso posterior. El freno regenerativo en trenes eléctricos alimenta la fuente de energía del mismo. En vehículos de baterías y vehículos híbridos, la energía es almacenada en un banco de baterías o un banco de condensadores para un uso posterior.^[10]

El frenado tradicional, basado en la fricción, se puede usar junto con el regenerativo por las siguientes razones:

- El frenado regenerativo reduce de manera efectiva la velocidad.
- La cantidad de energía a disipar está limitada a la capacidad de absorción de ésta por parte del sistema de energía o el estado de carga de las baterías.^[10]

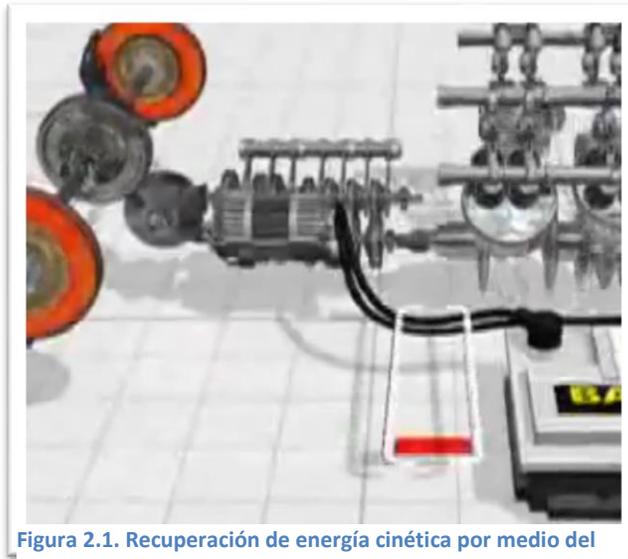


Figura 2.1. Recuperación de energía cinética por medio del freno regenerativo. (ref.9)

El frenado proviene de la disminución de energía cinética y por tanto de la velocidad ($E_c = 1/2 mV^2$) que es el principio básico de conservación de la energía que dice que "la energía no se crea ni se destruye solo se transforma".



2.1.1. Modelo de la máquina eléctrica

La ME es un motor de inducción que opera como motor o generador. Cuando funciona como motor, extrae energía de la batería y el par de salida es para el sistema de tracción, en posible combinación con el MCI (Motor de combustión interna). Funcionando como generador, puede recuperar energía cinética en el frenado regenerativo, o tomar energía proveniente del MCI, para la recarga de baterías.

Por ahora solo interesa la relación entre la potencia mecánica de salida P_{me} y la potencia de la batería P_{bat} , dada por:

$$P_{me} = \eta_{bm}(T_{me}, w_{me})P_{bat} \quad (2.1)$$

Donde la eficiencia η_{bm} es el par y w_{me} la velocidad de la ME, respectivamente

2.1.2 Sistema de engranes planetarios

El acoplamiento entre las fuentes de potencia y la tracción es un sistema de engranes planetarios (SEP). El MCI es acoplado a través de un embrague-freno al engrane solar del SEP, la ME es conectada al engrane anular y las llantas son conectadas al engranaje anular y las llantas son conectadas al porta planetas.

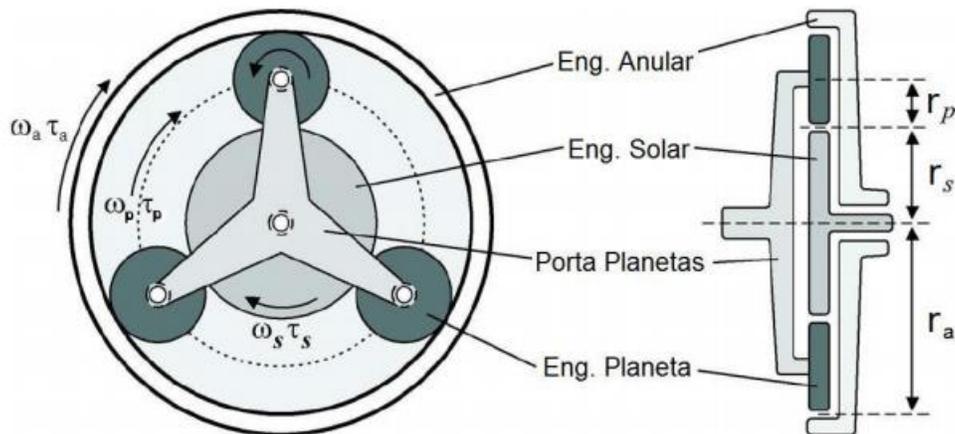


Figura 2.2. Sistema de engranajes planetarios.



Se tiene la relación de engranaje como $k = r_a/r_s$, donde r_a es el radio del engrane solar, r_s el radio del engrane anular. La velocidad angular en el SEP satisface la siguiente ecuación:

$$w_p = \frac{1}{(k+1)} w_s + \frac{k}{(k+1)} w_a \quad (2.2)$$

Donde w_p , w_s y w_a son las velocidades angulares del porta planetas, MCI y ME, respectivamente.

El balance de potencias en el SEP satisface la siguiente ecuación:

$$P_p = T_p w_p = P_{mci} + P_m \quad (2.3)$$

Donde P_p es la potencia del porta planetas, T_p el par del porta planetas; P_{mci} y P_m son las potencias del MCI y de la ME, respectivamente.

2.1.3. Freno tradicional

El freno tradicional es llamado reostático. Estos, a través de la fricción, transforman la energía calorífica que se irradia al aire que refrigera el tambor de frenado. Lo que pasa es que la energía es desperdiciada. La energía que lleva al coche del reposo a una velocidad es la misma que se transforma para detenerlo y que, en estas condiciones, si se conservara al cien por ciento, bastaría para poner el coche a la misma velocidad inicial. ^[11]

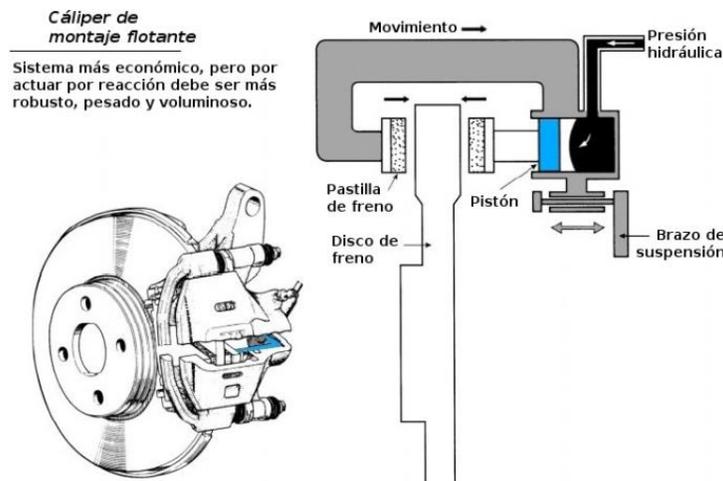


Figura 2.3. Freno de disco. (ref.10)

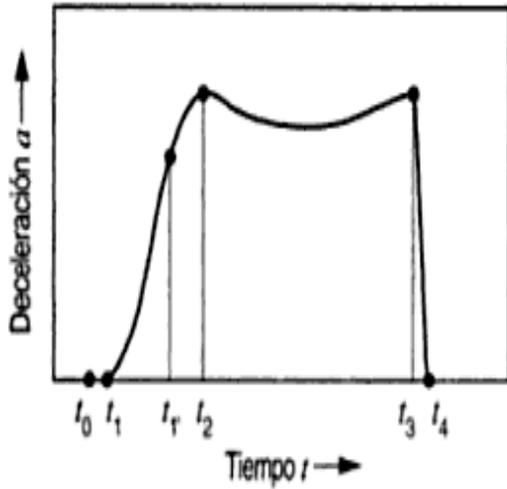


Figura 2.4. Tiempo y desaceleración durante un frenado hasta el estado de reposo del vehículo. (ref.11)

Relación de tiempo	Desaceleración.
Antes de t_0	Tiempo de reacción
t_0	Comienzo del efecto de la fuerza en el dispositivo de accionamiento
t_1	Comienzo de la desaceleración
t_1'	Fin del tiempo umbral
t_2	Desaceleración completamente formada
t_3	Fin de la desaceleración formada
t_4	Fin del frenado
$t_1 - t_0$	Tiempo de respuesta
$t_1' - t_1$	Tiempo umbral
$t_3 - t_2$	Area de la desaceleración total media.
$t_4 - t_1$	Tiempo del efecto frenado
$t_4 - t_0$	Tiempo de frenado

Tabla 2.1. Tiempo contra la descripción de la desaceleración. (ref.11)



2.2. Funcionamiento básico del KERS (Kinetic Energy Recovery System) en la F1

El funcionamiento básico del KERS en la F1 en el 2009 consiste en recuperar la energía que antes se disipaba en forma de calor en las frenadas y almacenarla en unos dispositivos tales como baterías (KERS eléctrico) o un volante de inercia (KERS mecánico). Esa energía almacenada, cuando el piloto de un automóvil de F1 pulsa un botón en el volante, se libera y se transmite directamente a las ruedas a través de la caja de cambios, diferencial y palieres (transmiten el movimiento desde el diferencial a las ruedas motrices), consiguiéndose una potencia extra de unos 58.83 KW durante unos 6.6 segundos por vuelta.^[12]

El sistema para almacenar energía es un volante de inercia, que es un mecanismo que gira alrededor de 100,000 rpm, cada vez más rápido según va almacenando la energía.^[12]

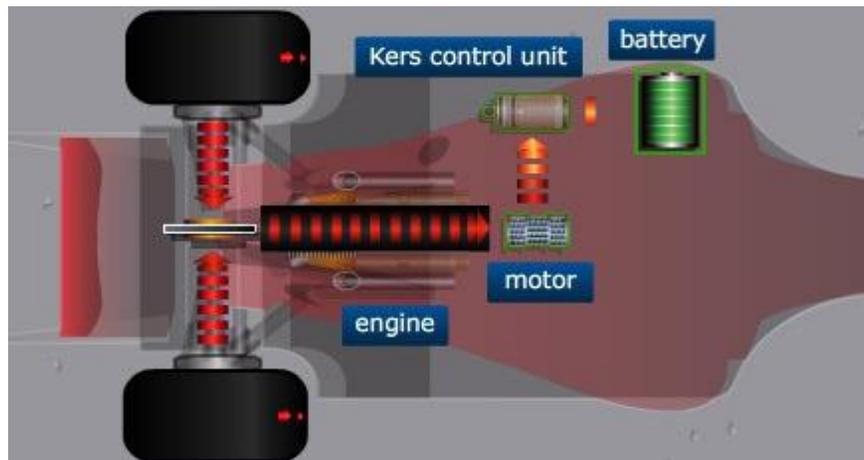


Figura 2.5. La energía cinética se transfiere desde la parte de atrás del eje a través de la caja de cambios y el motor a un motor-generator. Se convierte en energía eléctrica antes de ser almacenada en una batería. (ref.12)

Este sistema por una serie de complicaciones desapareció de la F1 en 2010 ya instaurándose ya en el turismo. El motivo es que este sistema es pesado para este tipo de automóviles de competencia ya que se tiene que hacer una buena distribución de ese peso y seguir conservando la parte aerodinámica y su estabilidad, pero para un automóvil convencional esto no afecta casi nada. Sin embargo desde el 2011 se utiliza de nuevo.^[13]

Enfatizando a este funcionamiento básico del KERS, puede utilizarse de igual manera en automóviles para ciudad de alto y medio rendimiento en el cual la recuperación de energía cinética sea considerable para almacenarse en baterías y así se convierta en una óptima utilización de energía eléctrica.



2.3. División de la tecnología KERS

La tecnología KERS como podemos ver que tiene una serie de conjuntos importantes para el funcionamiento del mismo, pero hay que distinguir como si divide el KERS para entender de una mejor manera como es su funcionamiento.

2.3.1. KERS mecánico

Este mecanismo tuvo un inconveniente en el año 2009 ya que se tenía que situar junto a la transmisión con lo cual su peso, de unos 30 kg aproximadamente, no podía colocarse en el sitio que se quería o en el más adecuado (esto para automóviles de F1), pero para autos híbridos de ciudad esto es una ventaja ya que se tiene más espacio por lo cual hay más posibilidades de ubicación para una buena instalación.

La tecnología KERS mecánico, está avanzando cada vez y se tienen dos principales ventajas, el peso es menor y su rendimiento es mejor al no tener que transformarse esta energía mecánica a eléctrica. ^[14]

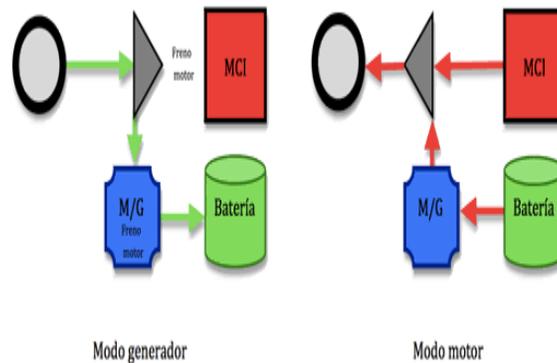


Figura 2.6. Diagrama KERS mecánico. (ref.13)

2.3.2. KERS eléctrico

Consiste en almacenar la energía ya que esta se almacena en baterías. Por este motivo este sistema es mucho menos eficiente ya que primero se transforma la energía de la frenada en energía eléctrica y después cuando se transmite a las ruedas se transforma en energía mecánica.



Figura 2.7. Motor-generador. (ref.14)



La principal diferencia es el peso de las baterías.

Otro aspecto a tener en cuenta es que cuando es transformada la energía y está se almacena genera calor y por consecuencia se requiere una disipación de calor con un sistema de refrigeración eficiente. Para que este no llegue a puntos críticos y pueda ocasionar un incidente. ^[14]

La versión eléctrica convencional se basa en un motor eléctrico de corriente continua que puede funcionar también como dinamo alternador, cuyo rotor gira gracias al movimiento transmitido por la corona cónica a la que está conectado a un piñón de las mismas características.

La ventaja principal de este tipo de KERS es que las baterías pueden situarse en la parte del coche que se crea oportuno y jugar mucho mejor con la distribución de peso del auto y más implementado en automóviles convencionales de ciudad que sean de medio rendimiento.

Función del KERS eléctrico

Tanto el eléctrico (parte que lo convierte en híbrido al sistema) como el convencional están gobernados por una unidad basada en la electrónica de potencia, que bien puede estar integrada en la ECU (unidad de control del motor), o estar alojada como un periférico. Ambos están formados por un motor eléctrico de corriente continua, sólo que en la versión híbrida no actúa como alternador, mientras que en la mecánica sí es capaz.

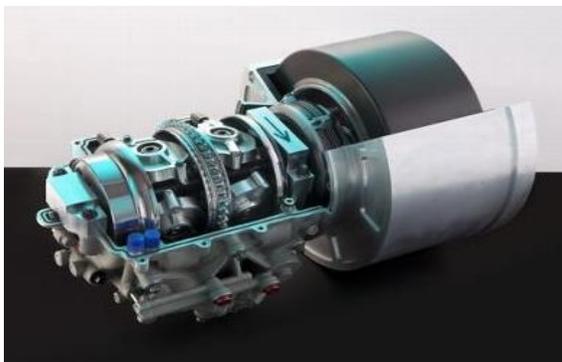


Figura 2.8. El sistema original Flybrid Kinetic Energy recuperación (KERS). (ref.15)

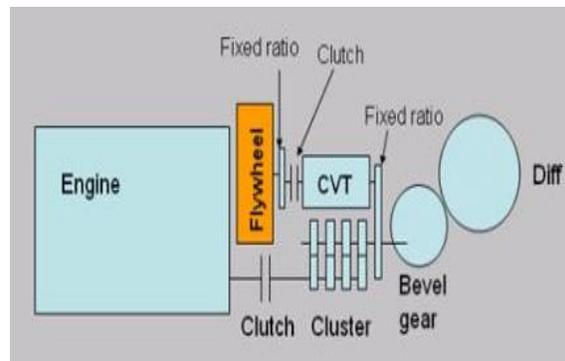


Figura 2.9. Diagrama del sistema original Flybrid. (ref.16)



La principal diferencia, como ya se ha explicado, está en el uso de baterías de ión-litio en el KERS eléctrico frente al almacenamiento de energía cinética en un volante de inercia; característica correspondiente de la versión híbrida.

Carga del KERS eléctrico

Se recupera la energía cinética cuando se frena para transformarla en eléctrica, lo hacemos en forma de corriente alterna, funcionando el KERS en modo de alternador, pero, cuando funciona esta parte en modo motor, necesita corriente continua de las baterías del KERS. Por ello, es necesario hacer una conversión AC/DC (alterna-continua) como cuando se cargan las baterías de ión-litio de nuestros dispositivos móviles que cotidianamente ya usa gran porcentaje de la población.

2.3.3. Electrónica de potencia

La demanda de control de energía eléctrica para los sistemas de impulsión con motores eléctricos y de controles industriales ha existido durante muchos años, y ha conducido al temprano desarrollo del sistema Ward-Leonard para la obtención de voltajes variables de CD con los cuales controlar lo impulsores de motores de CD. La electrónica de potencia ha revolucionado el concepto de control de potencia de conversión de energía y del control de accionamiento de motores eléctricos. ^[15]

En la electrónica de potencia se combinan la potencia, la electrónica y el control. El control tiene que ver con las características de estado estable y dinámicas de sistemas de lazo cerrado. La potencia tiene que ver con el equipo estático y rotatorio para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. La electrónica tiene que ver con los dispositivos y circuitos de estado sólido para el procesamiento de señales que cumplan con los objetivos deseados en el control. Electrónica de potencia se puede definir como las aplicaciones de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica. ^[15]

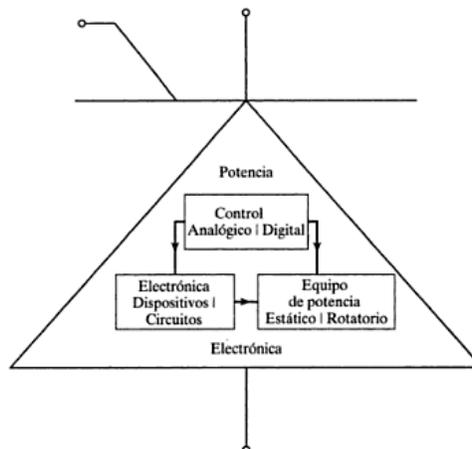


Figura 2.10. Relación entre electrónica de potencia, potencia, electrónica y control. (ref.17)



La electrónica de potencia ya encontró un lugar importante en la tecnología moderna, y se usa ahora en una gran diversidad de productos de gran potencia, como controles de temperatura, de iluminación, sistemas de corriente directa, fuentes de poder. ^[16]

Para los motores y los sistemas de impulsión para vehículos están controlados por la ECU (unidad de control del motor).



Figura 2.11. Unidad de control completa para un auto F1, KCU. (ref.18).

2.4. Partes indispensables del KERS

En esencia el sistema es simple, sólo se necesitan tres componentes principales: el motor-generador que genera la potencia en frenadas y la libera cuando se utiliza el KERS, las baterías para almacenar la energía, y la unidad de control con lo cual se utiliza la electrónica de potencia, que controla todo el proceso. ^[17]

2.4.1. Motor-generador

Montado en la parte delantera del motor, está unido a un engranaje colocado en la parte delantera del cigüeñal. Trabaja en dos modos, uno recuperando energía de las frenadas para convertirla en energía eléctrica que se almacena en las baterías, y otro haciendo lo contrario, devolver la energía de las baterías para funcionar como motor cuando se aprieta el botón del KERS. Por las elevadas revoluciones a las que gira y la gran corriente eléctrica generada y liberada, por lo general los equipos lo refrigeran con agua o aceite. ^[17]



Figura 2.12. Esquema de la conexión del motor-generator. (ref.19)

2.4.2. Baterías

Aunque se han desarrollado volantes de inercia para almacenar la energía, se utilizan baterías eléctricas de ion-litio y/o Níquel-Hidruro metálico. Al ser cargadas y descargadas varias veces se calientan mucho y necesitan sistemas de refrigeración por agua o aceite, incluso con su propia bomba y radiadores. ^[17]

2.4.3. Unidad de control

Esta caja electrónica tiene dos funciones; una, la de invertir y controlar la conmutación de la corriente entre las baterías y el motor-generator, y la otra la de supervisar el estado de las celdas de la batería. Esta última función es fundamental, porque la eficiencia de las baterías se reduce si una de las celdas falla, además de que esa celda puede recalentarse y provocar problemas de seguridad. ^[17]

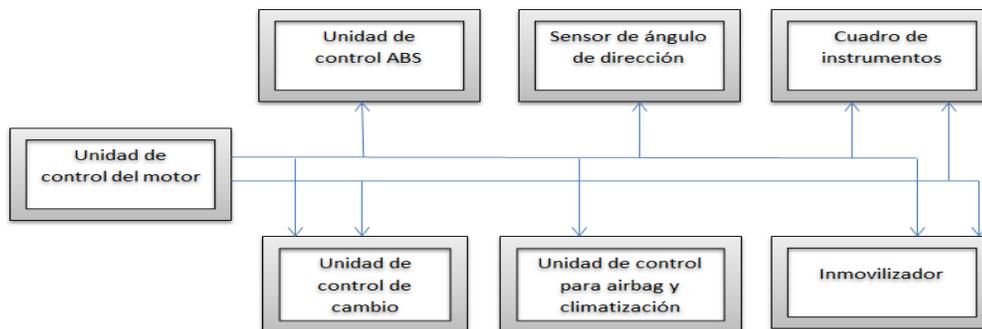


Figura 2.13. Diagrama de bloques de la unidad de control del motor.

