

Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos

Méndez Cuello Andy¹; Cely Vélez Mauricio¹; Monar Monar Willan¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

Resumen: El trabajo aquí presentado consiste en el diseño del sistema de frenado regenerativo presente en los coches híbridos y eléctricos. Se parte de los conceptos fundamentales que son la base para una comprensión global del proceso de regeneración de energía. Así mismo, se analiza los elementos del sistema y la forma en la que influyen directamente en la generación de energía. También se presenta una clasificación general de las diferentes configuraciones de los autos híbridos, que modifican el proceso de frenado regenerativo. El requisito específico que da lugar al desarrollo del proyecto es dar a conocer el uso de las energías alternativas que son comúnmente desperdicio, pero que con el avance de la tecnología se puede aprovechar para la reutilización y la aplicación en diferentes procesos.

Palabras clave: Frenos Regenerativos, Autos Híbridos, Energía Eléctrica, Sistema de Frenado.

Design of the Regenerative Braking System for Hybrid Cars

Abstract: This work presents the design of the regenerative braking system in hybrid and electric cars. It is important to know the fundamental concepts that are the basis for a complete understanding of process of energy regeneration. Likewise, the system components and how they are directly affect power generation, is analyzed. A general classification of different configurations of hybrid cars, which ones modify the regenerative braking process, is also presented. The specific requirement that leads to the development of the project is to introduce the use of alternative energies that are commonly wasted, but with the advancement of technology can be leveraged for reuse and use in different processes.

Keywords: Regenerative Braking, Hybrid Cars, Electric Power, Braking System.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda energética a nivel mundial por parte de la sociedad y el creciente número de vehículos provocan un notable aumento en la contaminación ambiental, por ello es necesario regular y utilizar la energía disponible de forma eficiente. El avance tecnológico permitió la creación de vehículos híbridos que combinan un motor de combustión interna y un motor accionado por energía eléctrica, que en consecuencia reducen significativamente la emisión de gases tóxicos y el consumo de energía. En el sistema de frenos regenerativos se tiene como finalidad principal, almacenar la energía que se pierde en forma de calor durante el frenado en vehículos a combustión interna o estándar, y poder utilizar gran parte de esta energía en otro instante cuando el vehículo lo requiera, ya sea para el propio desplazamiento o para el consumo en otros aparatos del automóvil híbrido.

2. SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO

Un sistema de frenos regenerativos se usa en vehículos híbridos los cuales combinan dos tipos de motores: un motor de combustión interna y un motor eléctrico.

Ambos, requieren diferentes tipos de energía. El motor de combustión interna consume combustible, y el motor eléctrico requiere de energía eléctrica.

2.1 Motor de Combustión Interna

Un motor de combustión interna funciona en base al consumo y quemado de una mezcla comprimida en distintas relaciones de aire y combustible, el proceso se lleva a cabo dentro de un cilindro o cámara de combustión que permite incrementar la presión interna y generar con ello la suficiente potencia hacia el pistón (Biblioteca Virtual). A continuación la Figura 1.

De acuerdo a la mezcla aire combustible y la relación que presenten estos dentro de la cámara del cilindro se pueden diferenciar 4 tiempos en un motor de combustión interna los cuales son: Admisión, Compresión, Combustión, Escape.

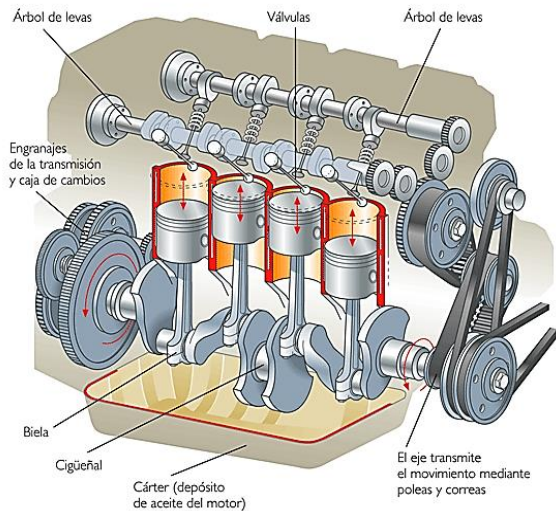


Figura 1. Motor de Combustión Interna (El Rincón de la Tecnología)

Admisión: En la etapa inicial de este tiempo el pistón se encuentra en movimiento descendente a través del cilindro mientras la válvula de admisión inicia su apertura; Paralelamente la válvula de escape se cierra, de modo tal que únicamente existe el ingreso de la mezcla de aire-combustible; como se observa en la Figura 2.

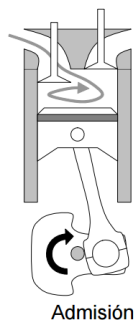


Figura 2. Etapa de Admisión (Motores Térmicos)

Compresión: En la Figura 3 se observa que en este tiempo las válvulas de admisión y escape están completamente cerradas, el pistón que se encuentra en el PMI inicia su movimiento ascendente comprimiendo la mezcla aire-combustible del tiempo anterior, logrando cada vez un espacio más pequeño, hasta que llega a su volumen mínimo en el PMS.

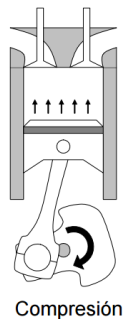


Figura 3. Etapa de Compresión (Motores Térmicos)

Combustión: Cuando el pistón del cilindro llega al PMS y la mezcla aire-combustible ha alcanzado su máxima compresión, se genera una chispa para el encendido de la mezcla

provocando una explosión y un rápido desplazamiento del pistón en sentido descendente como se observa en la Figura 4.