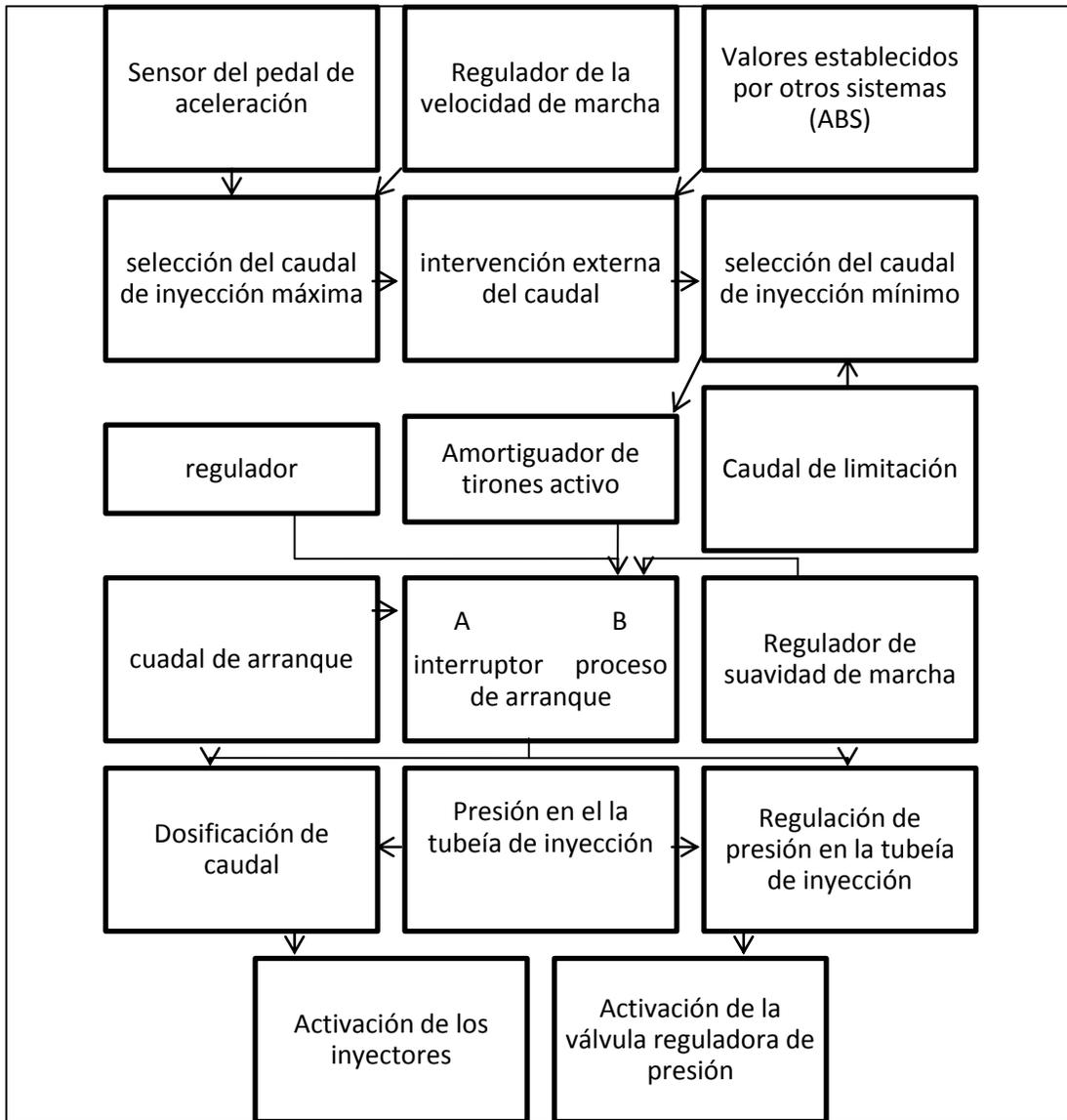


Figura 2.14. Diagrama del funcionamiento de la ECU (unidad de control del motor).



2.5. Recarga regenerativa

Los vehículos tanto eléctricos como híbridos, que se están utilizando en la actualidad y que cada vez se conocen más de estos grandiosos sistemas, se están implementando para que el motor eléctrico funcione durante el frenado como generador de electricidad. De esta forma, gracias a nuestro sistema, la energía cinética que se recupera a partir del frenado del automóvil se convierte en energía eléctrica que se usará posteriormente para recargar las baterías de litio. La energía que se almacena tiene la potencia necesaria para propulsión, que es lo que generalmente hace que el consumo de gasolina sea excesivo, pero también se puede utilizar para el funcionamiento de dispositivos eléctricos del automóvil y así tener un mejor rendimiento del mismo.

2.5.1. Sistemas de baterías de litio

Los sistemas de litio permiten unas densidades de energía de más de 100 W/kg y unas densidades de potencia que superan los 300W/kg en baterías de tracción. Se pueden utilizar a temperaturas ligeramente más altas, y presentan unos elevados valores de tensión de batería de más de 4V. El sistema de ion de litio ya se ha establecido con éxito en el exigente mercado de las baterías de aparatos eléctricos (en este caso los vehículos híbridos).^[18]

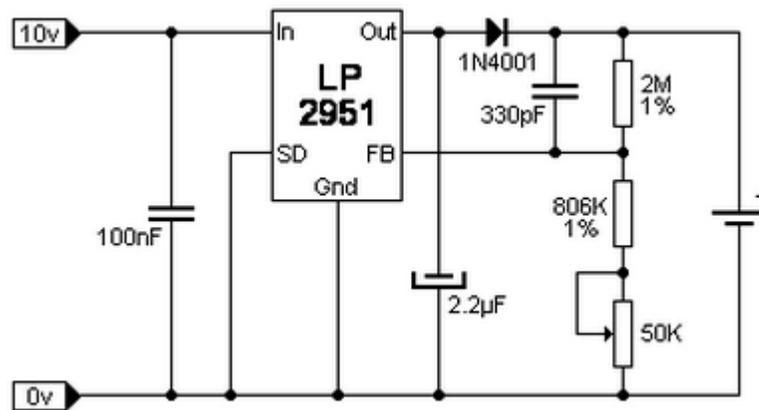


Figura 2.15. Circuito básico de las baterías de ion-litio.

Al contrario que los sistemas de níquel-cadmio, los de litio no presentan el efecto memoria. No obstante, tienen el inconveniente del costo relativamente alto al que se debe hacer frente para la seguridad del sistema. Por ejemplo tiene que supervisarse cada uno de los elementos debido a su falta de capacidad de carga. Asimismo, la batería debe protegerse de una forma especial si se produce un cortocircuito, para impedir que el entorno sufra daños.^[18]



Batería de ion de litio

En las baterías de ion de litio, los iones de litio del electrodo negativo se depositan en una rejilla de grafito siguiendo un progreso reversible eléctricamente. En las baterías convencionales de aparatos eléctricos, el electrodo positivo contiene como parte esencial óxido de cobalto, lo que hace que el sistema sea muy caro. Esta es la razón por la que se intenta utilizar materiales más baratos como, p.ej., el óxido de manganeso o de níquel. Como electrolito se emplea materia orgánica; no se pueden utilizar electrolitos acuosos debido a la tensa reacción química del litio con el agua. ^[18]

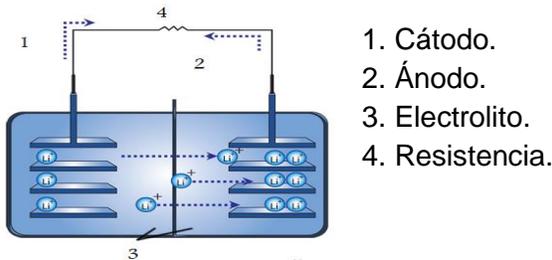


Figura 2.16. Representación esquemática de una batería ion-litio tradicional.

Baterías de Ion-Litio de 24V 180h.	
Tecnología	Fosfato de hierro y litio
Tensión nominal	26.4 V
Capacidad normal	180 Ah
Potencia nominal	4.75 KWh
Peso	55 kg
Potencia/peso	86 Wh/kg
Dimensiones	625 x 195 x 355 mm
Tensión de corte de carga a 0.05C	28.8 V
Tensión de corte de descarga	20 V
Corriente de carga/descarga recomendada	54 A (0.3C)
Corriente máxima de carga (1C)	180 A
Corriente máxima de descarga (1.5)	270 A
Corriente de descarga por pulsación (10s)	1000 A
Cantidad de ciclos 80% DOD (0.3C)	2000 A
Configuraciones de series	Si, hasta 2 o más según se solicite
Configuración paralela	Si, fácilmente hasta 4, mas paralelo si se solicita
Temperatura de trabajo para carga	0-45 °C
Temperatura de trabajo para descarga	-20-55 °C
Temperatura de almacenamiento	-20-45 °C

Tabla 2.2. Relación de trabajo de las baterías de ion-litio (ref.20)



2.5.2. Regeneración de energía con volantes de inercia

Estos sistemas tienen un funcionamiento relativamente simple, se basan en el uso de un volante de inercia, el cual puede ser conectado o desconectado del tren motriz del vehículo cuando es aplicado el embrague.

En el frenado, se conecta el volante a la transmisión, de manera que una parte de la energía cinética del vehículo pueda ser transferida al volante de inercia durante un rango de velocidad, tras lo cual el sistema se desconecta y el volante permanece girando. La energía almacenada así, en el volante, puede emplearse para hacer girar un generador y la energía recuperada emplearse en la propulsión del vehículo o para los dispositivos eléctricos del mismo. En el caso de otro tipo de vehículos, podría obtenerse un arreglo mecánico que permitiera reconectar el volante al tren motriz para que contribuyese a reiniciar la marcha.

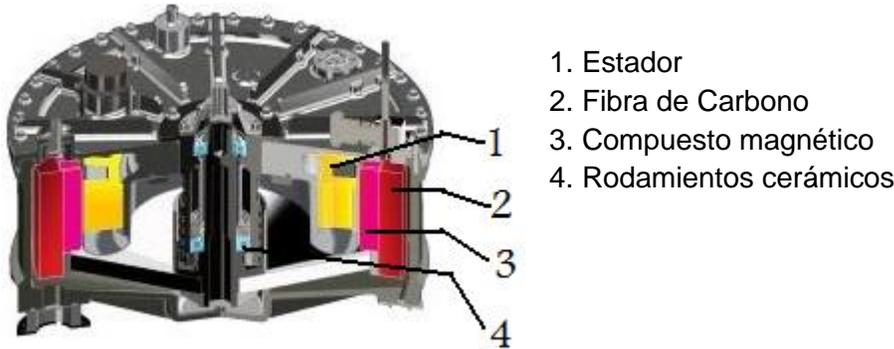


Figura 2.17. Corte del sistema Williams ,Volante de inercia. (ref.21)

Una de las ventajas de este tipo de sistemas es que permiten almacenar considerable energía, incluso durante intervalos cortos de frenado y aceleración, como en el tráfico que se da en México, sobre todo en su mayoría en el Distrito Federal y realmente en la mayoría de las ciudades con sobre población.

2.6. Pérdida de energía cinética

En muchos sistemas mecánicos se producen grandes gastos y graves problemas de funcionamiento por pérdidas y disipación de la energía cinética de que están dotados algunos de sus elementos, sometidos a fuertes cambios de velocidad. ^[19]

Como ejemplo típico de tales sistemas, con disipación de grandes cantidades de energía, en pura pérdida, en caso concreto de vehículos urbanos, en los que se producen gran número de arranques y frenados, lo que siguiendo la práctica actual obliga además a sobredimensionar sus motores y a dotarlos de reguladores de velocidad, a veces complicados, que merman considerablemente su rendimiento efectivo. ^[19]



Recuperador de energía cinética

El dispositivo para la recuperación de energía cinética, además de regular de forma sencilla la velocidad de los automóviles, almacena y más tarde utiliza una parte de la energía cinética entregada por el automóvil en cada frenado y reducir considerablemente la potencia motriz instantánea de nueva generación requerida para el relanzamiento del vehículo tras el precedente frenado; con ello se consigue la descarga del motor del primer esfuerzo de aceleración, permitiendo al vehículo recuperar una parte importante de la velocidad de que antes del frenado estaba animado; lo que se traduce en ahorros de potencia motriz respecto de prestaciones similares con idénticos tiempos de relanzamiento.^[19]

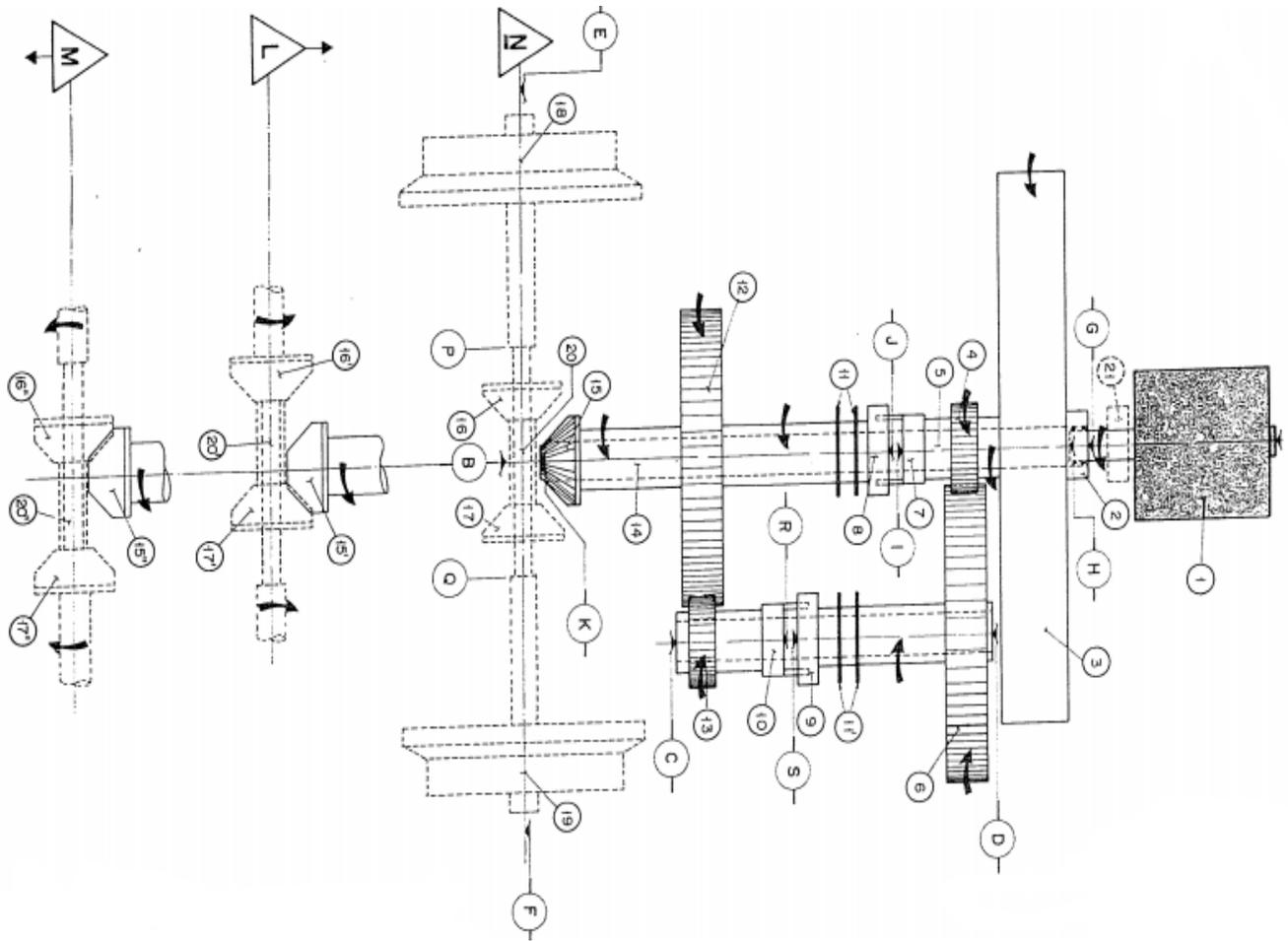


Figura 2.18. Regulador de velocidad con recuperador de velocidad cinética. (ref.22)



Lista de partes del regulador de velocidad con recuperador de velocidad cinética	
A-B Eje motriz (EM)	7-8 Embrague magnético de arranque (A)
A-H EM Tramo motor	9-10 Embrague magnético de frenado (F)
G-I EM Tramo volante	11 Anillos rozantes de excitación
J-K EM Tramo puente	12 Rueda dentada
D-C Eje recuperador (ER)	13 Rueda dentada
D-S ER Tramo volante	14 Árbol puente
R-C ER tramo puente	15 Piñón de ataque
E-F Eje rodante	16-17 Ruedas dentadas
P-Q Topes de 20	18-19 Ruedas de traslación
	20 Carrete deslizante
1 Motor	21 Dinamo (eventual)
2 Función de trinquete	
3 Volante	
4 Rueda dentada	
5 Árbol volante	
6 Rueda dentada	

Tabla 2.3. Partes del regulador de velocidad con recuperador de velocidad cinética. (ref. 22)

2.7. Sistema híbrido

Los sistemas híbridos que como se sabe es una combinación del motor de combustión interna y uno eléctrico, son los sistemas en los que se ha dado un gran desarrollo importante en la actualidad, por su uso específico para el ahorro de gastos energéticos en cuestión del combustible y una parte más importante, para que haya una disminución de contaminantes nocivos para el ambiente como el dióxido de carbono (CO₂).

2.7.1. Clasificación de vehículos híbridos

Los vehículos híbridos que a la par tienen un motor de combustión interna y un motor eléctrico son los únicos sistemas híbridos que han tenido un desarrollo serio. Existen dos tipos básicos de sistema: híbridos en serie e híbridos en paralelo.

Híbridos en serie

Utilizan el motor de combustión interna acoplado al generador, el que produce electricidad para el motor eléctrico que acciona el giro de las ruedas. Es llamado híbrido en serie pues el flujo de energía se mueve en línea directa. Al estar el motor de combustión interna desacoplado de la tracción, es posible que opere a una velocidad constante en una vecindad próxima a su punto óptimo de operación en términos de eficiencia y emisiones, mientras carga la batería. ^[20]



Una desventaja del sistema es que la energía debe ser convertida varias veces, siendo la eficiencia mecánica entre el motor de combustión interna y el eje de tracción difícilmente superior al 55% (esto incluye la eficiencia de almacenamiento de la batería). Otra desventaja es que requiere un motor más grande y pesado que en el sistema en paralelo, lo que nos presenta graves consecuencias en los automóviles de uso particular.^[20]

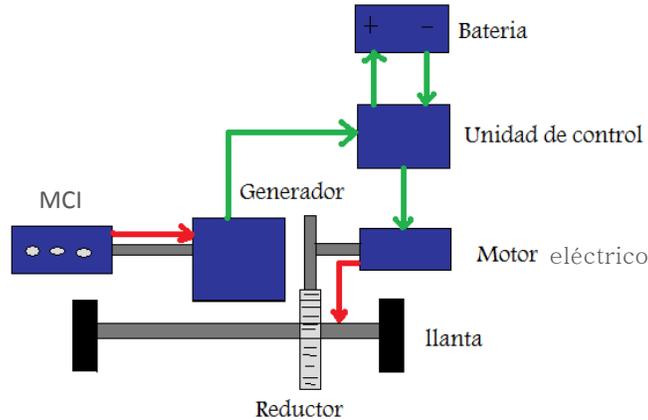


Figura 2.19. Sistema híbrido en serie (en verde parte eléctrica y en rojo parte mecánica).

Híbridos en paralelo

Utilizan tanto el motor de combustión interna como el eléctrico para accionar la tracción, asignando la energía de cada uno de acuerdo a las condiciones de conducción. Es llamado híbrido en paralelo pues la energía fluye en líneas paralelas. En este sistema, el motor de combustión interna puede accionar la tracción al mismo tiempo que carga las baterías. Estos tipos de vehículos son los más populares y sobre los que más se investiga.^[20]

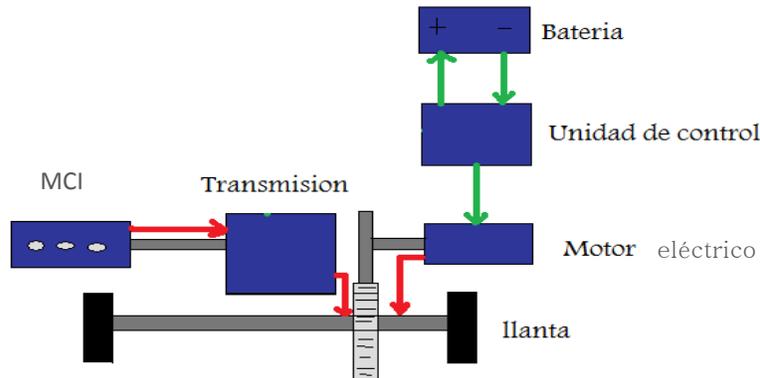


Figura 2.20. Sistema híbrido en paralelo (en verde parte eléctrica y en rojo parte mecánica).



2.7.2 Accionamientos híbridos

En sentido amplio, la denominación "accionamiento híbrido" hace referencia a accionamientos de vehículos con más de una fuente de propulsión. En estos casos, se puede disponer, si es necesario, de varios acumuladores de energía o de convertidores de potencia de diverso tipo. El objetivo del desarrollo es combinar componentes de accionamiento de diferentes clases para que las ventajas de cada uno puedan aprovecharse en los distintos estados de funcionamiento y acaben por prevalecer sobre el elevado costo técnico de los accionamientos híbridos.^[21]

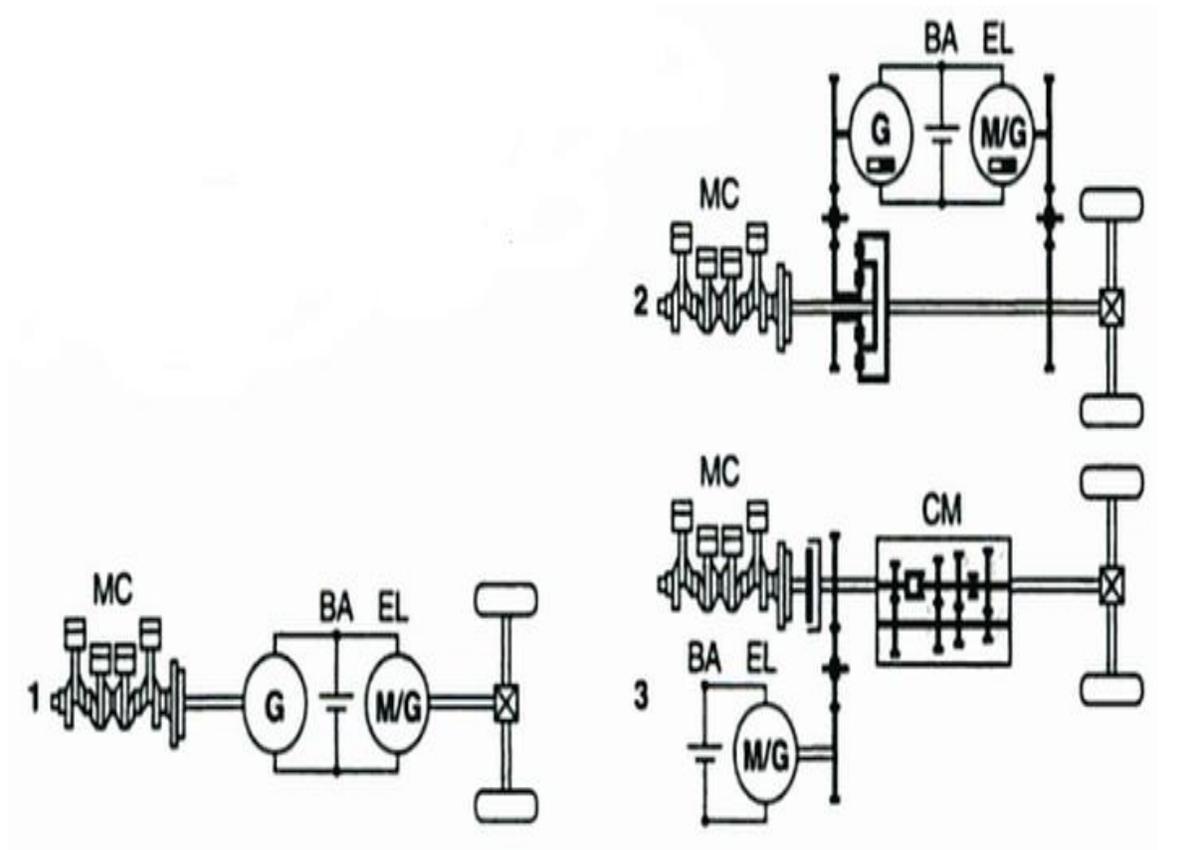


Figura 2.21. Configuración de accionamiento híbrido. (ref. 23)



Híbrido en serie (1)	Mixto (2)	Híbrido en Paralelo (3)
+ El motor de combustión interna está desacoplado mecánicamente del accionamiento.	Ofrece la posibilidad de compensar entre si las ventajas y las desventajas de los dos.	+ Las potencias de salida del motor de combustión interna y del accionamiento se súper ponen.
+ La potencia del motor de combustión interna es independiente de la potencia de accionamiento momentánea		+ El diseño de las dos máquinas propulsoras es adaptable a las exigencias de aplicación.
+ El punto de servicio del motor de combustión interna puede seleccionarse según los criterios de emisiones, consumo, de combustible y ruido.		+ Ayuda a la sincronización del cambio mecánico.
- El motor de tracción debe generar por completo la potencia de accionamiento.		- Presenta limitaciones constructivas debido a la unión mecánica de las dos Máquinas propulsoras.
- La transformación múltiple de energía empeorara el rendimiento		El híbrido en paralelo es un concepto de accionamiento para reducir el consumo de combustible.
El híbrido en serie es un concepto de accionamiento para reducir las emisiones		

Tabla 2.4. Configuración de accionamiento híbrido. (ref. 23)

Accionamientos híbridos con motor de combustión interna

Ningún otro tipo de accionamiento supera el motor de combustión interna como accionamiento para vehículos en materia de potencia ofrecida y autonomía. Los inconvenientes y, con ello, el aliciente para ampliar el motor de combustión interna formando un accionamiento híbrido, se encuentran en el descenso del rendimiento en carga parcial y en funcionamiento no exento de emisiones. En consecuencia, el motor de combustión interna de algunos accionamientos híbridos solamente esta dimensionado para potencias medias de marcha. El acumulador de energía adicional eléctrico o mecánico se encarga de cubrir las diferencias de potencia con respecto a la potencia de marcha necesaria en cada momento.^[22]

Como acumuladores de energía mecánicos, entran en juego los acumuladores de presión o las masas de inercia giratorias. Los acumuladores de presión presentan unas densidades de energía gravimétricas que suelen ser más altas que las de los



acumuladores mecánicos, pero para realizar el intercambio de energía necesitan transformar la energía mecánica y la energía de la presión acumulada. El acumulador de energía mecánico llamado "volante motor", por el contrario, no necesita transformar energía para el intercambio. No obstante, la característica del acumulador requiere una multiplicación modificable gradual para el intercambio de energía. El número de revoluciones del volante motor y la velocidad del vehículo presentan una tendencia contraria, de modo que, p.ej., la velocidad del vehículo aumenta y el número de revoluciones del volante motor disminuye al acelerar el vehículo. La energía solo se puede transmitir si un engranaje con una multiplicación modificable gradualmente puede compensar esta tendencia contrapuesta. Para este engranaje es conveniente a menudo una transmisión de potencia eléctrica, en cuyo caso de cambio de medio va unido al empeoramiento del rendimiento de transmisión típico de un híbrido en serie. ^[22]



CAPÍTULO 3

USO DEL FRENO REGENERATIVO EN AUTOMÓVILES HÍBRIDOS

En este capítulo, se dará a conocer una comparación en cuestión a costos, así como la cantidad de energía que se ahorra en los autos híbridos, a partir del frenado de los mismos. Para esto se obtendrán los datos de comportamiento del consumo energético; condiciones de recarga, si se usa un sistema de alimentación eléctrica y al mismo tiempo la ayuda del freno regenerativo.

Los datos que se estarán utilizando de aquí en adelante serán los de un automóvil híbrido Toyota Prius, actualmente el automóvil que menos CO₂ produce, que se implementa a este la recuperación de energía a causa de las frenadas (Freno regenerativo).

3.1. Análisis comparativo en cuanto a costos de adquisición y combustible

Para establecer la comparativa en cuanto a costos de adquisición y combustible, usaremos como referencias un vehículo tradicional con motor térmico como el Nissan Sentra 2013 de 1.8 litros con 16 válvulas, con motor de gasolina y el Toyota Prius como vehículo híbrido, donde combinado por un motor térmico, uno eléctrico y que con un sistema de recuperación de energía cinética las baterías también pueden ser cargadas por la fuerza de las frenadas (freno regenerativo).

Características vehículo de combustión interna



Potencia de motor mecánico:
129 hp a 6,000 rpm
Desplazamiento: 1.8 L
Combustible: Premium sin plomo
Emisiones de CO₂: 169 g/km
Precio estimado: \$221,900
Rendimiento ciudad: 15.7 km/L
Rendimiento carretera:
23.25 km/L
Rendimiento combinado:
18.39 km/L

Figura 3.1. Sentra 2013. (ref. 24)

Peso: 1298 kg



Características vehículo Híbrido



Motor mecánico, no usa freno regenerativo
Potencia: 100.28 hp a 5,200 rpm
Desplazamiento: 1.8 L
Emisiones de CO₂: 99 g/km
Precio estimado: \$456,400

Figura 3.2. Toyota Prius Híbrido 2013. (ref. 25)

Motor eléctrico (modo híbrido)

Potencia: 81.04 hp a 13,500 rpm
En el generador
Voltaje máximo: 650 V AC trifásica
Potencia máxima generada: 56 hp
En modo híbrido tiene un consumo medio de 3.7 L cada 100 km

Batería híbrida

Voltaje: 201.6 V DC
Numero de módulos: 28 de 6 celdas cada uno
Capacidad (kW-h): 4.4
Potencia máxima: 36 hp
Rendimiento ciudad: 25 km/L
Rendimiento carretero: 20.40 km/L
Rendimiento combinado: 22.70 km/L
Autonomía: Funcionando solo motor eléctrico, conservando velocidad de crucero de 50 km/h.

El gasto anual estimado de combustible se calcula considerando 15,000 kilómetros recorridos al año en condiciones de manejo en ciudad, considerando combustible de tipo PREMIUM a un precio promedio de \$12.03 pesos por litro (precio referido al 2013/06/01).



La emisión anual estimada de CO₂ se calcula considerando 15,000 kilómetros recorridos al año.

Ambos vehículos, tanto el Sentra como el Toyota Prius, sus características de emisiones contaminantes cumplen al menos con la norma NOM-042-SEMARNAT-2003 publicada en el DOF el 7 de septiembre de 2005.^[23]

En este caso el Toyota Prius está por más de lo normal, situándolo con una calificación de más de 9 de un total de 10.

Cálculo de costos para Nissan Sentra 2013

Para fines de cálculo, se mantienen fijos los valores tanto de la gasolina como de la electricidad durante todo el intervalo.

Las fórmulas que se emplean para el cálculo del costo de uso del vehículo de gasolina son las siguientes:

$$Ct = D \cdot Cm \quad (1)$$

$$Cc = Ct \cdot Pc \quad (2)$$

Dónde:

Ct Consumo total de combustible anual, en litros (l)

D Distancia recorrida anualmente, en kilómetros (km)

Cm Consumo medio ponderado, en litros/100 kilómetros (l/100km)

Cc Costo total de combustible consumido anualmente, en pesos (\$)

Pc Precio del litro de combustible, en pesos (\$/l)

Para los parámetros fijados en la tabla 3.1, los resultados que se obtienen se muestran en la tabla 3.2:

Tiempo de uso	10 años
Kilómetros anuales recorridos	5,000-10,000-15,000-20,000-25,000
Precio litro gasolina Premium	\$12.03
Consumo ponderado	7.25 L/100 km

Tabla 3.1. Datos de cálculo para la comparativa, Nissan Sentra 2013.

D (km)	Ct (litros)	Cc (\$)
5000	362.5	4,360.87
10000	725	8,721.75
15000	1,087.5	13,082.62
20000	1,450	17,443.5
25000	1,812.5	21,804.37

Tabla 3.2. Resultados del Nissan Sentra 2013.



Cálculo de costos para Toyota Prius Híbrido 2013

Las fórmulas de cálculo para el vehículo híbrido, considerando los parámetros mostrados en la tabla 3.3, son las siguientes:

Parte mecánica

$$C_t = D \cdot C_m \quad (3)$$

$$C_c = C_t \cdot P_c \quad (4)$$

Parte eléctrica.

$$E_t = D \cdot C_b \quad (5)$$

$$C_b = (C_{bat} / A) \cdot 100 \quad (6)$$

$$C_e = E_t \cdot P_e \quad (7)$$

Donde:

E_t Consumo eléctrico anual (suponiendo la alimentación por red eléctrica), en kilowattios hora (kWh)

D Distancia recorrida en un año, en kilómetros (km)

C_b Consumo eléctrico de la batería cada 100 kilómetros, en kWh/km

C_{bat} Energía acumulada en la batería, en kilowatts (kWh)

C_e Costo de la energía consumida, en pesos (\$)

P_e Precio de la energía, en pesos/kilowatts hora (\$/kWh)

A Autonomía en kilómetros, (km)

Vehículo híbrido	
Parte mecánica	
Tiempo de uso	10 años
Kilómetros anuales recorridos	5,000-10,000-15,000-20,000-25,000
Precio litro gasolina Premium	\$12.03
Consumo ponderado	3.7 L/100 km
Parte eléctrica	
Precio kWh	1.422 (dado por CFE) si se cargara
Autonomía vehículo	25 km
Capacidad batería	4.4 kWh

Tabla 3.3. Datos de cálculo para la comparativa, Toyota Prius 2013.



Para el vehículo objeto de análisis, el coeficiente C_b tiene un valor de 17.6 kWh/100 km. En la tabla 3.4, según este valor y los reflejados en la tabla 3.3, se obtiene:

Vehículo híbrido		
Parte mecánica		
D (km)	Ct (litros)	Cc (\$)
5000	185	2,225.55
10000	370	4,451.10
15000	555	6,676.65
20000	740	8,902.2
25000	925	11,127.75
Parte eléctrica		
D (km)	Et (kW/h)	Ce (\$)
5000	880	1,251.36
10000	1,760	2,502.72
15000	2,640	3,754.08
20000	3,520	5,005.44
25000	4,400	6,256.80

Tabla 3.4. Resultados del Toyota Prius 2013.

En la tabla 3.5, se muestra la comparativa del precio del combustible gastado en cada una de las opciones planteadas:

Distancia anual recorrida (km)	Costo combustible vehículo térmico (\$)	Costo combustible vehículo híbrido (\$)	Costo electricidad vehículo híbrido (\$)	Total costos vehículo híbrido	Diferencia entre costos (\$)
5000	4,244.87	2,225.55	1,251.36	3,476.91	767.96
10000	8,489.75	4,451.10	2,502.72	6,963.82	1,525.93
15000	12,734.62	6,676.65	3,754.08	10,430.73	2,303.89
20000	16,979.5	8,902.2	5,005.44	13,907.64	3,071.86
25000	21,224.37	11,127.75	6,256.80	17,384.55	3,839.82

Tabla 3.5. Comparación de costos combustible-electricidad según kilometrajes.

Las diferencias serán mayores a favor del vehículo híbrido, gracias a la recuperación de energía cinética a causa de las frenadas, que es el sistema que se implementa y que se analiza para este automóvil. Por esto la autonomía es casi el doble, con la energía eléctrica de la red, junto con la energía del freno regenerativo que es 100 % gratis. Y por esta combinación los costos se reducen considerablemente, ayudando al usuario a pagar mucho menos por electricidad y combustible.

El Gasto Anual Estimado considerado en México es de 15,000 kilómetros recorridos al año en condiciones de manejo en ciudad. Por esto podemos deducir, con nuestros cálculos de costos para el automóvil Toyota Prius es considerablemente bueno, ya que comparándolo con un auto de uso normal (Sentra), nos favorece un ahorro de hasta un 18.09 % (sin contar la recarga regenerativa).



Entonces para que se obtenga mayor autonomía, este sistema híbrido tiene la capacidad de combinarse, tanto aprovechando la energía cinética causada por las frenadas, como la carga de este por medio de la red eléctrica.

3.2. Condicionantes de la recarga de un automóvil híbrido

El automóvil híbrido es una realidad contundente en todos los sentidos para así posibilitar su desarrollo e implantación masiva, de aquí, una vez tratando su otro punto clave como son las baterías cargadas por medio del freno regenerativo, hay que responder a las siguientes cuestiones que se plantean.

- Opciones de recarga
- Tiempo de recarga

La solución a estos interrogantes supone el núcleo de la cuestión a tratar en este trabajo, por lo que procedemos a profundizar en los factores que influyen a cada una de ellas. Esto para tener una mejor visión de la importancia de la regeneración de energía y poder abundar de mejor manera el tema del “**Freno regenerativo en automóviles híbridos**”.

Tiempos de carga (conexión doméstica)	
0-100% aprox. 1.5 horas, 230 V	0-80% aprox. 1.2 horas, 230 V
Autonomía modo eléctrico	
Entre 25-40 km según el tipo de uso, con o sin recarga de red eléctrica	
Baterías	
Ion-Litio	
Motor	
Potencia 80 hp, en el generador 650V trifásica	

Tabla 3.6. Datos característicos del Toyota Prius. (ref.26)

Opciones de recarga

Las opciones que están actualmente para el Toyota Prius, está el cambio completo de la batería. Por otro la recarga mediante conexión a la red y el último más importante en este estudio, es el de la recarga regenerativa. En México, inicialmente lo que se quiere dar a conocer es el tercer modo, ya que en tanto no se disponga de una red suficiente de estaciones de recarga, el uso de estos vehículos va a ser eminentemente un problema para enchufarlo y con ayuda del tercer modo esa energía que se requiere podrá obtenerse cuando no se tenga la posibilidad de enchufarlo.



Tiempo de recarga

Evidentemente, para este tipo de automóvil se tiene una carga rápida de 1.5 h, es viable de efectuar en un punto de conexión doméstico, pero no en un punto de conexión urbano, ya que no se dispone del tiempo necesario a causa de una vida agitada en la ciudad, por esta situación se tiene la ayuda del freno regenerativo .

Aplicando distintas potencias de recarga nos quedan los siguientes valores, con la fórmula de cálculo que se describe:

$$P = V \cdot I \quad (8)$$

P Potencia eléctrica desarrollada, en watts (W)

V Valor instantáneo de tensión, en volts (V)

I Valor instantáneo de la corriente, en ampere (A)

Para recargar una batería de 30 kWh, con una tensión doméstica de 220 V, precisaría una potencia de recarga de 60 kW, lo que generaría una corriente de 272 A.

Para un valor de potencia de 5 kW, aplicando la misma tensión eléctrica, obtendríamos un valor de 22 ampere.

Para una potencia de 3 kW, con la tensión ya mencionada, el valor de la corriente sería de 13 ampere.