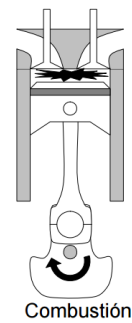


Figura 4. Etapa de Combustión (Motores Térmicos)

Escape: Una vez que el pistón se encuentra en el PMI, se abre únicamente la válvula de escape, mientras el pistón inicia nuevamente su movimiento ascendente para luego permitir el desplazamiento de los gases generados durante la combustión, logrando que estos salgan directamente por el tubo de escape y por consiguiente a la atmosfera como se observa en la Figura 5.

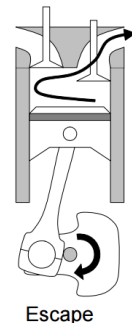


Figura 5. Etapa de Escape (Motores Térmicos)

2.2 Motor Eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica mediante un proceso electromagnético. Ofrece múltiples ventajas en relación al motor de combustión interna, como es la mayor eficiencia, limpieza de las partes, comodidad debido al tamaño, además de la seguridad de funcionamiento.

El funcionamiento del motor se basa en la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas circulantes en una determinada dirección que dan como resultado un par o torque respecto un eje de giro, como se observa en la Figura 6. Donde se muestra como circula una corriente eléctrica, es por un material conductor que se encuentra dentro de la acción de un campo magnético. Al colocar una espira dentro de un campo magnético en el que fluya una determinada intensidad de corriente, el campo ejercerá una fuerza tangencial a la espira dando lugar a un momento de fuerzas, produciendo una rotación y dicho movimiento será el producto de las interacciones electromagnéticas de donde la energía inicial eléctrica será transformada a energía mecánica de rotación aprovechable para otra aplicación.

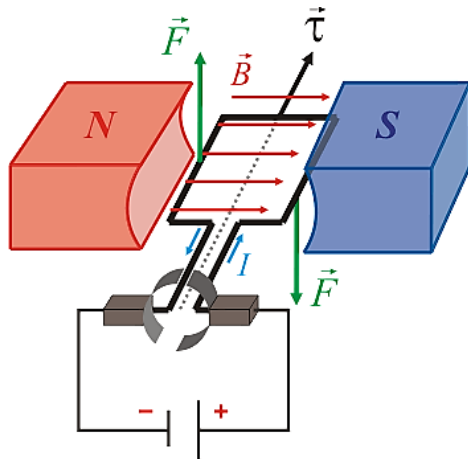


Figura 6. Campo de fuerzas magnéticas (Motor eléctrico)

2.3 Generador

Al contrario de un motor eléctrico que requiere de energía eléctrica para operar, el generador por intermedio de un movimiento rotario produce energía eléctrica, es decir convierte la energía mecánica inicial en corriente eléctrica susceptible de alimentar a una gran variedad de aparatos. Esto sigue el principio de la ley de inducción electromagnética, donde al tomar en cuenta el giro de una espira dentro de un campo magnético se producirá una variación del flujo magnético de la espira a través del campo, generando una corriente eléctrica.

La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida depende del ritmo de cambio del flujo, sin importar el número de líneas de campo atravesando el circuito, sino su variación por unidad de tiempo. Se produce debido al movimiento relativo de los conductores sobre el estator dentro de un campo magnético.

2.3 Inversor

Un inversor transforma la electricidad de corriente continua (C.C) almacenada en baterías eléctricas en energía de corriente alterna (C.A) y de igual forma en sentido opuesto de C.A a C.C.

Los inversores eléctricos disponen de funciones para iniciar y finalizar la actuación de los generadores automáticamente. Es por esto que su aplicación en el sistema de freno regenerativo es necesaria, además, la capacidad del inversor para procesar distintas formas de energía de entrada, lo convierte en una opción necesaria en aplicaciones de energía portátil, de respaldo y sin conexión directa a la red como en vehículos híbridos y eléctricos.

2.4 Baterías Eléctricas

Las baterías eléctricas son dispositivos que tienen la capacidad de almacenar electricidad en forma de energía química para posteriormente mediante procesos electroquímicos producir energía eléctrica. La gran utilidad de estos dispositivos es que permiten repetir dicho proceso un determinado número de veces.

El principio de funcionamiento de una batería eléctrica está basado esencialmente en un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación (redox). Un proceso en el cual uno de los componentes se oxida, es decir pierde electrones y el otro componente se reduce o gana electrones de tal forma que ambos no resultan consumidos sino únicamente cambian estados de oxidación y dependiendo las circunstancias externas, vuelven a su estado original, como por ejemplo el cierre del circuito eléctrico o la aplicación de una corriente externa.

Un circuito eléctrico cerrado inicia una reacción electroquímica de reducción oxidación entre los electrodos, donde cada electrolito reacciona con un químico o elemento especial. En el ánodo, una reacción de oxidación provoca una transferencia de electrones desde una sustancia o compuesto hacia otra, formando un compuesto ionizado negativamente, es decir con exceso de electrones, para el cátodo en cambio el electrolito y el agente químico forman una reacción de reducción, es decir cuando un reactivo químico acepta electrones.

2.5 Configuraciones del Vehículo Híbrido

Los distintos tipos de vehículos híbridos basan su diferencia en la posición y configuración de sus elementos en cómo están relacionados y la interacción entre ellos permiten mejorar la autonomía del automóvil, dependiendo del tipo de configuración dada, el sistema de frenos regenerativos tendrá una mayor o menor utilidad.

El factor determinante para un adecuado diseño es el sistema completo de transmisión ya que este permite en un primer caso transferir independientemente la potencia del motor de combustión interna o del motor eléctrico hacia las ruedas motrices y en un segundo caso transmitir conjuntamente la potencia generada por ambos motores, estos elementos de transmisión están sometidos a esfuerzos constantes de torsión y flexión.