Para una potencia de 1 kW, con la tensión ya mencionada, el valor de la corriente sería de 4.54 ampere.

Tensión (V)	Potencia recarga (kW)	Corriente (A)
220	60	272
220	5	22
220	3	13
220	1	4.54

Tabla 3.7. “Tabla de resultados para recargas con tensión 220 V”.



3.3. Especificación de la Batería de ion-litio, utilizada en el automóvil a estudio

Es la tecnología más usada para automóviles híbridos, pues las ventajas a otras baterías son importantes.

La batería de ion-litio es más ligera, almacena más carga y la retiene por más tiempo que la de níquel del mismo tamaño. Incluye obligatoriamente un circuito electrónico de gestión de la batería que evita que las celdas se carguen o descarguen por encima o por debajo de los límites recomendados. Aun haciendo uso del circuito de protección, que consume una pequeña parte de su energía.^[24]



Figura 3.3. Batería de Ion-Litio para Toyota Prius. (ref. 27)

El problema más significativo que se tiene en este sistema es la sensibilidad a las temperaturas extremas (tanto frío como calor), su capacidad disminuye de forma clara según las condiciones ambientales que presente en el automóvil, por lo que tiene un sistema de refrigeración.

Da mayor autonomía en el Toyota Prius y un excelente rendimiento a este. Este tipo de baterías se caracterizan por tener un mantenimiento reducido, algo que ningún otro químico puede ofrecer por el momento. Carece de efecto memoria y además de la alta densidad de energía y su peso reducido, la auto descarga que sufren es menor que las baterías de NiCd y NiMH, por debajo del 10% mensual, por lo que es la mejor opción para este tipo de vehículos.

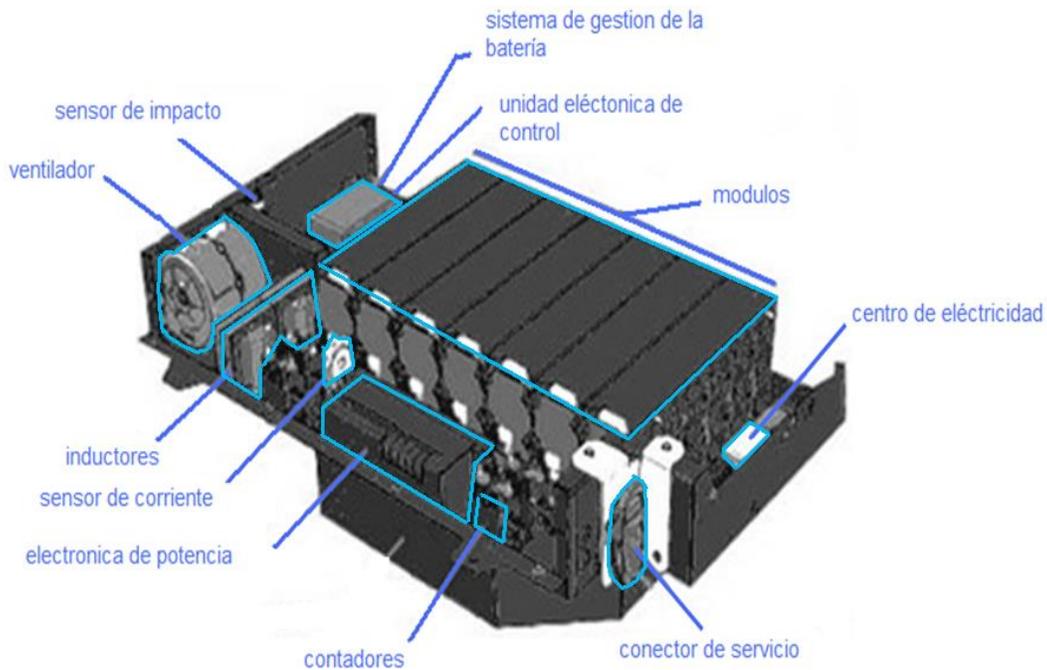


Figura.3.4. Descripción de las partes de la batería de ion-litio.

3.4. Descripción del sistema de freno regenerativo del automóvil híbrido a considerar

El vehículo híbrido Toyota Prius, es un automóvil con capacidad de 5 ocupantes y peso de 1495 kg, sin carga. Es propulsado por un motor de combustión interna limitado por gasolina Premium, un motor eléctrico de corriente alterna que se alimenta de una batería de ion-litio con una capacidad útil de 4.4 kWh.



Figura.3.5. Automóvil híbrido Toyota Prius.



Para que este automóvil funcione, se tiene un motor eléctrico, que es el que actúa a bajas velocidades (no más de 50 km/h) y más cuando no se necesita un rendimiento mecánico. El motor de combustión interna, entra en funcionamiento cuando se alcanza una velocidad superior a los 50 km/h o ya sea que se solicite más potencia. Esto es de manera automática y es algo que no se percibe, para esto se tiene un monitor donde le dice a los ocupantes cuánta carga tiene la batería, los tránsitos de energía térmica y la recuperación de energía cinética que se tiene.

Lo más importante que se tiene es la recuperación de energía cinética, por lo cual se tiene mucha ventaja, ya que no necesita alimentación externa si no hay donde conectarlo, por lo que con la fuerza de las frenadas y el motor de detonación con un motor térmico funcionando con un ciclo Atkinson.

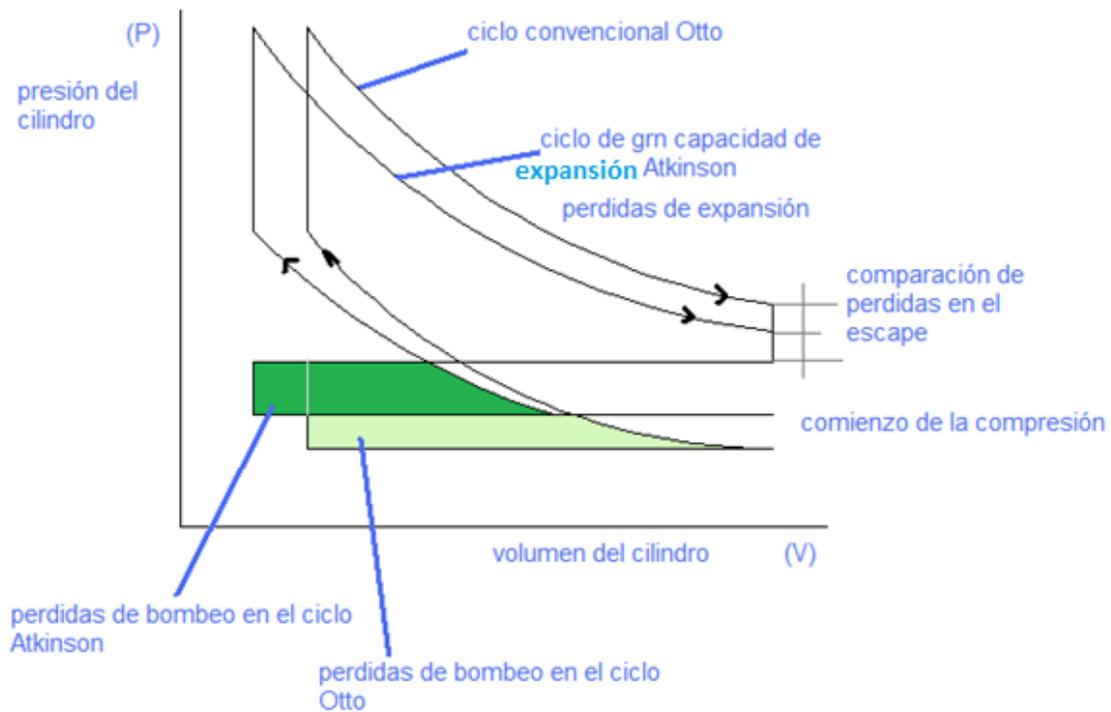


Figura 3.6. Comparación del ciclo Atkinson con el Otto.



El Toyota Prius tiene un motor eléctrico permanentemente engranado al diferencial de la transmisión.

Para moverse, entra en función el motor eléctrico que es impulsado por el generador o la batería. El motor térmico nunca lo mueve directamente; su fuerza se aprovecha para mover a un generador eléctrico o para mover mecánicamente al motor eléctrico.

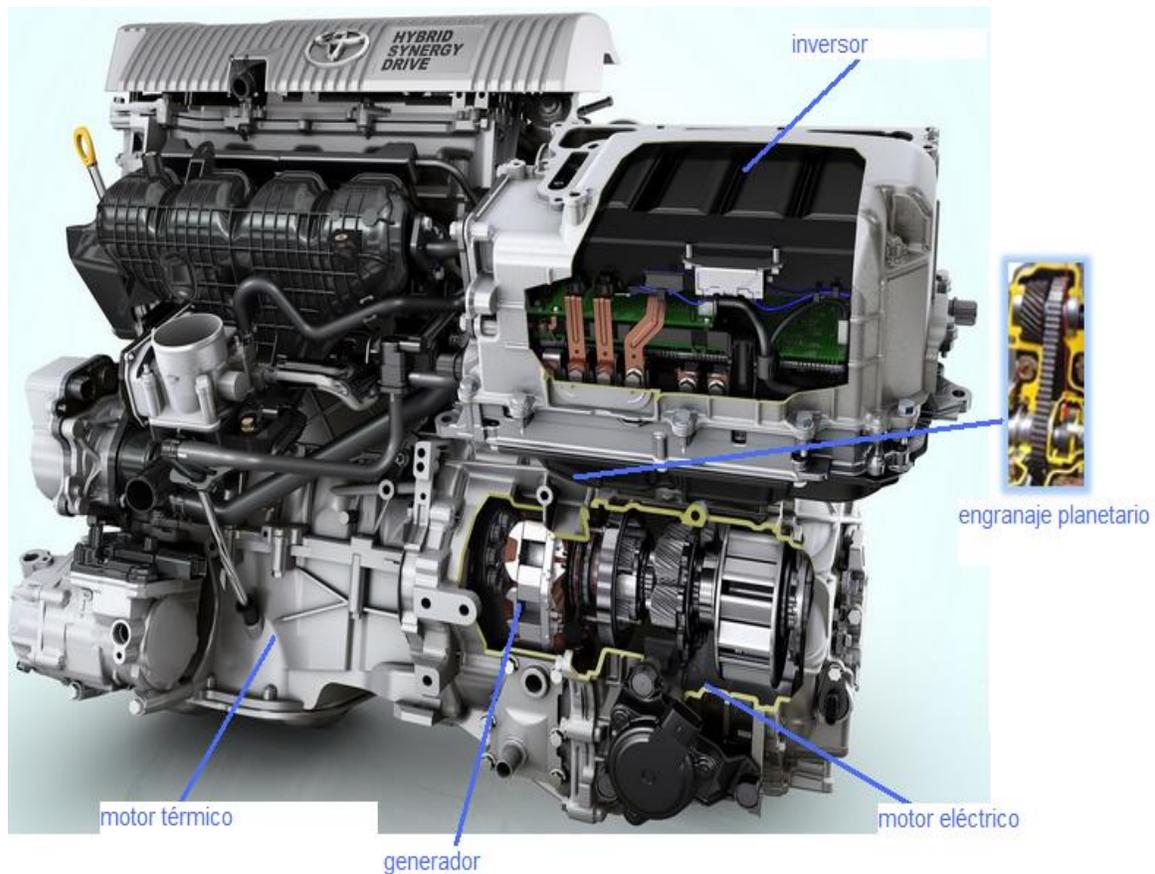


Figura 3.7. Motor Híbrido Toyota Prius. (ref.28)

Los componentes del sistema de freno regenerativo se encuentran instalados en la parte baja del motor, compuesto por un engranaje planetario, un generador y un motor eléctrico.



3.4.1. Función del freno regenerativo

Este freno regenerativo está diseñado y construido para almacenar gran parte de la energía cinética que se pierde con el uso de los frenos de disipación como los conocemos, que son simplemente para disminuir la aceleración del vehículo o pararlo en su totalidad.

La energía que se almacena a causa del freno regenerativo se utiliza para ayudar al motor eléctrico durante el arranque del automóvil y así se reduce la magnitud de la corriente eléctrica que se necesita de las baterías durante este proceso, por lo cual es posible prolongar los ciclos de carga- descarga si no hay manera de enchufarlo o simplemente para ahorrar energía de la red eléctrica, para así pagar menos y que aumente la vida útil de dicha batería.

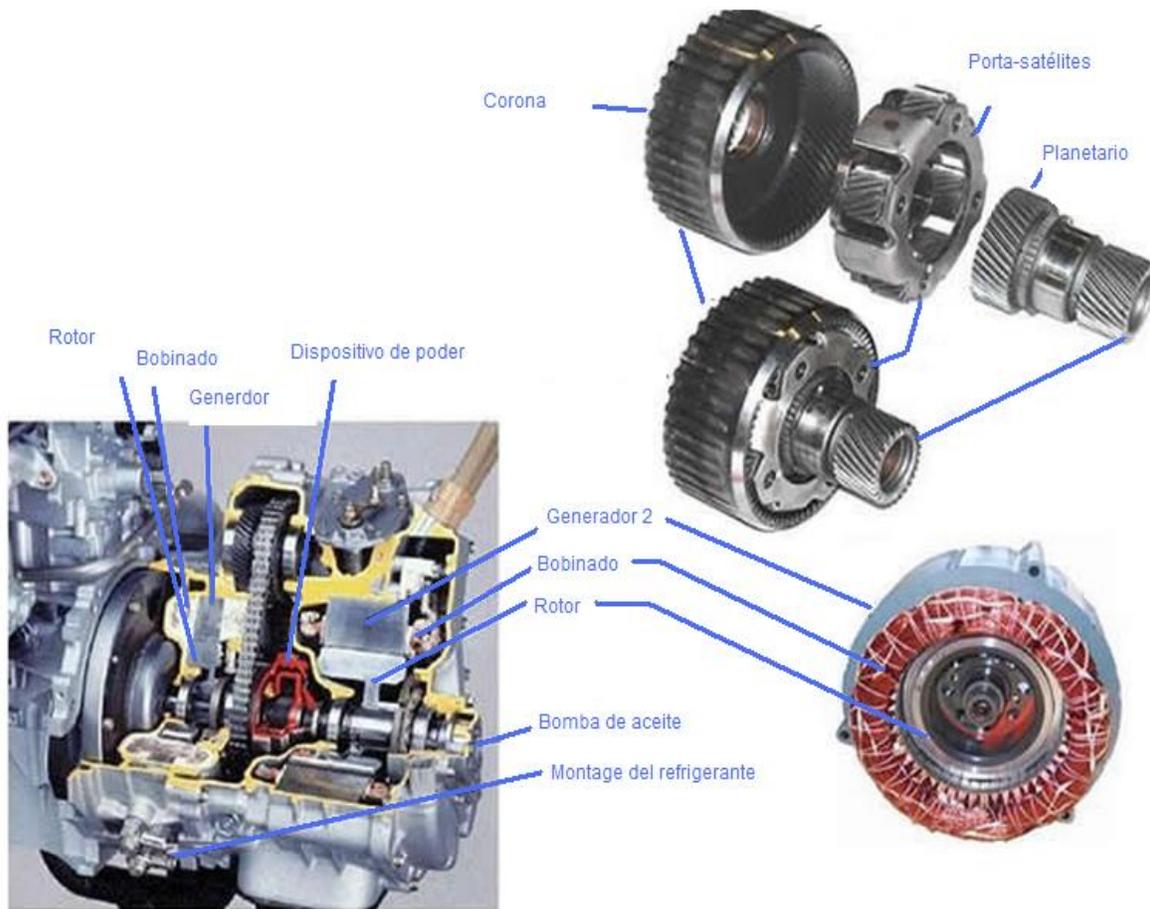


Figura 3.8. Explosión del Generador eléctrico. (ref. 28)



Es importante decir que el sistema almacena la mayor cantidad de energía cinética del automóvil, durante el frenado provee la cantidad de energía necesaria para cargar la batería. Tiene pérdidas en los mecanismos, pero esto no implica que no sea un sistema que no esté suficientemente especializado para un buen desempeño.

La energía que suministra el generador no depende sólo de su giro. El sistema puede variar o eliminar completamente el par resistente del generador para adecuar la energía que genera a cada condición de funcionamiento.

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

En el funcionamiento del vehículo híbrido, el sistema de freno regenerativo opera en tres etapas, son descritas a continuación:

Etapas de frenado

La capacidad de frenado del sistema depende totalmente de la presión del ABS existente en su sistema, por lo que, cuanta más presión exista dentro del mencionado sistema, mayor será también el par de frenado, sólo deberá operar cuando la demanda de frenado supere a la capacidad del sistema regenerativo, así convierte la energía cinética en electricidad. El resto del par necesario para reducir la velocidad deberá ser suministrado por el sistema de frenos convencional. Si la demanda de frenado es mayor que la capacidad del sistema, entonces el sistema libera esta energía, como se muestra en el diagrama (fig. 3.10). En el Prius, este sistema permite ahorrar un litro de combustible cada cien kilómetros gracias a la electricidad generada.



Figura 3.9. Sistema ABS en rueda delantera.
(ref.29)

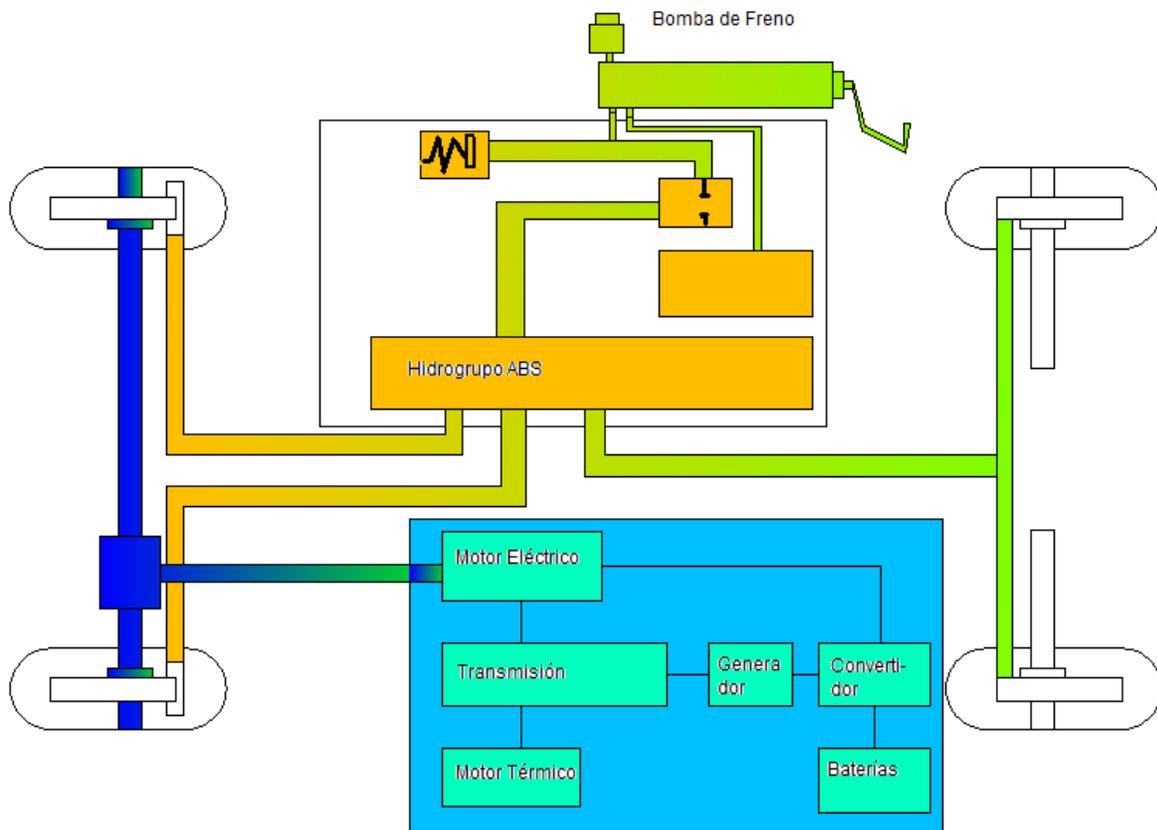


Figura 3.10. Diagrama del freno regenerativo.

Etapa de motor

El sistema correlaciona la presión existente dentro del sistema ABS con su capacidad de aceleración. Así cuando la aceleración demandada es mayor que la disponible, entonces el sistema actúa. La generación de presión obliga al aceite a salir del mismo y entonces circula a través de la bomba impulsándola, con lo que la energía potencial del aceite comprimido se convierte en energía cinética que entonces se transfiere al tren motriz del vehículo (fig. 3.10).

Es importante señalar que el sistema opera como asistencia del motor eléctrico y no independientemente de él.



Etapa neutral

La operación del sistema deberá ocurrir automáticamente al apretar los pedales de frenos o del acelerador y para ello se cuenta con un controlador. Así mismo, los parámetros que se miden para que el sistema opere o no, son la presión en la bomba, la presión en el pedal de frenos y la demanda de aceleración.

3.5. Pasos de una aceleración y una deceleración del automóvil con freno regenerativo

El sistema está controlado por una central de mando que distribuye la fuerza de cada elemento, de acuerdo con la fuerza que sea necesaria en cada momento y con el nivel de carga que tenga la batería.

Aceleración	Descripción
1. Puesta en marcha	Solo funciona el motor eléctrico, alimentado por la batería (si la aceleración es suave)
2. Conducción normal	Funciona el motor térmico que arrastra al motor eléctrico que a su vez mueve las ruedas
3. Aceleración fuerte	Funciona el motor térmico, además también funciona el motor eléctrico para dar el suplemento de energía.
4. Desaceleración	El motor eléctrico hace de generador y recarga la batería. El motor térmico puede estar parado, o girando sin consumir gasolina (para retener mas).
5. Parada	El motor eléctrico y el motor térmico están parados.

Tabla 3.8. Descripción de los pasos para la aceleración del motor eléctrico.

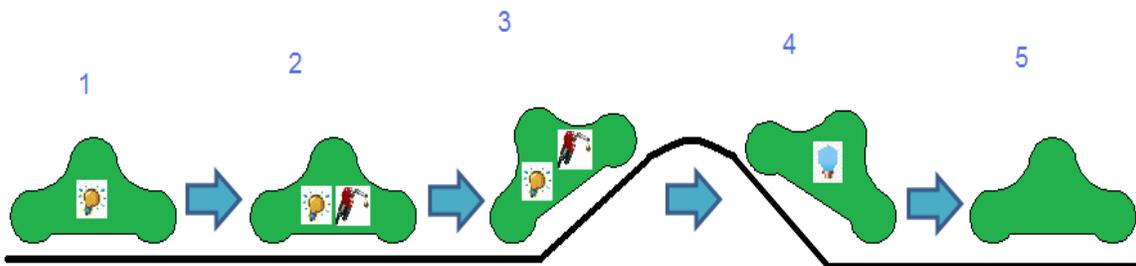


Figura 3.11. Visualización de la aceleración.



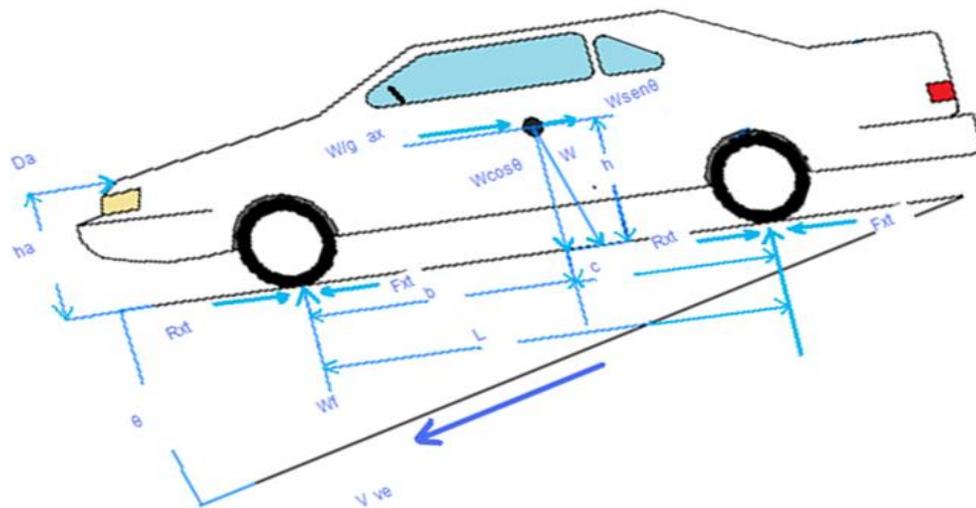
CAPÍTULO 4

ANÁLISIS PARA REGENERACIÓN DE ENERGÍA

En este capítulo, se hará el análisis matemático para obtener todas las condicionantes de la recuperación de energía; estudiar métodos que ayuden a determinar cuanta energía es capaz de regenerar un auto y factores que inciden en la regeneración, así como curvas de comportamiento.

4.1. Sistema mecánico del automóvil para la obtención de la energía cinética

Para estudio se tiene la velocidad angular (W_v) del volante de inercia de un vehículo, se necesita que la velocidad tangencial (V_v) del volante sea igual a la velocidad (V_{ve}) a la que se desplaza el vehículo a analizar (Toyota Prius).



Dónde.

- a_x Aceleración lineal.
- H Altura del suelo al centro de gravedad del vehículo.
- C Distancia entre la rueda A y el centro de gravedad del vehículo.
- b Distancia entre la rueda B y el centro de gravedad del vehículo.
- L Distancia entre las ruedas.
- F_x Fuerza de tracción en las llantas.
- W_f Fuerza normal
- θ Pendiente de la trayectoria
- W Peso del vehículo
- r_v Radio del volante de inercia.



- R_x Resistencia al rodamiento.
- D_a Resistencia aerodinámica.
- V_{v_e} Velocidad del vehículo.

Cálculo de volumen, densidad del material, masa e inercia del volante.

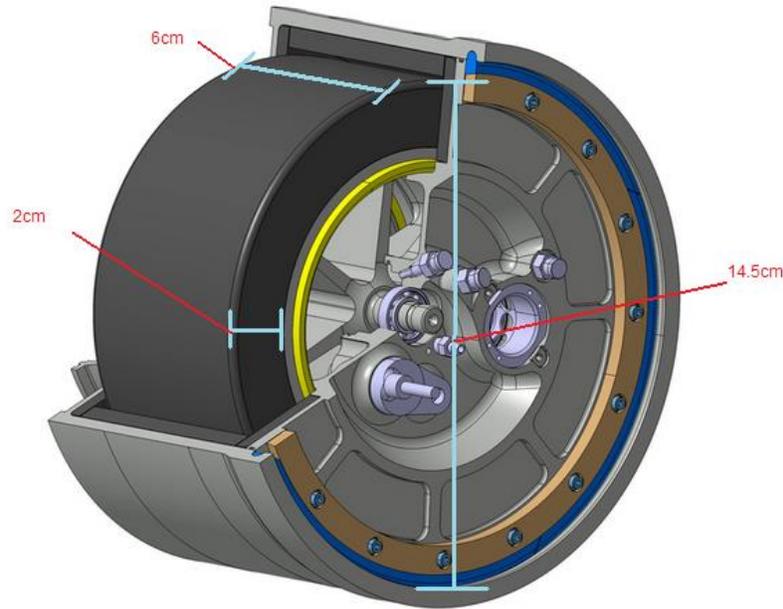


Figura 4.2. Volante de inercia del generador del Toyota Prius. (ref.30)

Área total:

$$A = \pi r_e^2 - \pi r_i^2 = (0.0725m)^2 - (0.0625m)^2 = 0.00135m^2 \quad (4.1)$$

Volumen total.

$$V = Axh = (0.00135m^2)(0.06m) = 0.000081m^3 \quad (4.2)$$

Densidad del volante de inercia.

$$\delta = \frac{m}{v} = \frac{6kg}{0.000081m^3} = 74074.07 \frac{kg}{m^3} \quad (4.3)$$

Cálculo de inercia.

$$I = \frac{m}{2}(r_1^2 + r_2^2) = \left(\frac{6kg}{2}\right) [(0.0725m)^2 + (0.0625m)^2] = -0.029kg.m^2 \quad (4.4)$$

Energía cinética causada por el volante de inercia.



Considerando el vehículo híbrido Toyota Prius que alcanza una velocidad de $V_{ve}=180\text{Km/hr}= 50.039 \text{ m/seg}$ donde se hace un análisis con el vehículo híbrido, donde el radio del volante de inercia es $r_v=0.0475\text{m}$, entonces la velocidad angular (W_v) del volante se define como:

$$V_{ve} = W_v r_v \therefore W_v = \frac{V_v}{r_v} \quad [25] \quad (4.5)$$

$$W_v = \frac{V_v}{r_v} = \frac{50.039 \text{ m/seg}}{0.0725\text{m}} = 690.19 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} = 6590.82 \text{ rpm} \quad (4.6)$$

Para conocer la energía cinética (E_c) almacenada en la parte mecánica a una cierta velocidad angular (ω_v) tenemos que:

$$E_c = \frac{1}{2} J_T W_v^2 \quad (4.7)$$

Donde $J_T = J + J_0 + J_1$ representa la suma de las inercias del rotor del Motor de Inducción (J), el volante de inercia (J_0) y el disco de freno (J_1), entonces sustituyendo valores de la tabla 4.1. en la ecuación 4.7:

Parámetros de medición	
Variabes	Valor de la variable
Inercia del motor	$J = 0.0015 \text{ (Kg)(m}^2\text{)}$
Inercia del volante	$J_0 = 0.029 \text{ (Kg)(m}^2\text{)}$
Inercia del disco de freno	$J_1 = J_0/1000 \text{ (Kg)(m}^2\text{)}$

Tabla 4.1. Parámetros para el cálculo d la energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2} J_T W_v^2 = \frac{1}{2} (0.0305) \left(690.19^2 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) = 7264.52 \text{ J} \quad (4.8)$$

Por esto con la inercia total J_T se deduce que es la inercia del vehículo híbrido Toyota Prius que se tiene a partir del volante de inercia. En la propulsión la inercia a considerar es J_T , y en el proceso de regeneración, la energía que se busca recuperar es la energía cinética que se almacén en J_T .

Energía cinética a diferentes velocidades		
Velocidad (rad/seg)	Energía cinética (J)	
1.	12.50	453.30
2.	25.01	1814.71
3.	37.52	4084.20
4.	50.039	7264.52

Tabla 4.2. Parámetros para el cálculo d la energía cinética.

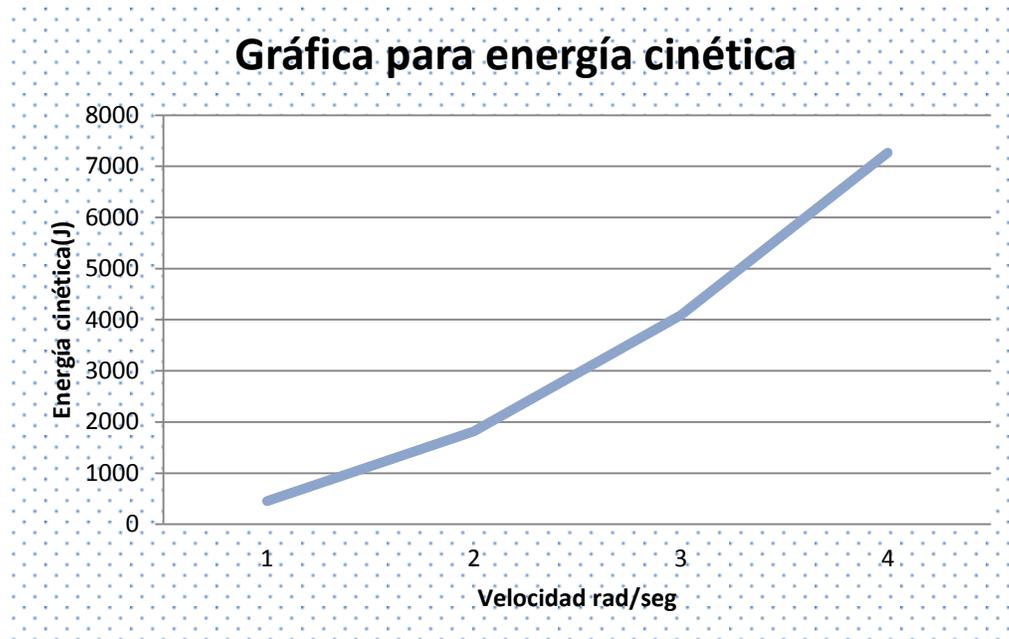


Figura 4.3. Gráfica para energía cinética.

La equivalencia de la inercia total (J_T) yendo a una velocidad máxima de 180 km/h en el vehículo a estudio para una masa vehicular (m_{ve}) en movimiento rectilíneo, se considera la energía cinética calculada de la ecuación (4.3) tenemos:

$$Ec = \frac{1}{2} m_{ve} v_{ve}^2 \therefore m_{ve} = \frac{2Ec}{v_{ve}^2} \quad (4.9)$$

$$m_{ve} = \frac{2Ec}{v_{ve}^2} = \frac{2(7264.52J)}{(50.039^2 \text{ m/seg})} = 5.802kg \quad (4.10)$$

Por esto los cálculos del sistema mecánico (volante de inercia) de nuestro vehículo representa una masa vehicular de 5.802 kg, a una velocidad de 50.039 m/seg. Si la masa del vehículo es de 1500 kg, a una velocidad máxima de 180 km, entonces nuestro análisis representa un 0.38% y calculando el %E al peso real de 6kg, tendremos un %E= 3.3%

Para representar las fuerzas externas que afectan al vehículo híbrido, se considera la posición de la fuerza respecto al eje de la llanta, como el par de carga (T_c) definido como:

$$T_c = F_r$$

F = Fuerza de accionamiento

r = Coordenada de ubicación de la fuerza al eje de la llanta.

Para conocer el tiempo en el que el volante de inercia alcanza una velocidad de 6590.82 rpm y por tanto una velocidad lineal de 180 km/h se realiza lo siguiente:



$$Par (N.m) = \frac{Potencia (Wats)}{(2\pi)(velocidad\ de\ rotacion\ rpm)} = \frac{56hp=41187.93}{(2\pi)(6590.82)} = 0.994N.m \quad (4.11)$$

$$T = \frac{d}{dt} W \quad (4.12)$$

$$W = \int_0^{X_{seg}} \frac{T}{I} dt \quad (4.13)$$

Como par constante e inercia constante.

$$W \frac{T}{I} \int_0^{X_{seg}} dt \quad (4.14)$$

Sustituyendo el par y la inercia.

$$W = \frac{2(0.994N.m)}{0.0305kg.m^2} \int_0^{X_{seg}} dt = 65.18(X_{seg}) \quad (4.15)$$

Conociendo que la velocidad a alcanzar en el tiempo Xseg es 690.19 rad/seg.

$$X_{seg} = \frac{W}{65.18 \frac{1}{seg^2}} = \frac{690.19 \frac{rad}{seg}}{65.18 \frac{1}{seg^2}} = 10.588seg \quad (4.16)$$

Para la selección de motores asíncronos.

Donde t_a es el tiempo de arranque:

$$t_a = \frac{I}{T} W = \left(\frac{0.0305kg.m^2}{1.988 \frac{kgm^2}{s^2}} \right) \left(690.19 \frac{rad}{seg} \right) = 10.588seg \quad (4.17)$$

4.2. Demostración analítica de la potencia

Para el análisis de **máquinas eléctricas** de corriente alterna se usa la potencia. Para esto hay que hacer la distinción entre las diferentes potencias mismas que serán dados a continuación:

Potencia activa y reactiva

Existe una diferencia fundamental entre potencia activa y reactiva, quizá lo más importante que hay que recordar es que una no puede ser convertida en la otra. Las potencias activas y reactivas funcionan independientemente una de la otra, por lo que se pueden tratar como cantidades distintas en circuitos eléctricos. ^[26]

Ambas imponen una carga en la línea de transmisión que las transporta, pero mientras que la potencia activa produce con el tiempo un resultado tangible (calor, potencia mecánica, etc.), la potencia reactiva solo representa potencia que oscila de un lado a otro. ^[26]



Todos los dispositivos inductivos CA, como imanes, transformadores, balastos y motores de inducción, absorben potencia reactiva porque un componente de la corriente que absorben se retrasa 90° con respecto al voltaje. La potencia reactiva desempeña un papel muy importante porque produce el campo magnético de CA en estos dispositivos. ^[26]

Una enorme carga activa/reactiva conectada a un sistema de suministro eléctrico contiene miles de motores de inducción y otros dispositivos electromagnéticos que absorben tanta potencia reactiva (para mantener sus campos magnéticos) como activa (para realizar el trabajo útil). ^[26]

Esto nos lleva al estudio de cargas que absorben tanto potencia activa como reactiva.

Cargas activa y reactiva combinadas: Potencia aparente

Se puede considerar que las cargas que absorben tanto potencia activa P como reactiva Q están compuestas de una resistencia y una reactancia inductiva. Considerando un circuito (fig. 4.4a), en el que el resistor y un reactor están conectados a una fuente G , el resistor absorbe una corriente I_p , mientras que el reactor absorbe una corriente I_q . El diagrama fasorial (fig. 4.4b) muestra que la corriente de línea resultante I está retrasada un ángulo θ con respecto a E . además, la longitud de I está dada por $I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2}$ ^[26]

Los componentes de las potencias activa y reactiva P y Q fluyen en la misma dirección, como lo muestran las flechas en la figura 4.4c. ^[26]

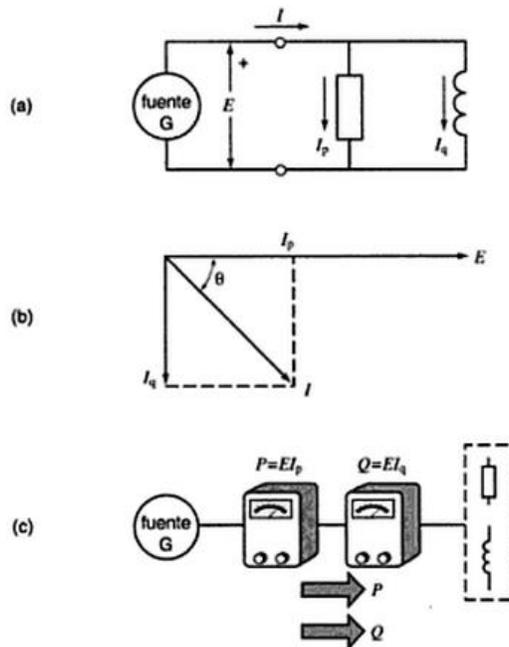


Figura 4.4. a) Circuito compuesto de una fuente que alimenta una carga activa y reactiva, b) Diagrama fasorial del voltaje y las corrientes, c) Flujo de potencias activa y reactiva de la fuente a la carga. (ref.31)



La potencia aparente no se expresa en watt ni en vars, sino en volt-ampere. Los múltiplos son el kilo-volt-ampere (kVA) y el mega-volt-ampere (MVA). El símbolo de la potencia aparente es S .^[26]

Relación entre P , Q y S .