En el caso de transmisión de potencia únicamente por el motor de combustión interna, esta empieza en el volante de inercia conectado al embrague, seguido por el acople a la caja de cambios y terminando en el árbol de transmisión que otorga el movimiento final a las ruedas del vehículo. Para el caso de la transmisión de potencia a través del motor eléctrico el seguimiento es similar donde se mejoran los procesos de transmisión de movimiento (caja de cambios) debido a que las revoluciones entregadas por este último son mucho más exactas y precisas.

Al disponer de un motor delantero con tracción delantera o con un motor trasero de tracción trasera no es necesario el árbol de transmisión ya que el par generado por cada motor es transmitido directamente a través de ejes más cortos.

2.6 Híbrido Conectado en Serie

En un vehículo híbrido al estar conectado en serie el motor de combustión interna proporciona únicamente el movimiento de rotación hacia un generador eléctrico, donde esta carga

directamente las baterías del vehículo si se encuentran descargadas, o a su vez transmite una mayor potencia hacia el motor eléctrico dependiendo del requerimiento energético del vehículo. El generador se utiliza principalmente para extender autonomía del automóvil permitiendo ampliar las prestaciones de este, de tal forma que en la mayoría de los kilómetros se utiliza la energía proveniente de las baterías y en el caso que el viaje exceda las prestaciones de la batería o su capacidad el generador eléctrico se enciende. La corriente producida por el generador es rectificada en el inversor/cargador.

Dependiendo de varios factores como la capacidad de almacenamiento de las baterías, el espacio disponible en el vehículo, la velocidad o la cantidad de energía disponible se dimensionan equipos generadores de mayor o menor tamaño.

La batería se dimensiona en función de los picos de demanda, de tal forma que a altas velocidades solo una parte de la energía eléctrica proviene de las baterías siendo estas las que suministran la potencia necesaria para aceleraciones y adelantamientos, en cambio a velocidades crucero la potencia generada en exceso es utilizada para recargar las baterías.

En la Figura 7 se puede observar el flujo energético de cada elemento del vehículo híbrido, durante el frenado regenerativo la propia inercia del vehículo rota el sistema de propulsión o eje de transmisión que produce una energía mecánica directamente sobre el motor eléctrico (que en un inicio otorgaba el movimiento al eje) logrando que de esta forma opere como un segundo generador eléctrico cuya energía es recargada y almacenada inmediatamente en las baterías.

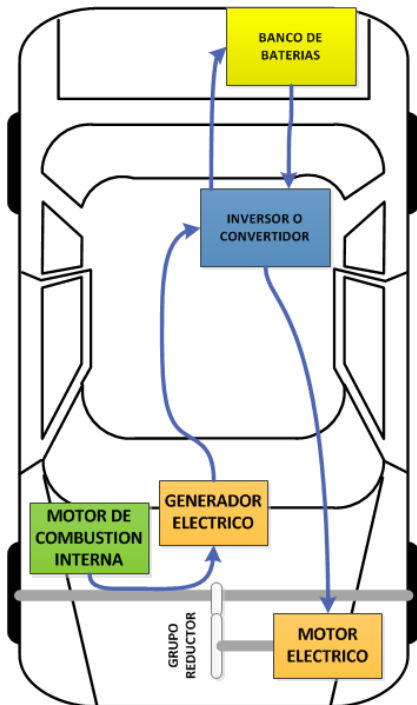


Figura 7. Disposición de Elementos en vehículo Híbrido Serie

2.7 Híbrido Conectado en Paralelo

En este tipo de configuración el vehículo utiliza dos sistemas de tracción en paralelo de tal forma que estos pueden ser

utilizados independientemente o simultáneamente si se desea una mayor potencia en el vehículo. Estos 2 sistemas proveen la potencia necesaria a las ruedas y si bien esta configuración es más compleja resulta ser más eficiente debido a que se minimizan las pérdidas por conversión de cada tipo de energía.

Además, como el aumento de potencia le corresponde directamente al motor de combustión interna es posible la reducción del tamaño de las baterías, el motor a gasolina entra en funcionamiento cuando existe una mayor demanda de energía por parte del vehículo, y al detenerse el vehículo híbrido aprovecha la energía normalmente empleada en frenar para recargar su propia batería.

Dentro de los vehículos híbridos paralelos se pueden distinguir dos tipos: los que emplean un generador independiente para cargar las baterías y los que aprovechan el motor eléctrico para funcionar también como generador, este último será el encargado del freno regenerativo permitiendo la desaceleración del vehículo y logrando recuperar energía mientras el motor eléctrico actúe como generador.

Un generador independiente en el vehículo híbrido produce notablemente un aumento en la generación de energía eléctrica, sin embargo, no resulta ser la decisión más adecuada ya que conlleva al transporte de elementos más pesados en el automóvil requiriendo a su vez mayor potencia y volviéndolo más costoso. La ventaja de utilizar dicho generador independiente es que al estar diseñado para funcionar únicamente como generador será más eficiente frente a un motor eléctrico que opere paralelamente como generador. Es por ello que se debe realizar un análisis entre peso/beneficio al momento de integrar más elementos al vehículo, ver Figura 8.

Al decidir acoplar un generador independiente dentro de la misma configuración híbrida paralela se la clasifica como vehículo híbrido paralelo-serie siendo esta configuración la más utilizada por fabricantes de automóviles como por ejemplo Toyota en su modelo Prius (Página oficial de Toyota).

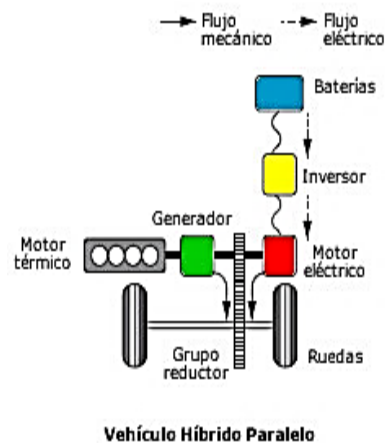


Figura 8. Configuración de vehículo Híbrido en Paralelo (Aficionados a la mecánica)

2.8 Freno Regenerativo

El funcionamiento del sistema de freno regenerativo se da desde el motor de combustión interna del vehículo, una vez

que el combustible ingresa al motor térmico en este se producen transformaciones de energía el cual desarrolla la potencia necesaria para permitir el movimiento lineal de los pistones hacia el cigüeñal, seguido de ello existe un movimiento rotatorio el cual se lo aprecia directamente en el volante de inercia o cigüeñal.