Considere el circuito monofásico de la figura 4.5a compuesto de una fuente, una carga y medidores apropiados. Supongamos que:

El voltmetro indica E volts

El ampermetro indica I amperes

El wattmetro indica $+P$ watts

El varmetro indica $+Q$ vars

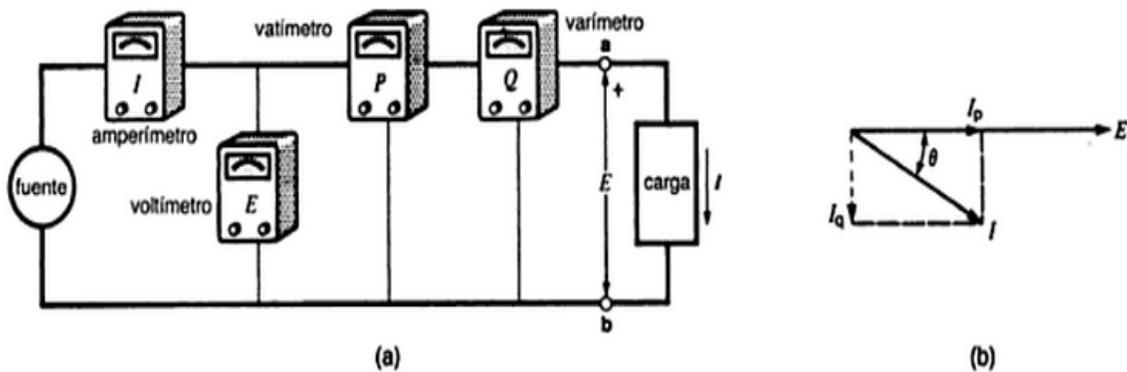


Figura 4.5. a) Instrumentos utilizados para medir E , I , P y Q en un circuito, b) El diagrama fasorial se puede deducir de las lecturas del instrumento. (ref.32)

Si P y Q son positivas, entonces la carga absorbe tanto potencia activa como reactiva. Por lo tanto, la corriente de línea I se retrasa un ángulo θ con respecto a E_{ab} .^[26]

La corriente I se puede descomponer en dos componentes I_p e I_q , respectivamente en fase, y en cuadratura, con I fasor (fig. 4.5b). Los valores numéricos de I_p e I_q se leen directamente en los instrumentos.^[26]

$$I_p = P/E \quad (4.18)$$

$$I_q = Q/E \quad (4.19)$$

Además, la potencia aparente S transmitida por la línea está dada por $S=EI$, por lo que:



$$I = S/E \quad (4.20)$$

De acuerdo con el diagrama fasorial (fig. 4.5b), es obvio que:

$$I^2 = I_p^2 + I_q^2 \quad (4.21)$$

Por lo tanto,

$$\left[\frac{S}{E}\right]^2 = \left[\frac{P}{E}\right]^2 + \left[\frac{Q}{E}\right]^2 \quad (4.22)$$

Es decir,

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (4.23)$$

Dónde:

S= potencia aparente [VA]

P= potencia activa [W]

Q= potencia reactiva [VAR]

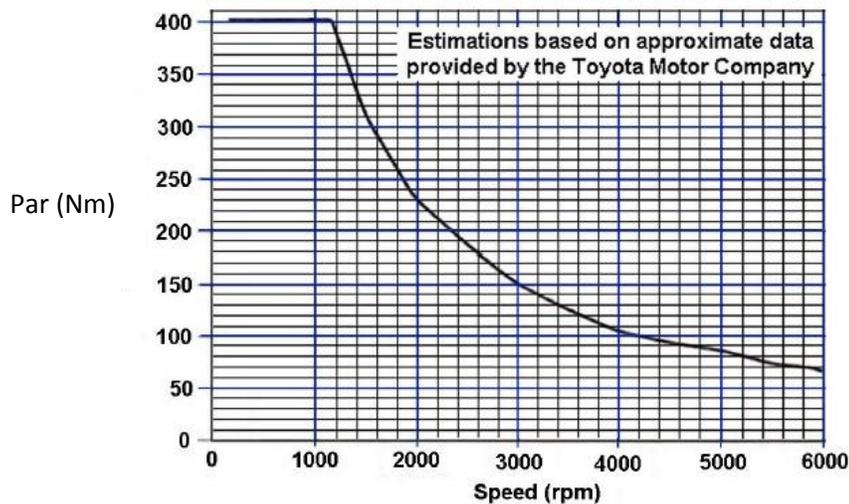


Figura 4.6. Especificaciones Máximo rendimiento par-velocidad para el Prius 2004. (ref. 33)

4.3. Análisis de Energía

A su vez determinado los análisis anteriores se determina la velocidad w en rad/seg, la aceleración $(d/dw)w$ en rad/seg² y conociendo la inercia I en kg.m², se realizan los cálculos para obtener el comportamiento de potencia en Watts, e integrando la curva de potencia se determina la energía en Joules (J).



El par es:

$$\tau = I \frac{d}{dw} w \quad (4.24)$$

La potencia es:

$$P = \tau w \quad (4.25)$$

Sustituyendo el par, la potencia es:

$$P = I * \frac{d}{dw} w * w \quad (4.26)$$

Para calcular cuanta energía se aprovecha (E_r) es necesario tener la energía generada al desacelerar el volante de inercia cuando está presente el **freno regenerativo** (E_g), y a esa restarle la energía que se transforma y que no se puede aprovechar (E_d) debido a cosas externas.

$$E_r = E_g - E_d \quad (4.27)$$

$$\int P_r(t) dt = \int P_g(t) dt - \int P_d(t) dt \quad (4.28)$$

Se encuentra el área bajo la curva de potencia, cabe enfatizar que el área bajo la curva es energía.

$$\sum_{i=0}^n P_r(t) \Delta t = \sum_{i=0}^n P_g(t) \Delta t - \sum_{i=0}^n P_d(t) \Delta t \quad (4.29)$$

Aquí teniendo los datos de velocidad instantánea, se puede obtener cualquier potencia, como sigue:

$$P(i) = I * w(i) * w(i) \quad (4.30)$$

Donde i es el tiempo instantáneo.

Se integran las potencias con respecto al tiempo y así obtenemos la energía recuperada.

$$E_r = I * [\sum_{i=0}^n \dot{w}_s(i) w_s(i) \Delta t - \dot{w}_L(i) w_s(i) \Delta t] \quad (4.31)$$

Dónde:

S subíndice indica que está a cierto deslizamiento.

L subíndice indica que es de la curva libre.

Por lo tanto:

$$P_{recuperada} = P_{generada} - P_{disipada} \quad (4.32)$$



4.4. Análisis de consumo energético

Hay que entender cómo los parámetros de diseño afectan al consumo energético de un automóvil con características determinadas y cuánto afecta la variación de cada uno de estos parámetros al consumo total.

La siguiente ecuación, modela el consumo energético P_{road} de un vehículo para condiciones de manejo dadas (Matthew et al.).

$$P_{road} = P_{roll} + P_{hill} + P_{aero} + P_{accl} + P_{aux} \quad (4.33)$$

Se debe reducir la potencia consumida para disminuir el consumo de energía, lo cual se logra disminuyendo la magnitud de cada uno de los coeficientes.

P_{roll} corresponde a la potencia de rodadura,
 m es la masa del vehículo en kg,
 g la aceleración de gravedad en m/seg²,
 V la velocidad en m/seg,
 C_{rr} el coeficiente de resistencia de rodadura y
 θ la inclinación del camino en grados.

$$P_{roll} = m \cdot g \cdot V \cdot C_{rr} \cdot \cos(\theta) \quad (4.34)$$

P_{hill} , corresponde a la potencia requerida por el vehículo para subir pendientes.

$$P_{hill} = m \cdot g \cdot V \sin(\theta)$$

P_{aero} afecta el consumo de potencia dado por la resistencia aerodinámica. En donde ρ es la densidad del aire,
 A corresponde al área frontal del vehículo, y
 C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica, el cual tiene que ver con el perfil del vehículo.

$$P_{aero} = 0.5 \cdot \rho \cdot (A \cdot V^3) \cdot C_d \quad (4.35)$$

El consumo de potencia debido a la aceleración está dado por:

$$P_{accl} = mV \cdot \frac{dV}{dt} \quad (4.36)$$

P_{aux} corresponde a la potencia consumida en los sistemas auxiliares (luces, etc.).

Desde el punto de vista de diseño, analizando las expresiones antes descritas, se deduce que para disminuir la potencia requerida por el vehículo, las variables que pueden ser modificadas son: la masa, el área frontal y el coeficiente de rodadura de los neumáticos.



La variable más delicada a una velocidad de 50 km/h o menos es la masa, para lograr automóviles más eficientes, se debe reducir su peso. Pero, a velocidades altas, el parámetro aerodinámico es el que más afecta el rendimiento.

Por ejemplo, el peso del automóvil a estudio Toyota Prius, esto es a 1500 Kg se logra un buen porcentaje de ahorro de energía a 50 km/hr.

4.4.1. Planteamiento del Modelo matemático del automóvil a estudio

Para esto se determinara una modalidad de control, para minimizar la descarga de la batería en un recorrido específico del automóvil, para esto se considera q la batería es un fuente de energía temporal, por lo que tiene que ser recargada nuevamente, ya sea por freno regenerativo o por medio de una fuente externa de suministro de energía.

Escribiendo la potencia suministrada por las baterías en función de la potencia en la carga y la potencia suministrada por el Buck–Boost (reductor-elevador), se obtiene:

$$P_{bat} = P_{load} - P_{BB} \quad (4.37)$$

Las variables de estado del sistema como el estado de carga de las baterías (SOC_{bat}) y el estado de carga de los condensadores (SOC_{uc}), se tiene que las ecuaciones que rigen la dinámica del sistema son:

$$SOC_{bat(k+1)} = SOC_{bat(k)} + (P_{BB(k)} - P_{load(k)}) * \eta_{bat} * \Delta T \quad (4.38)$$

$$SOC_{uc(k+1)} = SOC_{uc(k)} - P_{uc(k)} * \Delta T \quad (4.39)$$

Donde:

SOC_{bat}(k) Estado de carga de las baterías en el instante k;

SOC_{uc}(k) Estado de carga de la batería en el instante k;

P_{uc}(k) Potencia neta producida por la batería en el instante k (lado de baja);

P_{load}(k) Potencia del motor en el instante k;

P_{BB}(k): Potencia suministrada por el convertidor Buck-Boost en el lado de alta;

η_{bat} : Eficiencia en la conversión de energía de las baterías;

ΔT: Tiempo de muestreo.

La variable a minimizar corresponde a la descarga de la batería, cuya expresión está dada por:

$$j = \sum_{k=0}^{N-1} SOC_{bat}(I_{bat}(k)) * \Delta T \quad (4.40)$$



Donde:

SOC_{bat} representa el consumo de energía de la batería en el instante k .

La potencia suministrada por el Buck-Boost en el lado de alta tensión (lado de la batería) expresada en función de la corriente y el voltaje de los condensadores es:

$$P_{BB}(k) = I_{BB}(k) * V_{bat}(k) = I_{uc}(k) * V_{uc}(k) * \eta_{BB}(V_{uc}(k), I_{uc}(k)) \quad (4.41)$$

Donde:

$\eta_{BB}(V_{uc}(k), I_{uc}(k))$: Eficiencia del convertidor Buck-Boost.

Se debe incorporar al modelo la restricción $SOC_{uc}(N) = SOC_{uc}(0)$, con lo cual se pretende asegurar que los condensadores sean un sistema auxiliar de energía, estos, al término del recorrido, deben estar nuevamente cargados.

Luego, el planteamiento del modelo de control óptimo es como sigue:

$$j = \Phi[SOC_{uc}(N) + \sum_{k=0}^{N-1} \dot{S}OC_{bat}(I_{bat}(k), I_{BB}(k)) * \Delta T] \quad (4.42)$$

Por lo tanto:

$$SOC_{bat}^{(k+1)} = SOC_{bat}^{(k)} + P_{load}^{(k)} * \eta_{bat} * \Delta T + I_{uc}(k) * V_{uc}(SOC_{bat}^{(k)}, I_{uc}(k)) * \eta_{BB}(V_{uc}(k), I_{uc}(k)) * \eta_{bat} * \Delta T \quad (4.43)$$

$$SOC_{uc}^{(k+1)} = SOC_{uc}^{(k)} - \eta_{uc} * I_{uc}(k) * V_{uc}(SOC_{bat}^{(k)}, I_{uc}(k)) * \Delta T \quad (4.44)$$

La expresión $\Phi[SOC_{uc}(N)]$, que corresponde a la restricción de estado final para los condensadores, se ha tomado como el error cuadrático entre el estado inicial y final. Es decir:

$$\Phi[SOC_{uc}(N)] = [SOC_{uc}(N) - SOC_{uc}(0)]^2 \quad (4.45)$$

Definiendo la variable de estado $\mathbf{x}(k)$ como:

$$\mathbf{x}(k) = [SOC_{bat}(k) SOC_{uc}(k)]^T \quad (4.46)$$

Se usará el conjunto motor inversor del automóvil como una caja negra cuyos requerimientos de potencia son conocidos para un recorrido definido, porque no se puede influir sobre I_{load} . La corriente de carga para un recorrido específico es conocida. Luego, la variable $\dot{S}OC_{bat}$ dependerá sólo de la corriente suministrada por los condensadores, por lo que se tendrá $\dot{S}OC_{bat}(I_{uc}(k))$



del par de control (TL). El freno mecánico (TL) se acciona cuando la planta cumpla las siguientes condicionantes:

- La w_m es mayor a la w_{ref} , o error < 0 .
- La velocidad es descendente o aceleración negativa, $dw_{ref}/dt < 0$
- La potencia de entrada es positiva, $Pe > 0$

Lo que se obtiene es par proporcionado por el freno mecánico y es dado por la siguiente ecuación:

$$TL = K_f(w_{ref} - w_m) \quad (4.33)$$

Donde K_f = ganancia del control

Lo que podemos hacer con el método de Ziegler/Nichols, es que nos da partida para la sintonización de las ganancias del controlador, a partir de la respuesta a una entrada escalón (fig.4.8), se obtiene L – tiempo de retardo, T – constante de tiempo, así utilizando los datos que nos da el método (tabla 4.3) se pueden generar los controladores P, PI o PID.

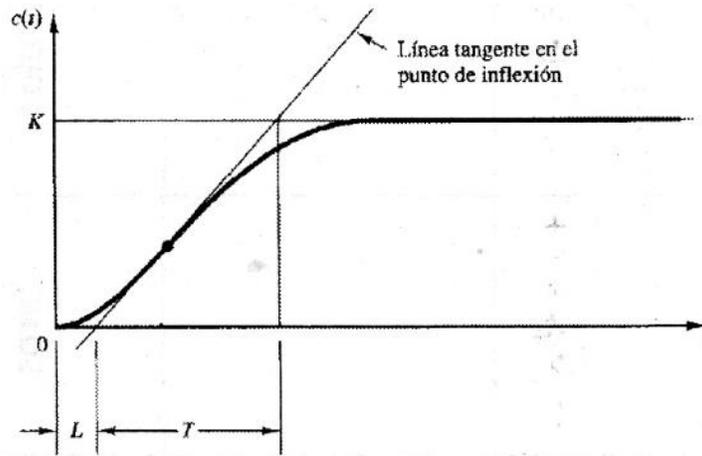


Figura 4.8. Respuesta de la sintonización de Ziegler/Nichols. (ref.34)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

Tabla 4.3. Regla de sintonización de Ziegler/Nichols basada en la respuesta escalón de planta. (ref.34).

En los controladores de PI y P la ganancia es determinada con el método de Ziegler/Nichols (tabla 4.3).



CAPÍTULO 5

MODOS, TIPOS DE MÁQUINAS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA HÍBRIDO

En este capítulo, se describe los modos distintos que se utilizan en las tres diferentes máquinas del automóvil, así también como una estrategia de control para el vehículo a estudio, para esto utilizamos un simulador (Matlab/Simulink). Se describen y explican esquemas de los bloques donde están implementadas las máquinas del vehículo, así como el bloque donde se realiza la estrategia de control.

5.1. Características de los modos de las tres máquinas del automóvil híbrido

Transmisión

La transmisión un conjunto de engranajes planetarios al que están conectadas tres máquinas: un motor eléctrico (MOT), un generador eléctrico (GEN) y un motor térmico (ENG). Las dos máquinas eléctricas (MOT Y GEN) están conectadas a una batería (BAT) y ambas pueden realizar tanto tareas de propulsión como de generación de energía eléctrica para recargar la batería.

El sistema tiene tres embragues (C1, C2 y C3) que acoplan las máquinas al conjunto de engranajes planetarios.

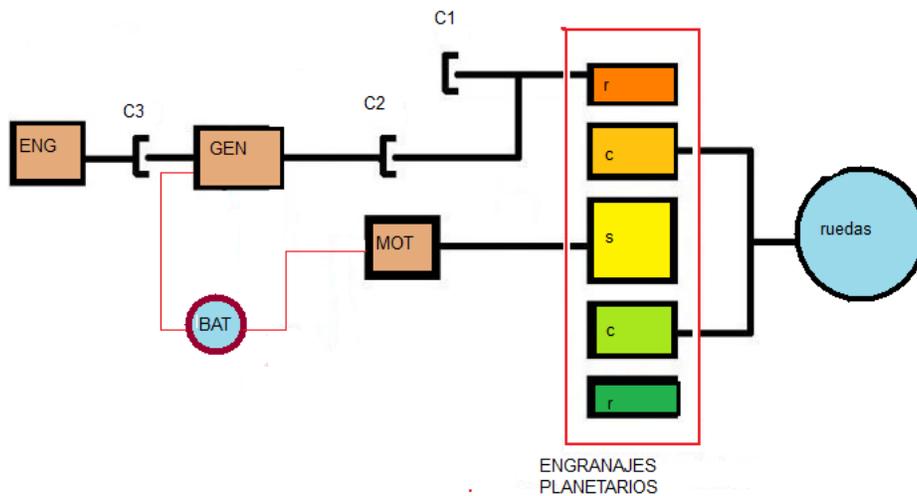


Figura 5.1. Sistema de máquinas del vehículo híbrido.



El motor eléctrico (MOT) está conectado al sol (s) del conjunto de engranajes, el sistema (ENG-GEN) a la corona (r) a través de los embragues C1 y C2, y el motor de combustión interna (ENG) se une al eje del generador a través del embrague C3. Por otro lado, el carrier (c) procedente de las ruedas se encuentra enganchado a los engranajes satélites del sistema planetario.

Esto se traduce en un conjunto de relaciones que cumple el conjunto de engranajes planetario:

El par en el sol corresponde al par que genera el motor:

$$T_s = T_{mot} \quad (5.1)$$

El par en la corona corresponde a la suma:

$$T_r = T_{gen} + T_{eng} \quad (5.2)$$

La relación cinemática entre las velocidades de los tres componentes del conjunto planetario (sol, corona y carrier) es:

$$\rho * w_r + w_s = (\rho + 1) * w_c \quad (5.3)$$

Siendo w_r , w_s y w_c las velocidades angulares de la corona (r), sol (s) y carrier (c) respectivamente y ρ es la relación entre el número de dientes de la corona (r) y del sol (s):

$$\rho = \frac{N_r}{N_s} = \frac{83}{37} = 2.24 \quad (5.4)$$

La relación de par impuesta por el conjunto de engranajes planetarios es la siguiente:

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{T_c}{1+\rho} = T_s \quad (5.5)$$

Y por último la relación de par entre el carrier (c) y las ruedas (w_h) es $R_d = 2.16$ lo que se traduce en que:

$$T_{wh} = R_d * T_c \quad (5.6)$$

En base a la posición de los embragues en cada momento (bloqueados o abiertos) el vehículo funcionará en un modo u otro. Hay hasta cuatro modos de funcionamiento posibles, que se describen a continuación:

Modo 1: C1 bloqueado; C2 abierto, C3 abierto; ENG off.

En este modo se activa el embrague C1 que bloquea a la corona y es el motor eléctrico (MOT) el que únicamente propulsa al vehículo. El par que se demande será proporcionado en todo momento por el motor eléctrico que está alimentado por la batería.



La relación de par entre el sol (s) del conjunto planetario y el par necesario en las ruedas es la siguiente:

$$T_s = \frac{T_{wh}}{R_d * (\rho + 1)} \quad (5.7)$$

Modo 2: C1 abierto; C2 bloqueado, C3 abierto; ENG off.

En este modo, el embrague C1 se encuentra abierto desbloqueando a la corona y permitiéndole al sistema un grado más de libertad (2 en total). Al estar C2 bloqueado, la potencia que desarrolle el generador es transmitida a la caja de engranajes planetarios, con lo cual, tanto el generador como el motor eléctrico proporcionan potencia para impulsar al vehículo, siendo la batería la que suministra la energía eléctrica a las dos máquinas. Con este modo se consigue reducir la velocidad del motor eléctrico cuando el vehículo se mueve a velocidades altas, para así combinar mejor la eficiencia del motor eléctrico con la del generador, ya que se consigue que el motor eléctrico trabaje en una región más óptima. Como las dos máquinas son eléctricas y cogen la energía de la batería, la potencia que ésta suministra es la suma de la potencia eléctrica que consume el motor eléctrico más la que consume el generador:

$$P_{tot*bat} = \frac{P_r}{\eta_r(\omega_r)} + \frac{P_s}{\eta_s(\omega_s)} \quad (5.8)$$

Siendo $\eta_s(\omega_s)$ y $\eta_r(\omega_r)$ los rendimientos del motor eléctrico y del generador en función de sus velocidades ω_s y ω_r .

Como cada máquina aprovecha de forma distinta la potencia eléctrica que se le suministra, (debido a que las velocidades de cada máquina son distintas y sus curvas de rendimiento en función de la velocidad son diferentes) habrá que desarrollar una optimización para que el conjunto sea lo más eficiente posible. Esta optimización está desarrollada en el apartado.