Una vez obtenido el movimiento en el volante de inercia es necesario aumentar o disminuir esta potencia generada a través de diferentes sistemas de transmisión, los cuales por medio de caja de cambios y diferentes configuraciones de engranajes permitirán el desplazamiento del vehículo en las variadas exigencias de la carretera. Paralelamente en este punto existe el sistema de embrague que es el encargado de conectar o desconectar este movimiento rotatorio final a las ruedas del automóvil.

Hasta este punto la similitud con un automóvil estándar es la misma sin embargo como automóvil híbrido existe el motor eléctrico que es responsable de igual manera del desplazamiento del vehículo entregando una potencia mucho más precisa sobre todo en condiciones de baja exigencia, se debe señalar la idea fundamental del vehículo híbrido es su desplazamiento por medio del motor eléctrico y cuando las exigencias del automóvil aumentan. Paralelamente el motor de combustión complementa la falta de potencia, logrando un mayor torque en las ruedas.

Si el automóvil se desplaza a bajas velocidades sin mayor exigencia para el motor eléctrico es posible que únicamente este desarrolle la energía necesaria para el desplazamiento. Cuando el vehículo únicamente se desplaza por la carretera como producto de la inercia que conlleva es posible controlar y permitir que el motor eléctrico invierta su operación y actúe como generador eléctrico logrando así, por medio del movimiento rotativo existente la regeneración de energía eléctrica, la cual es almacenada en las baterías del vehículo.

Es posible regenerar energía que normalmente se pierde al frenar el vehículo y se manifiesta en forma de calor en el instante cuando se presiona el pedal del freno, en este punto en un vehículo híbrido el motor eléctrico invierte su polaridad iniciando su operación como generador.

Si bien la energía recuperada será menor, al magnificar este método se visualiza un aumento considerable en la energía disponible de las baterías, logrando una mayor eficiencia total del sistema. Con la energía eléctrica recuperada y almacenada en las baterías es posible utilizarla como fuente propia de desplazamiento en el vehículo.

3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

3.1 Sistemas Necesarios

El sistema de frenos regenerativos está compuesto de varios elementos que permiten desarrollar correctamente el proceso de regeneración y almacenamiento de la energía, los más importantes son el motor de combustión interna, motor/generador eléctrico, inversor, baterías y la transmisión.

3.2 Motor de Combustión Interna

Permite generar la suficiente potencia para el desplazamiento del vehículo o bien dependiendo de la configuración que se tenga en el automóvil. Esta proporciona el movimiento motriz que será parte del generador eléctrico en una siguiente etapa, estos pueden clasificarse de acuerdo a la disposición de sus cilindros como: motores en línea, motores en V, y motores de cilindros opuestos (Bóxer).

Dependiendo de la configuración de cada uno de ellos se verá reflejado en el rendimiento del automóvil. Se debe señalar que si bien existe una gran variedad de motores de combustión interna los más utilizados y escogidos en el empleo del sistema de frenos regenerativos son los mencionados.

3.3 Motor Generador Eléctrico

El motor eléctrico es el encargado de suministrar la potencia necesaria al sistema de engranajes o caja de cambios que logran administrar de manera eficiente el par necesario a las ruedas motrices del automóvil, se pueden clasificar de acuerdo al tipo de corriente utilizada como motores de corriente alterna (motores de jaula de ardilla), motores de corriente continua (motores sin escobillas, los servomotores y los motores paso a paso) y motores universales (funciona como motor de corriente continua o como motor de corriente alterna).

El generador eléctrico es el encargado de transformar la energía proveniente en forma mecánica del motor de combustión interna a energía eléctrica administrable por el motor eléctrico, estos pueden ser electromecánicos. Se debe señalar que existen en el sistema de freno regenerativo otros tipos de generadores como electroquímicos, los cuales son básicamente pilas o baterías recargables de acumuladores, basados en fenómenos electroquímicos y generadores fotovoltaicos correspondientes a los paneles fotovoltaicos.

3.4 Inversor y Baterías

Encargado de convertir el voltaje en la entrada, de corriente continua proveniente de las baterías del vehículo a corriente alterna apta para el motor eléctrico de acuerdo a la magnitud y frecuencia deseadas del sistema. Las baterías serán las encargadas de almacenar la energía eléctrica generada previamente.

3.5 Transmisión

Se entiende como transmisión a los equipos y elementos que permiten el acople y las conexiones entre los demás subsistemas como pueden ser engranes rectos, engranes helicoidales, conexiones por cadena incluyendo acoples mediante engranes epicicloidales, estos elementos requieren de un gran análisis a fin de permitir la correcta transmisión del movimiento, disminuyendo pérdidas por efectos de calor o rozamiento, evitando sobrecargas como producto de aceleraciones o frenadas repentinas en el vehículo.

3.6 Método de Evaluación

El método de evaluación a utilizar será el descrito por el Dr. Carles Riba en su libro *Diseño Concurrente* [9], el cual se basa en los criterios ponderados, permite decidir entre diversas o varias soluciones donde únicamente basta conocer el orden de preferencia en la etapa de diseño conceptual, es por ello que se recomienda el método ordinal corregido de criterios ponderados que sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, permite obtener resultados globales suficientemente significativos.

Este método se basa en la formulación de tablas donde cada criterio o solución, se confronta con los restantes criterios o soluciones y se asignan los siguientes valores: 1 (Uno) Si el criterio o solución de las filas es superior o mejor que el de las columnas; 0,5 Si el criterio o solución de las filas es equivalente o igual al de las columnas; 0 Si el criterio o solución de las filas es inferior o peor que el de las columnas.

En cada criterio o solución, se deberán sumar los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se le añade una unidad (1) para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula; después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio o solución. La evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

3.7 Criterios de Evaluación

Los criterios de evaluación se basan en las principales características al momento de comparar vehículos híbridos versus vehículos estándar que no permiten el empleo del freno regenerativo, en este aspecto priman detalles sobresalientes como el costo de cada elemento individual, la funcionalidad de cada equipo permitiendo que cada elemento opere eficientemente con un gasto mínimo de energía, así como la fácil operación de cada uno de ellos sin recurrir a sistemas complejos para su funcionamiento, el peso para cada elemento representa una característica primordial en cuanto a optimización del vehículo híbrido, el tiempo de mantenimiento requerido en cada elemento o equipo es un factor clave para la elección de cada subsistema gracias a que permite una mayor acogida por parte del usuario, se debe mencionar que criterios tales como seguridad de los elementos involucrados y fiabilidad son tomados en cuenta en cada aspecto a evaluar debido a que son criterios netamente inherentes en todo proceso de diseño mecánico.

3.8 Costo

El costo total de los elementos que conforman el sistema de freno regenerativo es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el diseño mecánico debido que este debe representar un beneficio para el usuario al compararlo con automóviles estándar, por esta razón se deberá buscar un equilibrio entre el costo y la calidad final del diseño permitiendo flexibilizar la eficiencia de la máquina. Se debe mencionar que el costo señalado hace referencia al costo de

fabricación y/o adquisición de elementos, así como, accesorios o materia prima que permiten el desarrollo del sistema de frenos regenerativos.

3.9 Funcionalidad

Este criterio de valoración es determinante en el desarrollo del sistema de frenos regenerativos ya que permite establecer la relación entre la facilidad y rapidez con que el sistema puede adaptarse a una determinada operación, la cual es de regenerar la energía.

3.10 Facilidad de operación

Este criterio de valoración implica directamente el trabajo de cada elemento presente en el sistema de frenos regenerativos, es decir, la facilidad con que estos elementos interactúan, evitando componentes mucho más complejos que incrementan el costo o dificultan la operación del sistema.

3.11 Peso

Este criterio de valoración es determinante en la eficiencia final para el vehículo híbrido, debido a que será necesario el menor peso posible en la maquinaria a fin de conseguir las mejores prestaciones por el automotor sin necesidad de pesos agregados por complejidades del sistema.

3.12 Mantenimiento

Como en todo sistema ya sea eléctrico o mecánico, es necesario siempre un correcto y adecuado mantenimiento acorde a las exigencias de operación de los elementos relacionados con el sistema de freno regenerativo, de tal forma que con un mantenimiento a tiempo y un adecuado acceso a los componentes que requieren de revisión es posible la detección y corrección de piezas mecánicas o eléctricas con mayor tendencia a fallas, tales como desgaste y corrosión.

A su vez estos elementos que conforman el sistema de freno regenerativo dependen de que los parámetros de causas de fallas sean mantenidos dentro de los límites aceptables, por ello este criterio de valoración es importante a fin de conseguir los mejores resultados de la máquina en todo momento.

3.13 Alternativa de Diseño Seleccionada

De acuerdo a los resultados obtenidos de cada sistema del freno regenerativo, el diseño estará configurado como vehículo híbrido en serie y constituido conforme los elementos señalados de Motor de combustión interna en línea 4 cilindros DOHC, Motor / Generador Sincrónico de Corriente Alterna, Inversor con baterías de Ion-Litio y Grupos reductores conformados por engranes helicoidales.

3.14 Descripción General del Sistema de Freno Regenerativo

Una vez seleccionados cada uno de los elementos que forman parte del sistema del freno regenerativo, se plantean las características, funcionamiento y ubicación de los mismos dentro del vehículo híbrido.

Primeramente, el vehículo híbrido de configuración en serie pone en evidencia de acuerdo a las valoraciones previas que resulta ser el más eficiente, en comparación con las demás configuraciones híbridas. Sin embargo, este resultado no pretende desmerecer las demás clasificaciones debido a que cada uno tiene sus propios requerimientos funcionales y para el sistema a diseñar propuesto la mejor alternativa radica en la utilización mayoritaria de la corriente eléctrica.

El motor de combustión interna seleccionado es de 4 tiempos en línea con DOHC (doble árbol de levas), este sistema será el encargado de suministrar la suficiente energía única y exclusivamente al primer generador eléctrico.

El generador seleccionado es sincrónico de corriente alterna. La energía eléctrica producida por este elemento será almacenada en baterías NIMH (baterías de níquel-metal hidruro) o de Ion Litio según sea el caso como en el automóvil Toyota Prius [5]. Sin embargo, para que se desarrolle este proceso es necesario la incorporación de un inversor/cargador que permitirá el paso para la regeneración, donde se adicionará un convertidor DC/DC para el control de energía de regeneración para alcanzar la conversión de la corriente eléctrica alterna en corriente continua almacenable en las baterías.

Cuando el vehículo híbrido requiera una mayor potencia, la corriente producida en el primer generador (por parte del motor de combustión interna) pasará directamente al motor eléctrico, entregando una mayor fuerza electromotriz y permitiendo el aumento de la velocidad del automóvil.