Modo 3: C1 bloqueado; C2 abierto; C3 bloqueado; ENG on.

Este modo pertenece al tradicional híbrido montado en serie. El motor de combustión interna (ENG) está conectado a través del embrague C3 al generador, pero el embrague C2 en este modo se encuentra abierto, el sistema (ENG - GEN) no se encuentra acoplado al conjunto planetario con lo que su función es solo la de recargar la batería, dejando al motor eléctrico con las tarea de propulsar al vehículo. Al no estar el sistema (ENG - GEN) conectado al conjunto planetario puede funcionar a una velocidad angular totalmente independiente de la velocidad y par de las ruedas (la del vehículo), lo que permite que las dos máquinas encargadas de la generación de electricidad puedan operar en la región de máxima eficiencia. Ambas velocidades, tanto la del generador (GEN) como la del motor de combustión interna serán la misma. La potencia eléctrica producida por el generador es:



$$P_{carga} = \eta_{gen}(\omega_r) * \frac{T_r * \omega_r}{\eta_{eng}(\omega_r)} \quad (5.9)$$

Donde $\eta_{gen}(\omega_r)$ y $\eta_{eng}(\omega_r)$ son las eficiencias con las que trabajan el generador y el motor térmico para una velocidad de funcionamiento ω_r .

Modo 4: C1 abierto; C2 bloqueado; C3 bloqueado; ENG on.

En este modo, los embragues C2 y C3 están bloqueados y la corona desbloqueada (C1 abierto), por lo tanto, con esta disposición el motor térmico mueve al generador y éste genera potencia eléctrica para recargar la batería a la vez que realiza labores de impulsión. Por lo tanto, al igual que en el modo 2 habrá que desarrollar una optimización para que el sistema (MOT - GEN - ENG) encargado funcione de la forma más eficiente posible.

5.2. Tipos de máquinas

Existen tres tipos de máquinas en un sistema híbrido, que serán descritas a continuación.

1. Motor eléctrico

El motor eléctrico es la principal máquina encargada del impulso del vehículo. El motor tiene una potencia de 136 CV y un par máximo de 207 N.m. La Figura muestra su mapa de eficiencia en función de la velocidad del vehículo que sería cuando el vehículo circula impulsado solo por el motor eléctrico (modo 1 y 3).

A partir de los 80 km/h a medida que el vehículo va aumentando su velocidad la eficiencia del motor va disminuyendo.

El motor eléctrico impulsa al vehículo y al mismo tiempo puede aprovechar la energía cinética de las frenadas (freno regenerativo) para generar electricidad que se almacena en la batería. El par será positivo cuando la máquina eléctrica realice tareas de impulsión y negativo cuando genere electricidad.

2. Generador eléctrico

El generador eléctrico incorporado en el sistema utilizado tiene una potencia de 81 CV. Como el generador realiza tareas de impulso junto con el motor eléctrico y también tareas de recarga de la batería hay que considerar 2 eficiencias según sea el signo del par en su eje.

Hay que señalar que el generador en ningún momento impulsará el vehículo de manera solitaria, sino que lo hará siempre junto con el motor eléctrico.

3. Motor térmico

El motor térmico es un motor de gasolina, y su potencia es de 98 CV. Es capaz de desarrollar un par máximo de 115 N·m a 4000 rpm.



Debido a que básicamente su función es la de extender la autonomía del vehículo proporcionando la energía para recargar la batería, siempre deberá funcionar mejor en una región adaptable a las necesidades de un automóvil híbrido.

5.3. Simulación del comportamiento de la frecuencia de corriente y deslizamiento del rotor/estator del generador eléctrico

Como ya se definió en el tema 4.2 que $S^2 = P^2 + Q^2$, el desplazamiento se da en una maquina eléctrica con una frecuencia de 80Hz y es proporcional a las velocidades del rotor/estator. El desplazamiento determinará la intensidad de corriente que se genera en el rotor con lo que el desplazamiento sea mínimo o menor velocidad angular.

Con esto la intensidad de corriente predetermina las capacidades del generador eléctrico de responder en situaciones determinadas, esto es algo muy importante para el diseño y su capacidad de este para generar energía y la disipación de energía eléctrica por las pérdidas eléctricas a causa de reacciones electromagnéticas.

Por esto se simulara por medio del programa Matlab/Simulink la frecuencia de reacción.

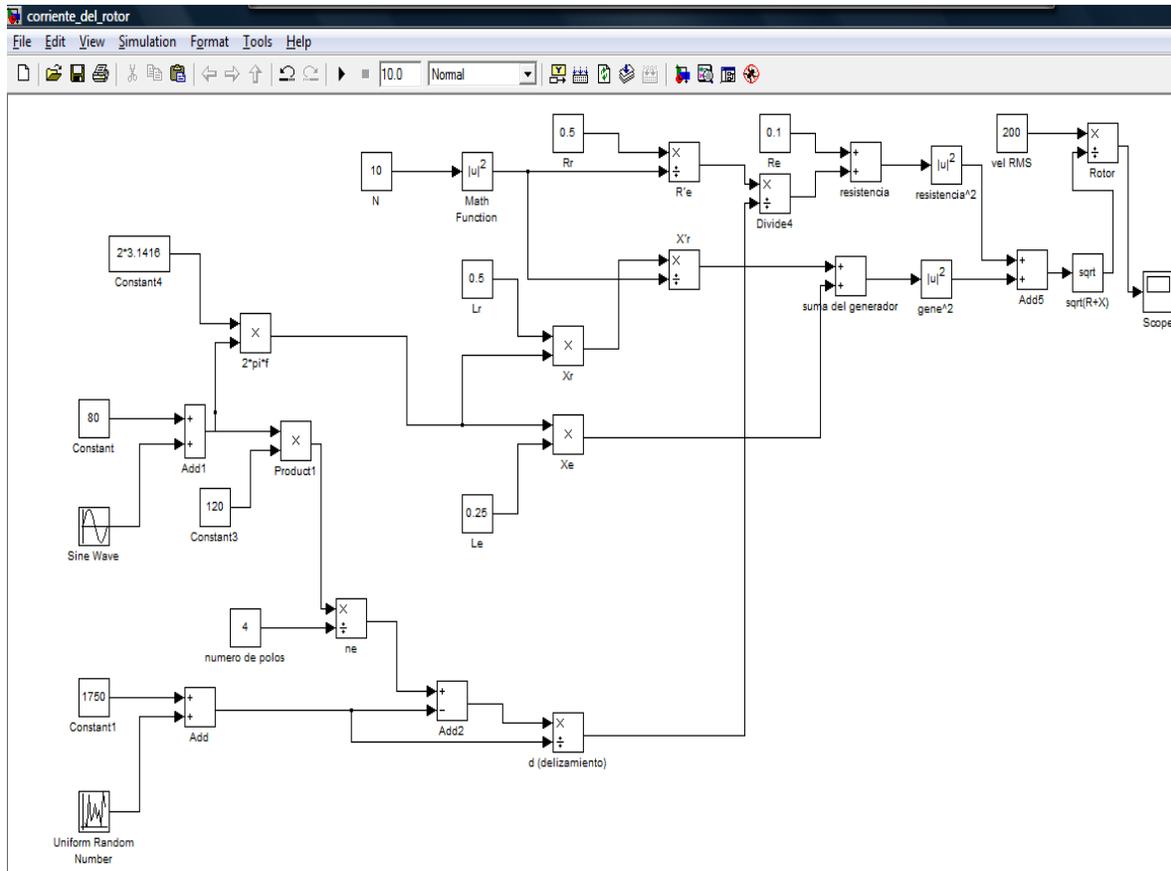


Figura 5.2. Diagrama de control para la corriente del rotor en el generador eléctrico.

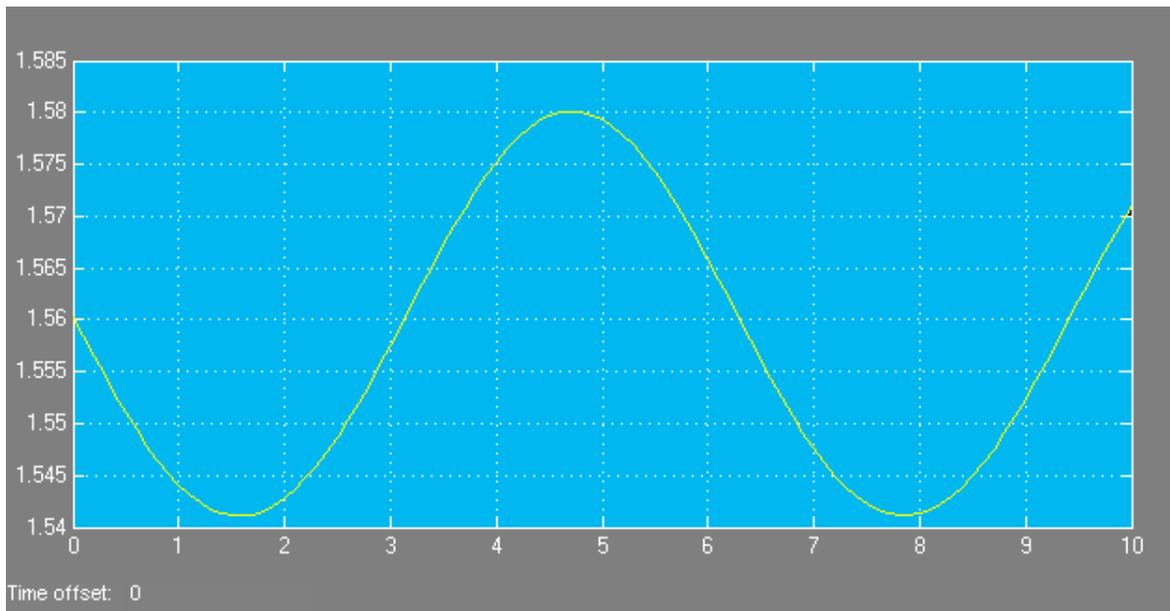


Figura 5.2b. Frecuencia del rotor del generador eléctrico.

El motor de inducción como cualquier otro tiene un bobinado en el estator y otro en el rotor.

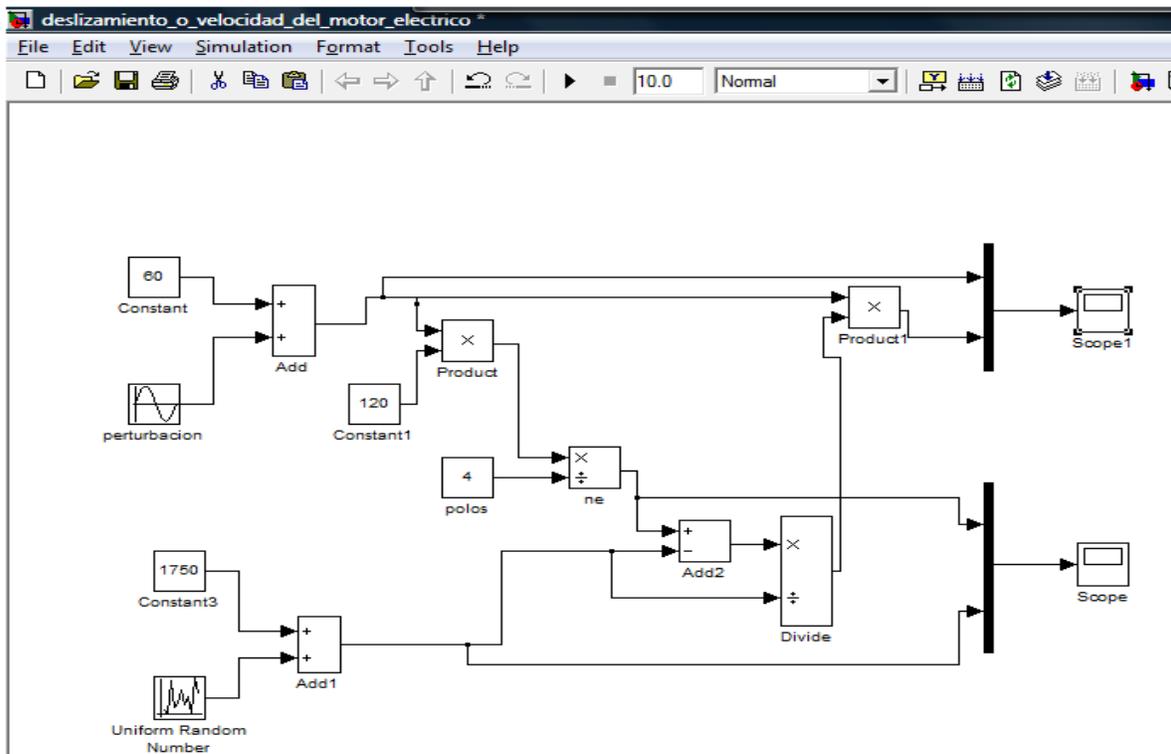


Figura 5.3a. Diagrama de control para el deslizamiento del motor eléctrico.

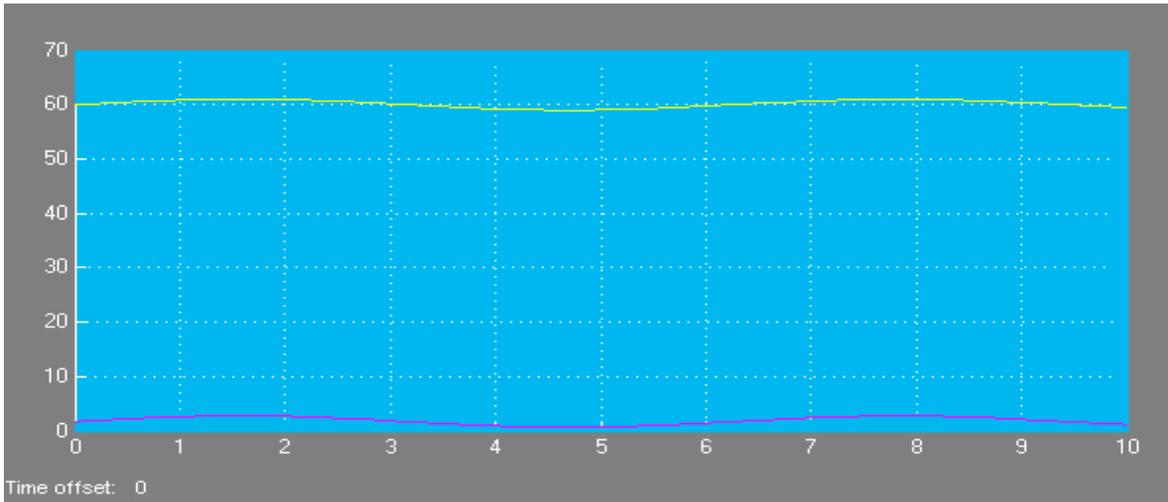


Figura 5.3b. Frecuencia deslizamiento del motor eléctrico.

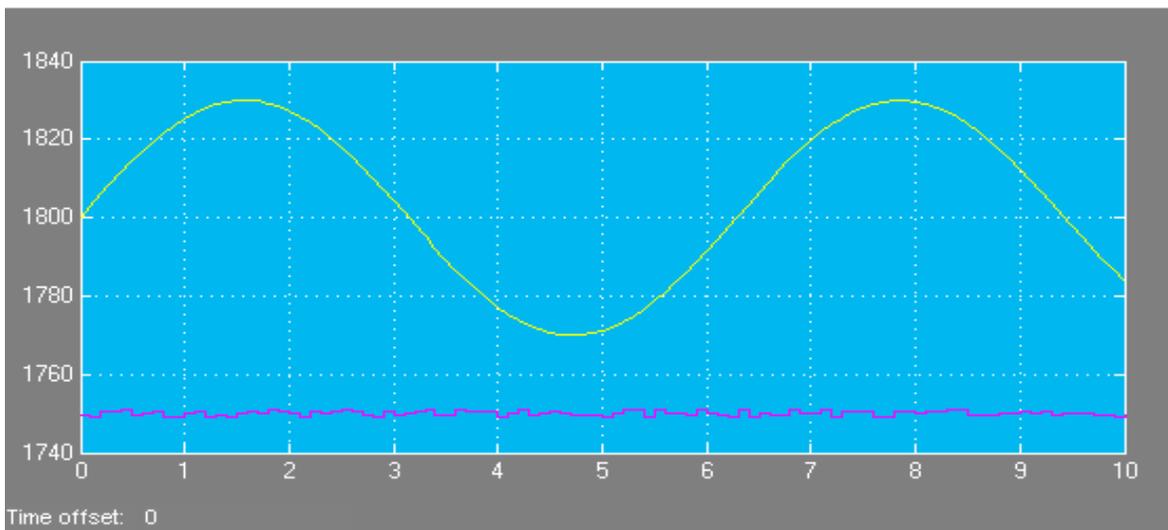


Figura 5.3c. Frecuencia deslizamiento del motor eléctrico.

La frecuencia de rotación del campo magnético (n_e) se considerará de 60Hz, con el análisis de las perturbaciones se verá cómo se comporta el generador. Los polos son 4, en el deslizamiento (d) se utiliza la ecuación $d = (n_e - n_r)/n_e$, donde relaciona la frecuencia del estator con el rotor ($f_r = d * f_e$). Cuando el deslizamiento tiende a 1, la frecuencia del rotor tiende a 0. Por lo que permite que cuando hay sobrecarga en el rotor, el incremento de la frecuencia, genera par adicional para que las RPM vayan incrementando, esto llevando a un incremento de la corriente eléctrica del estator y que ayuda a compensar el ingreso de sobrecarga.



Las simulaciones atienden a un ciclo de velocidad donde el automóvil puede alcanzar la velocidad de referencia en la que todas sus características mecánicas lo permitan. Estos procesos no se detienen, en el supuesto caso de que el automóvil solicite algo que no pueda realizar, como acelerar demasiado, por lo contrario se acerca a la velocidad deseada lo mas que se pueda.

El controlador PID decide cuanta intensidad tiene que entregar a la batería para que el automóvil siga la referencia de velocidad dada.

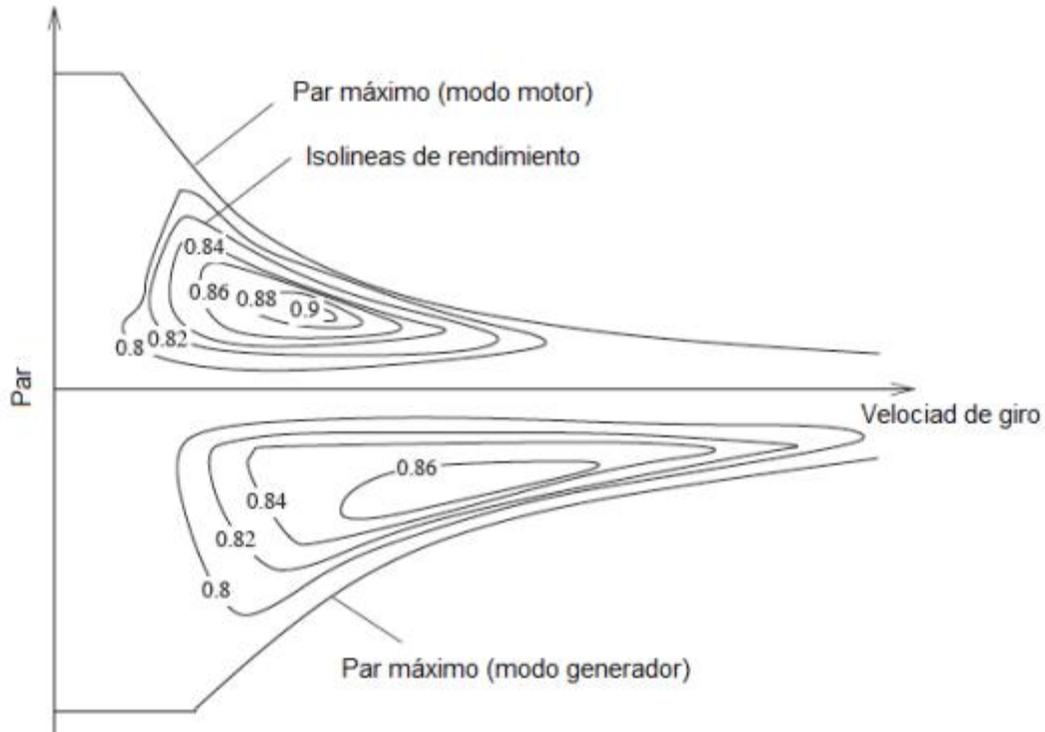


Figura 5.4. Mapa de rendimiento de un motor eléctrico.



CAPÍTULO 6

EFICIENCIA DEL FRENO REGENERATIVO Y MEDIDAS DE SEGURIDAD EN AUTOMÓVILES HÍBRIDOS

La electricidad del transporte ya es una realidad. El sector del automóvil ha apostado por una tecnología más avanzada, altamente eficiente y que va a contribuir a reducir el consumo de energía, de derivados del petróleo, y que hará de nuestras ciudades lugares menos ruidosos y más habitables.

El automóvil híbrido que utiliza freno regenerativo, su motor está alimentado por un motor de energía eléctrica. El motor eléctrico es más eficiente que el motor de combustión convencional, tiene menos pérdidas de energía y no produce emisiones ni contaminación acústica.

- Altamente eficiente.
- Menores pérdidas mecánicas.
- Menor costo de mantenimiento.
- Posibilidad de recuperar la energía del frenado (freno regenerativo).

En las rectas y pendientes hacia arriba: las baterías alimentan el motor. Por otro lado pendientes hacia abajo: el freno regenerativo aprovecha la energía cinética, la transforma en electricidad y transforma las baterías, por esto la eficiencia del uso de la energía es mejor.

6.1. Eficiencia (η) de un motor eléctrico

Eficiencia

Es la medida de la capacidad de un motor eléctrico para convertir la potencia eléctrica que se almacena en potencia mecánica útil. ^[28]

Disminución de eficiencia

No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será 100%. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia. ^[28]

Cálculo de eficiencia

El cálculo de eficiencia se hace con la relación de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica expresada en porcentaje.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{potencia mecánica}}{\text{potencia eléctrica}} \times 100 \quad (5.1)$$



Las unidades de potencia deben ser iguales.

- La potencia eléctrica se expresa en kilowatts (KW)
- La potencia mecánica en caballos de potencia (CV o HP)

Equivalencias útiles para la conversión de unidades.

- 1CV=0.7354 kW
- 1kW=1.35 CV

Eficiencia en el automóvil híbrido en estudio

Para este auto la primera cuestión es que es eficiente por la capacidad de carga que tienen las baterías. Baterías más eficientes y capaces de que el auto tenga un mejor funcionamiento de todo el sistema de recuperación de energía en el modo híbrido.

Por otro lado también se tiene una ventaja de que puede ser solo un eléctrico alrededor de 20 km.

Ahora bien calculamos la eficiencia del automóvil Toyota Prius.

Si el motor eléctrico del Toyota Prius tiene una potencia de 56 HP (41.76kW) y genera una potencia de 81.04 HP (82.16CV) tiene:

$$Potencia\ mecánica\ de = 56.77 \times 0.7354 = 41.74KW \quad (5.2)$$

$$Eficiencia = \frac{41.74}{41.76} \times 100 = 99.9\% \quad (5.3)$$

$$Pérdidas = 41.76 - 41.74 = 0.02KW \quad (5.4)$$

El motor convierte el 99.95% de su energía eléctrica en mecánica y pierde el 0.05% en el proceso.

6.2. Medidas de seguridad más recomendables en automóviles híbridos

Según los autos híbridos y eléctricos tienen que emitir sonido artificial, esta medida puede no parecer demasiado ecológica pero la denominada contaminación acústica de los autos resulta ser bastante más segura para las ciudades, que el silencio de los autos eléctricos.

Tienen que emitir un sonido artificial cuando circulen por debajo de los 30 km/h. Esta es la medida aprobada por la agencia norteamericana para la seguridad en carretera (NHTSA),



luego de analizar el riesgo que suponían para los peatones estos automóviles en ciudad.
[29]

Alta tensión

En los vehículos híbridos se manejan sistemas de alta tensión por todos sus componentes eléctricos que necesita, entre uno de ellos las baterías y el sistema de control; estos son accionados por tensiones superiores a los 60V de tensión continua o 25V de alterna. [30]

La red alta tensión en los automóviles híbridos trabaja con unas tensiones de corriente continua de hasta 650V y deben poner a disposición una gran energía eléctrica. [30]

Por este tipo de aspectos el fabricante incluye advertencias (fig.5.1) para que el usuario tenga cuidado en ciertas partes del automóvil, sobre todo en el motor.



Figura 6.1. Etiqueta de advertencia en automóviles híbridos. (ref.35)

En el mercado se encuentran actualmente micro sistemas híbridos, suaves y llenos. Estos difieren en términos de construcción y para el ahorro de combustible y CO2. [30]

En los conceptos de seguridad del fabricante Wartungs-/Servicestecker vehículo (servicio de desconexión) desempeña un papel esencial. Aunque este conector tiene diferentes nombres de los fabricantes individuales, su forma es siempre similar. En todos los conceptos que tiene la misma función, a saber, para interrumpir el circuito entre los módulos individuales en la batería. Una vez que se retira la Wartungs-/Servicestecker (servicio de desconexión), el circuito eléctrico de la batería y el conjunto del sistema de HV se interrumpe. [30]



Cableado/instalación-HV

Dentro de la instalación de alta tensión son conducidos tanto el cable positivo como el negativo desde la batería hasta el inversor, otro cableado hasta diferentes componentes HV (de alta tensión) como por ejemplo la instalación de clima. La instalación de alta tensión es reconocida por su color naranja.^[30]

Convertidor o Inversor

En la técnica híbrida. El inversor convierte la corriente alterna trifásica producida por el generador HV en corriente continua (DC). No está permitido abrir el inversor en ningún caso, ya que allí hay tensiones superiores a los 200V. Lo mismo rige también para la unión entre el inversor y el generador o el motor eléctrico.^[30]



Figura 6.2. Inversor y convertidor de voltaje.
(ref.36)

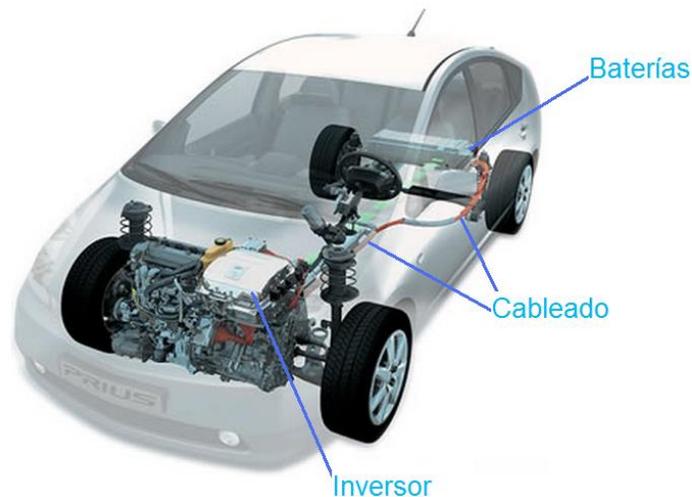


Figura 6.3. Componentes principales del sistema de alta tensión de un automóvil híbrido Toyota Prius. (ref.37)



Medidas de seguridad de los que construyen y/o reparan un automóvil híbrido

Las personas deben ser capacitadas para que reconozcan el peligro que implica la instalación eléctrica de alto voltaje y el armado de dichos componentes.

El encargado de la planta o la persona con mayor rango en la empresa tiene el objetivo de cuidar y garantizar la seguridad en todo el trabajo que implique el armado de dichos automóviles.

Las personas encargadas de realizar el armado de HV, deben de cumplir una serie de requisitos que los avalen para realizar las tareas necesarias que esto implique.

Elementos necesarios

- Ropa protectora, como guantes aislantes (aislados eléctricamente), guantes de goma, gafas protectoras y calzado de seguridad.
- Cinta aislante con un grado apropiado de aislamiento eléctrico.
- Un comprobador eléctrico que pueda medir 750 voltios de CC o más.

Se debe saber que hasta que la instalación este en su totalidad completa, permanece desconectada y libre de tensión, para que por seguridad no cause ningún incidente.

Componentes de seguridad para alta tensión

1. Un fusible de alta tensión, para protección de un cortocircuito en la batería del HV.
2. Cables eléctricos de alta tensión positivos y negativos están aislados del chasis metálico, por lo que no existe la posibilidad de sufrir descargas eléctricas al tocar el chasis.
3. Relés o relevadores de 12 voltios, los relés o relevadores detienen el flujo de electricidad enviado por la batería del HV.
4. Monitor de anomalías de masa controla constantemente si se producen fugas de alta tensión al chasis metálico mientras el vehículo está en funcionamiento.

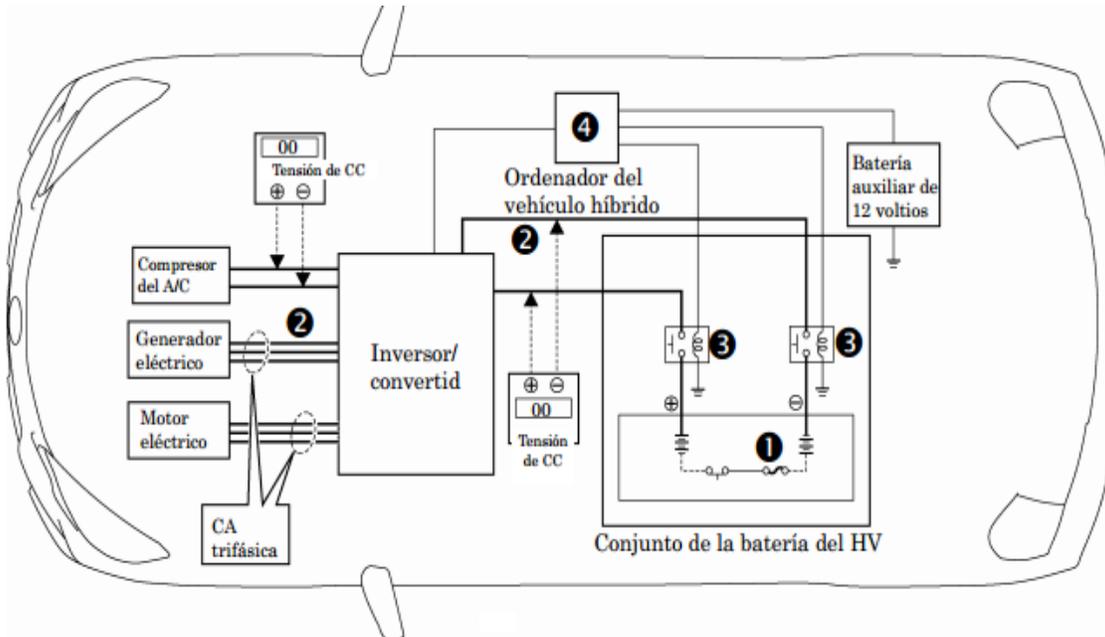


Figura 6.4. Esquema de los componentes de seguridad para alta tensión de un automóvil híbrido Toyota.



CONCLUSIONES

El trabajo realizado tiene acerca del automóvil híbrido ayuda a tener mejores hábitos en la vida cotidiana, como el no usar tantos combustibles fósiles, ayudando al automóvil a obtener energía propia por medio de un sistema de recuperación.

Es importante dentro del análisis desarrollado, la adquisición de un automóvil híbrido, como el Toyota Prius, puede resultar más caro que un auto convencional, pero ligado al ahorro a largo plazo, ya que el ahorro de combustible y energía por medio de la red eléctrica se disminuyen considerablemente, por esto se recupera algo de la inversión. Por tanto el automóvil híbrido con un sistema de regeneración de energía cinética tiene la capacidad de aprovechar los recursos energéticos renovables propios en las horas de mas tránsito vehicular en las ciudades, en consecuencia el mayor uso del freno regenerativo.

El análisis para la regeneración de energía, se realizaron pasos importantes como fue saber cuánta energía cinética se recupera.

No siempre los automóviles con más caballos son los más potentes porque también pesan demasiado. El automóvil convencional es menos pesado que el híbrido, pero el híbrido resulta que nos ahorra energía, combustible y emite mucho menos gases contaminantes, aunque no nos da una potencia mayor.

El modelo de simulación del generador eléctrico en Matlab/Simulink del rotor/estator, que son las partes transcendentales del generador comprubo que a causa de la utilización del sistema de recuperación de energía cinética en el automóvil híbrido se puede lograr una compensación de la caída de voltaje.

El uso de sistemas de recuperación de energía cinética mejora el uso de la energía que es disipada a causa del frenado y tenemos un menor desgaste de frenos gracias al regenerativo.

Se dio a conocer la evolución, estructura, construcción y operación de un sistema de recuperación de energía cinética funcional, basado en el empleo versátil de la energía térmica y eléctrica, potencia, favoreciendo al medio ambiente y optimizando el consumo mínimo de recursos no renovables.

Con el uso continuo del freno regenerativo se produce menos desgaste en el mecánico, devuelve la alimentación a la batería, acelera los ciclos de trabajo, reduce la acumulación de calor en el motor y protege los componentes del desgaste prematuro, ofreciendo una mejor eficiencia de la energía, ayudando a prolongar su autonomía y su vida útil.

El análisis de eficiencia del sistema de recuperación de energía cinética al ser revisado cumple con los objetivos que se buscaban al tener un ahorro importante de combustible y en consecuencia un ahorro económico.



Este trabajo brinda una aportación al concientizar al automovilista de considerar el momento de comprar un automóvil sea amigable con el medio ambiente y al mismo tiempo tendrá una ganancia de ahorro a largo plazo en el gasto de gasolina y electricidad.

En este trabajo aprendí acerca de las ventajas y desventajas del sistema de recuperación de energía cinética y al igual que en un futuro es prioritario fabricar un automóvil híbrido que cuente con más ventajas sobre el automóvil convencional (combustión interna), teniendo en cuenta la mejora del diseño y abarcando la producción, así como el financiamiento para que sea más común su uso.

Dejando el campo abierto a investigar sobre temas alrededor de sus distintos usos, diseño y mejoras del freno regenerativo, ya que esta tesis servirá para consulta en proyectos a futuro.



BIBLIOGRAFÍA

CONTENIDO

Capítulo 1

1. Article "Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle", de S. R. Cikanek y K. E. Bailey.
2. Article "Modeling and simulation for hybrid electric vehicles. II. Simulation", de Xiaoling He y Hodgson, J.W.
3. Article "Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultra capacitors and a Buck-Boost Converter", de Juan W. Dixon, Micah Ortúzar y Eduardo Wiechmann.
4. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 89,90.
5. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 90.
6. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 66.
7. Energía del transporte, Xavier Elías Castells, Ediciones Días de Santos Albasanz, 228037 Madrid. Pág. 271.
8. Periódico, el País.
9. Foro de la industria nuclear Española.

Capítulo 2

10. <http://www.naikontuning.com/articulos/KERS-Freno-Regenerativo/>
11. <http://www.tecmovia.com/2011/07/19/asi-funciona-el-kers/>
12. <http://formula1esp.net.au.net/2009/04/todo-sobre-el-kers-con-videos-incluido/>
13. <http://haciendofuturo.wordpress.com/2010/12/07/kers-y-los-frenos-regenerativos/>
14. <http://antuanf1.blogspot.mx/2011/03/kers-mecanico-el-arma-de-williams-para.html>
15. Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Muhammad H. Rashid. Edit. Pearson, tercera edición. Pág.1.
16. electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Muhammad H. Rashid. Edit. Pearson, tercera edición. Pág.2.



17. <http://www.formulaf1.es/8812/el-kers-del-2011/>
18. Manual de la técnica del automóvil, Bosch 4° edición. Pág.724.
19. Revista de obras públicas, José Serrano Camarasa, Junio 1979. Pág. 489.
20. <http://www.sistemas-sustentables.com/archivos/ARCHIVO.49fc89f2475ff.pdf>
21. Manual de la técnica del automóvil, Bosch, 4° edición. Pág.728.
22. Manual de la técnica del automóvil, Bosch 4° edición. Pág. 729.

Capítulo 3

23. INE, portal de indicadores de eficiencia energética y emisiones vehiculares.
24. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 84.

Capítulo 4

25. Shigley, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica Ed. Mc. Graw Hill, 8a Edición.
26. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia, sexta edición, Theodore Wildi, Ed. Pearson. Pág. 140, 141,142.
27. Apuntes semestre 2013-3, DIMEI. Instrumentación y control, 7 mayo 2013.

Capítulo 6

28. Conuee. Comisión federal para el uso eficiente de la energía.
29. Agencia Norteamericana para la Seguridad en Carretera (NHTSA).
30. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Fachausschuss Metall und Oberflächenbehandlung. (Seguro Social Alemán de Accidentes, Comité Técnico y de tratamiento de superficies metálicas).

TABLAS Y FIGURAS

Capítulo 1

1. American Motors Corporación.
2. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 90.



3. El vehículo eléctrico, STA (Sociedad de Técnicos de Automación), primera edición 2011, Libbooks Barcelona, S. L. L. Pág. 66.
4. Pfeil, G. B. and Bakker, D. (2011): Surface Ocean CO2 Atlas (OCAT), Bremerhaven. <http://sosoceanos.blogspot.mx/2012/05/primer-atlas-de-concentracion-de-co2-en.html>
5. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático (IPCC). <http://www.itu.int/itu/news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=03&ipage=Full&NetworkedCar&ext=html>
6. Greenpeace. Scripps Institution of Oceanography. <http://www.greenpeace.org/argentina/es/noticias/Greenpeace-exige-energias-renovables-para-enfrentar-el-calentamiento-global/>
7. Energía del transporte, Xavier Elías Castells, Ediciones Días de Santos Albasanz, 228037 Madrid. Pág. 272
8. Foro de la industria nuclear Española. <http://www.foronuclear.org/es/tags/medio-ambiente?lang=es&limitstart=40>

Capítulo 2

9. Ferrari F2009 KERS for dummies.
10. <http://www.bolido.com/2011/03/el-funcionamiento-del-caliper-de-freno/>
11. Manual de la técnica del automóvil, Bosch 4° edición. Pág. 795.
12. <http://haciendofuturo.wordpress.com/2010/12/07/kers-y-los-frenos-regenerativos/>
13. Markkchang. www.efcetosuelo.com
14. <http://www.formulaf1.es/8812/el-kers-del-2011/>
15. Flybrid®
16. <http://www.soygik.com/kers-como-funciona-el-sistema-de-recuperacion-de-energia-cinetica-de-f1/>
17. Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Muhammad H. Rashid. Edit. Pearson, tercera edición. Pag.2.
18. UNED, 03-03-11 Isaac Prada y Nogueira. ©Williams Grand Prix Engineering Limited.
19. <http://cienciasstecnologia.blogspot.mx/2012/09/como-funciona-el-kers-de-un-formula-1.html>



20. <http://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet%20-%20Lithium-ion%20and%20Lynx-ion%20-%20rev%2003%20-%20ES.pdf> , Victron energy, Blue power

21. Revista de obras públicas, José Serrano Camarasa, junio 1979. Pág. 490.

22. Manual de la técnica del automóvil, Bosch 4° edición. Pág. 728.

23. Manual de la técnica del automóvil, Bosch 4° edición, Pág. 728.

Capítulo 3

24. <http://www.nissanchiangmai.com/vehicles/nissan-sylphy/>

25. <http://www.toyota.com.mx/veh%C3%ADculos/hibridos/prius.aspx>

26. <http://www.toyota.com.mx/veh%C3%ADculos/hibridos/prius.aspx>,
<http://www.aficionadosalamecanica.com/hibridos-prius.htm>

27. <http://www.quecocheelectrico.com/noticias/hibridos-enchufables/toyota-publica-los-datos-del-modelo-de-produccion-del-prius-hibrido-enchufable>

28. <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>

29. <http://neoauto.clasificados.pe/blog/neoauto/innovacion-en-los-autos-electricos>

Capítulo 4

30. <http://es.autoblog.com/photos/sistema-experimental-kers-de-volante-de-inercia-de-volvo/5848178/>

31. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia, sexta edición, Theodore Wildi, Ed. Pearson. Pág. 141.

32. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia, sexta edición, Theodore Wildi, Ed. Pearson. Pág. 142.

33. Article. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System, U.S. Department of Energy Freedom Car and Vehicle Technologies, Pag.31.

34. Apuntes semestre 2013-3, DIMEI, instrumentación y control, 7 mayo 2013.

Capítulo 6

35. Automóvil Toyota Prius 2012.

36. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System, U.S. Department of Energy FreedomCar and Vehicle Technologies, Pág.11.

37. <http://www.aficionadosalamecanica.com/hibridos-prius.htm>