Si bien bajo esta configuración híbrida seleccionada se dispone de un generador que opera únicamente como tal. La incorporación de un motor eléctrico con las mismas características permitirá el funcionamiento de este elemento en forma de generador siempre y cuando el vehículo opere en marcha neutra. Por inercia propia o cuando inicie el proceso de frenado y en este instante el movimiento producido por las ruedas motrices del automóvil se transmitirá directamente hacia el motor eléctrico que en este caso ya actúa como un segundo generador produciendo corriente eléctrica y conformando el freno regenerativo. Es decir, este permite disminuir la velocidad de desplazamiento del vehículo y regenerar la energía.

Al operar el motor eléctrico como generador, la corriente eléctrica producida será re-direccionada hacia las baterías permitiendo recargarlas y utilizar esta energía extra en otro instante. A continuación la Figura 9.

Bajo esta configuración se tiene independencia en la ubicación del motor de combustión interna y es posible ubicarlo en la parte posterior del vehículo ya que opera únicamente con el primer generador. El motor eléctrico necesitará un acople con un grupo reductor de engranajes helicoidales que permitan transmitir la potencia necesaria al eje de transmisión del vehículo.

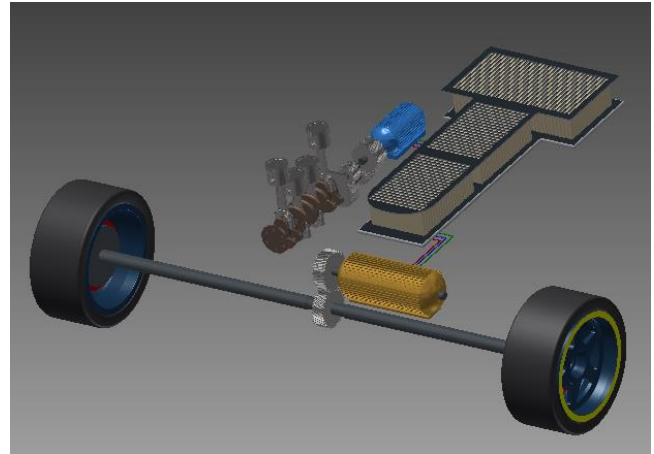


Figura 9. Esquema del freno regenerativo

4. DISEÑO DEL SISTEMA

4.1 Cálculo de la Potencia del Motor

En las especificaciones dadas para el sistema de freno regenerativo deben considerarse elementos livianos a fin de mejorar la eficiencia del vehículo, el motor de combustión interna deberá tener un equilibrio entre un peso adecuado y una potencia acorde a las exigencias del usuario permitiendo una potencia mínima estable que logre mover eficientemente al generador eléctrico, además debe ser compacto y que permita su fácil ubicación en el vehículo.

El requerimiento de potencia del motor de combustión interna es un parámetro importante a tener en cuenta, debido a que permitirá una adecuada transmisión del par motriz hacia el generador eléctrico por medio de una velocidad y aceleración angular seleccionada y que permitirán la recarga de las baterías una vez producida la corriente eléctrica en el generador.

La potencia generada dependerá directamente de la cilindrada del motor, de acuerdo a los automóviles existentes se presentan cilindradas desde 1400cm^3 , y debido a que es un automóvil liviano, compacto que no estará solicitado a grandes exigencias de trabajo más que únicamente el desplazamiento de los usuarios y pequeñas cargas se selecciona dicho valor; Se calcula la superficie de pistón que se encuentra directamente en contacto con la mezcla aire-combustible proveniente de las válvulas de admisión y escape dentro de la cámara del cilindro. A continuación la Figura 10.

Se realizó una comparación entre valores de diámetros y carreras adecuadas que cumplan con la cilindrada del motor, sin embargo, la mejor selección resulta ser con diámetro de 73,70 mm y carrera de 83 mm otorgando una cilindrada igual a $1399,26\text{cm}^3$, esto posibilita una correcta selección del motor de combustión interna sin necesidad de sobredimensionar elementos del tren de propulsión que al final repercuten en el propio peso del vehículo.



Figura 10. Elementos Biela-Pistón

Para un valor de 3000 [N] de la fuerza generada por la combustión de los gases sobre el pistón se puede conocer el valor del torque generado en el motor dando como resultado 123 [Nm] de par motor.

De acuerdo al resultado obtenido se tiene una presión efectiva de 11,04 bar con lo cual se calcula la potencia total del motor de combustión interna. Las revoluciones del motor (n) corresponden a 4800 rpm con ello la potencia total generada por el motor de combustión interna será de aproximadamente 62 [KW] que serán entregados al reductor de velocidades previo a la conexión con el generador eléctrico.

4.1.1 Transmisión, Tren de Engranajes

La potencia calculada del motor de combustión interna permite diseñar el tren de engranajes o reductor de velocidades que será acoplado al generador, las revoluciones de operación del generador son de 1800 [rpm] de acuerdo a la frecuencia de trabajo (60 Hz), esto obliga al motor de combustión interna que entrega 4800 [rpm] a reducir sus revoluciones hasta un valor óptimo de operación cercano a 1800 rpm, para ello se diseña el subsistema que estará compuesto por 4 engranes reductores.

4.1.2 Cálculo de la Relación de Transmisión

Para el cálculo de la relación de transmisión se escogen las revoluciones pertenecientes al reductor de velocidades y la revolución final que se pretende lograr para los engranes las cuales son w_2 igual a 4800 [rpm] y w_5 igual a 1800 [rpm]

4.1.3 Cálculo del Número de dientes

Para un reductor de velocidad de menor tamaño se busca que el número de dientes para los engranes impulsores e impulsados sean iguales debido a que el tamaño final del reductor está limitado por su volumen y la disponibilidad de espacio en el vehículo híbrido, en este caso al ser más pequeño

mejora la eficiencia del vehículo por lo cual se igualan el número de dientes para N_2 y N_4 en el primer caso (impulsores) y N_3 , N_5 en el segundo caso (impulsados), de acuerdo al análisis realizado en la simulación de Inventor AutoDesk, el número de dientes de los engranes impulsados será de $N_3 = 26,12$ aproximadamente 26 dientes.

4.1.4 Cálculo de Revoluciones de Engranajes

Para obtener las revoluciones de cada engrane del reductor de velocidades se despeja w_5 obteniendo un valor de 1817,75 [rpm], el reductor de velocidad opera aproximadamente a 1800 rpm. Se conoce que w_2 es igual a 4800 rpm por ser el piñón o engrane impulsor inicial del motor de combustión interna y w_3 es igual a w_4 por encontrarse ambos engranes en el mismo eje de operación y por consiguiente giran a la misma revolución

4.2 Cálculo de Pares de Torsión de Engranajes

Con las revoluciones obtenidas para cada engrane del reductor de velocidades se procede a calcular los pares de torsión de acuerdo a la relación de potencia de cada uno de ellos.

4.2.1 Diámetros de Engranajes

De acuerdo a los valores obtenidos se procede a calcular los diámetros para los engranes del reductor de velocidades, el paso diametral escogido es de 7 [dientes/pulgada].

$$d_2 = d_4 = 2,285 \text{ [pulg]}$$

$$d_3 = d_5 = 3,714 \text{ [pulg]}$$

Los diámetros obtenidos serán los valores requeridos para realizar el cálculo en el diseño de engranes.

4.2.2 Velocidades de línea de paso

Es la velocidad lineal de un punto sobre el engrane en el radio del círculo de paso.

La velocidad de la línea de paso Engrane 2,3 se la muestra en la Ecuación 1.

$$V_{23} = 2871,41 \left[\frac{\text{pies}}{\text{min}} \right] \quad (1)$$

Velocidad de la línea de paso Engrane 4,5. Ecuación 2.

$$V_{45} = 1767,021 \left[\frac{\text{pies}}{\text{min}} \right] \quad (2)$$

4.3 Cálculo de Cargas Transmitidas

Para el diseño de engranes se especifica la potencia y la velocidad.

Las cargas transmitidas al engrane 2,3, están en la Ecuación 3.

$$W_{23}^t = 955,50 \text{ [lbf]} \quad (3)$$

Las cargas transmitidas al engrane 4,5, están en la Ecuación 4.

$$W_{45}^{\dagger} = 1552,68 \text{ [lbf]} \quad (4)$$

El valor obtenido correspondiente al engrane 4 es el más crítico por ser el de menor tamaño (se debe señalar que el engrane 5 es de mayor tamaño por lo cual no es el elemento crítico a tomar en cuenta inicialmente) y el engrane 4 deberá transmitir la mayor cantidad de carga en el tren de engranajes, se realizan los cálculos respectivos en base a este elemento, el cual soportará los mayores esfuerzos de contacto que son un factor limitante.

En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos para el grupo de engranes reductores calculados inicialmente.

Tabla 1. Valores Obtenidos de Engranes para el Reductor de Velocidades.

	Engrane 2	Engrane 3	Engrane 4	Engrane 5
Número de dientes (N)	16	26	16	26
Velocidad angular [rpm]	4800	2954	2954	1800
Par de Torsión [lbf-pie]	90,97	147,83	147,83	240,22
Diámetro [pulg]	2,28	3,71	2,28	3,71
Velocidad lineal [pie/min]	2871,41	2871,41	1767,021	1767,021
Cargas Transmitidas	955,5	955,5	1552,68	1552,68
Factor Dinámico	1,3166	1,3166	1,1751	1,1751
Ancho de cara [pulg]	2	2	1,5	1,5
Factor de distribución de carga	1,1338	1,1338	1,1677	
Esfuerzo de contacto [Kpsi]	150	150	158	158
Esfuerzo a la flexión [Kpsi]	25	19	28	22
Numero de ciclos [rpm]	2,88 x10 ⁹	1,77 x10 ⁹	1,77 x10 ⁹	1,09 x10 ⁹
Factor de seguridad a flexión	2,16	2,76	2,26	2,5
Factor de seguridad a desgaste	1,31	1,33	1,61	1,43
Resistencia a la Fatiga Superficial [Kpsi]	225	225	275	225
Resistencia a la flexión [Kpsi]	65	65	75	65

Generador Eléctrico

Para realizar los cálculos de potencia en el generador eléctrico se toma en cuenta a los elementos con los cuales está conectado y como se revisó previamente en el reductor de velocidades el último elemento que entra en contacto es el engrane 5, de aquí se obtiene el par de torsión adecuado con el cual operará el generador.

4.4 Cálculo de la Potencia Electromagnética

La potencia electromagnética es el producto del par electromagnético por la velocidad angular del rotor

$$P_i = 61 \text{ [KW]}$$

Para dicho valor de potencia electromagnética no se han tomado en cuenta las propias pérdidas de potencia por efectos de fricción y calentamiento entre los elementos implicados como los engranes y el rotor del generador, la potencia real del generador es de aproximadamente 53 [kW].

4.5 Consumo y Regeneración de Energía Eléctrica

Para determinar el consumo de energía se parte de la potencia entregada por el motor eléctrico, el análisis realizado corresponde a 110 [KW] de potencia los cuales son utilizados durante 1 hora para operar el vehículo, de ello se asumen frenadas por parte del usuario o desplazamiento del vehículo sin aceleración (movimiento por inercia propia) de donde se obtienen los siguientes datos. Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de Energía Recuperada al Tiempo Específico de Frenado.

	Energía Demandada durante 1 hora [W/h]:		105000 [W/h]	
	Minutos	Segundos	Energía Recuperada [W]	
Tiempo de Frenado o Desplazamiento del Vehículo sin Aceleración durante 1 hora de Funcionamiento	3	180,0	5 250	5%
	3,5	210,0	6 125	6%
	4	240,0	7 000	7%
	4,5	270,0	7 875	8%
	5,0	300,0	8 750	8%
	5,5	330,0	9 625	9%
	6	360,0	10 500	10%
	6,5	390,0	11 375	11%
	7	420,0	12 250	12%
	7,5	450,0	13 125	13%
	8,0	480,0	14 000	13%
	8,5	510,0	14 875	14%
	9	540,0	15 750	15%
	9,5	570,0	16 625	16%
	10	600,0	17 500	17%
10,5	630,0	18 375	18%	
11,0	660,0	19 250	18%	
11,5	690,0	20 125	19%	
12	720,0	21 000	20%	
12,5	750,0	21 875	21%	
13	780,0	22 750	22%	
13,5	810,0	23 625	23%	
14,0	840,0	24 500	23%	
14,5	870,0	25 375	24%	
15	900,0	26 250	25%	
15,5	930,0	27 125	26%	

En la Figura 11, se puede observar el porcentaje de energía recuperada aumenta considerablemente conforme el tiempo de frenado es mayor.

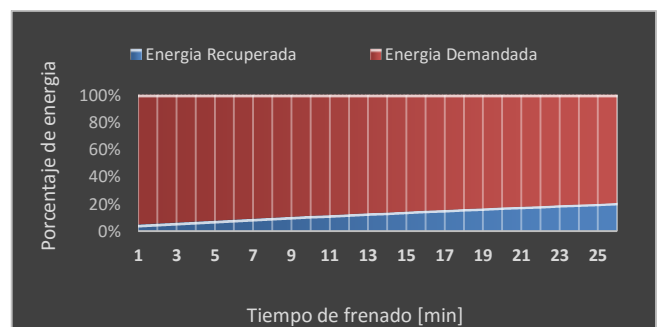


Figura 11. Tiempo de Frenado Vs Porcentaje de Energía

5. CONCLUSIONES

Se concluye que si es posible diseñar el sistema de freno regenerativo para vehículos híbridos de acuerdo a las especificaciones planteadas inicialmente. Se han seleccionado los elementos que intervienen directamente sobre el sistema permitiendo describir cada proceso por separado.

Al contar un vehículo con frenos regenerativos el aumento de la energía disponible se ve reflejada directamente en la autonomía del vehículo ya que logra un mayor kilometraje consumiendo la misma cantidad de energía.

El principal desafío en el diseño del proyecto radica en el poder transmitir eficientemente la potencia otorgada por los equipos y la cantidad de energía disponible por los distintos elementos compuestos en el freno regenerativo, el análisis comparativo realizado entre varios modelos de equipos y elementos dan por determinado que la mejor opción es la conexión mediante engranes helicoidales.

El conocer los esfuerzos a los que están solicitados los elementos del freno regenerativo permiten tener una idea mucho más clara de la factibilidad de cada uno, permitiendo de esta manera establecer geometrías, fuerzas y medidas diferentes para cada equipo.

Las baterías utilizadas como fuente de almacenamiento de energía eléctrica están sometidas a altos niveles de exigencia y deben ser capaces de contener elevadas cargas con la menor masa posible siendo un objetivo primordial el reducir el peso del vehículo para aumentar la autonomía energética del mismo, además están expuestas a rangos de temperatura muy amplios, la posibilidad de accidentes e indeterminados ciclos de carga y descarga.

REFERENCIAS

Aficionados a la mecánica. *Configuración del vehículo híbrido*. Obtenido de: <http://www.aficionadosalamecanica.net/2013/11/>.

Arcos D. Ortiz A. (2012). *Diseño de un sistema de tracción delantera en motocicletas complementando la tracción posterior*. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. E.P.N. Quito, Ecuador.

Biblioteca Virtual. Biblioteca Luis Ángel Arango. *Funcionamiento del motor de combustión Interna*. Obtenido de: <http://www.banrepcultural.org/node/92121>.

Bravo, Nicolás. (2008). *Sistema de Conversión Mecánica Eléctrica para un generador undimotriz*. Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista. Facultad de Ciencias Básicas y Matemáticas. Santiago de Chile. Chile.

Cengel, Yunus. *Termodinámica*. Sexta Edición. Editorial McGraw-Hill. México. 2009.

Faires, V. *Diseño de Elementos de Máquinas*. Cuarta Edición. Editorial Montaner y Simon S.A. Barcelona.

El Rincón de la Tecnología. *Motor de combustión*. Obtenido de: <http://tecnologia-escolapioslogrono.blogspot.com/2011/04/motor-de-combustion.html>.

Kalpakjian, Serope. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Quinta Edición. Editorial Prentice Hall. México. 2009.

Karl-Heinz Dietsche. *Manual de la técnica del automóvil*. Cuarta Edición. Editorial Bosch.

Martínez Salvador. *Electrónica de Potencia Componentes, Topologías y Equipos*. Editorial Paraninfo. México.

Motor eléctrico. *Definiciones básicas de los motores eléctricos*. Obtenido de: <http://acer.forestaes.upm.es/2013/02>.

Motores Térmicos. *Motor de combustión Interna Alternativo*. Introducción, Elementos Constructivos, Clasificación. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Obtenido de: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51445/1/Documento.pdf.

Norton Robert. *Diseño de Máquinas un Enfoque Integrado*, Cuarta Edición. Editorial Prentice Hall. México. 2011.

Página oficial de Toyota. Ecuador. Obtenido de: <http://www.toyota.com/espanol/prius/#/!features>.

Riba Carles. *Diseño Concurrente*. Universidad Politécnica de Cataluña. 2002.

Shigley Joseph. "Diseño en Ingeniería Mecánica". Novena Edición. Editorial McGraw-Hill. Estados Unidos de Norte América. 2012.

Sotomayor, Gómez. Castillo (Enero 2014). *Visual Control of an Autonomous Aerial Vehicle for Crop Inspection*. Revista Politécnica. Volumen 33. Obtenido de: http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/107.