

Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica



**Evaluación y análisis técnico para la transformación mecánica  
de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos.**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Luis Diego Vásquez Rojas

Cartago, 23 de noviembre, 2017



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Luis Diego Vásquez Rojas

Cartago, 23 de noviembre de 2017

Céd: 1-1577-0758



Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica  
Proyecto de Graduación  
Tribunal Evaluador

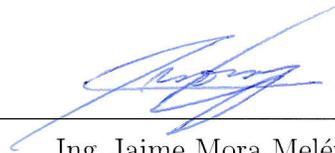
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



---

Dr. Carlos Meza Benavides  
Profesor Lector



---

Ing. Jaime Mora Meléndez  
Profesor Lector



---

Ing. Sergio Morales Hernández  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica.

Cartago, 16 de noviembre de 2017



# Resumen

En este trabajo se analiza la viabilidad técnica de la transformación mecánica de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos.

Primero se determinan las partes mecánicas que deben ser retiradas y las partes que deben ser incorporadas para realizar la conversión de vehículo de combustión interna a vehículo eléctrico. Se indica un procedimiento general para realizar la conversión.

Se analizan los motores utilizados en vehículos eléctricos, de los cuales se determina que el motor de imanes permanentes y el motor de inducción son las opciones más viables para incorporar en la conversión.

A partir de un estudio de las importaciones de automóviles en Costa Rica se determina que los vehículos tipo sedán presentes con mayor viabilidad para conversión son en orden: Toyota Yaris, Hyundai Accent y Nissan Tiida. Se realiza el cálculo de autonomía teórica para cada uno de estos modelos.

**Palabras clave:** vehículo eléctrico, vehículo de combustión interna, transformación mecánica, motor eléctrico.



# Abstract

This work analyzes the technical viability of the mechanical transformation of internal combustion vehicles in electric vehicles.

First, mechanical parts that have to be removed and parts that have to be incorporated are determined. A general procedure for the conversion of internal combustion vehicles in electric vehicles is indicated.

Motors that are used in electric vehicles are analyzed. It is determined that permanent magnet motors and induction motors are the most viable for the conversion.

Automobile importations in Costa Rica are studied. It is determined that sedans with more viability for the conversion are: Toyota Yaris, Hyundai Accent and Nissan Tiida. Theoric autonomy is calculated for the proposed vehicles.

**Keywords:** electric vehicle, internal combustion vehicle, mechanical transformation, electric motor.

*A mis queridos padres por todo el apoyo que me han brindado durante la carrera.*

# Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme dado salud y la fortaleza para realizar este proyecto.

Agradezco a mis padres por haberme apoyado en todo el transcurso de mi carrera.

Agradezco a todas las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo de este proyecto.

Luis Diego Vásquez Rojas

Cartago, 23 de noviembre de 2017



# Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Aspectos generales de vehículos eléctricos y de combustión interna</b>	<b>3</b>
2.1 Sistemas de un vehículo de combustión interna . . . . .	3
2.1.1 Sistema eléctrico . . . . .	3
2.1.2 Sistema de refrigeración . . . . .	3
2.1.3 Sistema de combustible . . . . .	3
2.1.4 Sistema de frenos . . . . .	4
2.1.5 Sistema de dirección . . . . .	4
2.1.6 Sistema de escape . . . . .	4
2.1.7 Sistema de suspensión . . . . .	4
2.1.8 Sistema de potencia . . . . .	4
2.2 Sistemas de un vehículo eléctrico . . . . .	5
2.2.1 Sistema de potencia . . . . .	5
2.2.2 Sistema de almacenamiento de energía . . . . .	5
2.2.3 Sistema eléctrico auxiliar . . . . .	5
2.2.4 Sistema de control . . . . .	5
2.2.5 Sistema de frenado regenerativo . . . . .	6
2.3 Mantenimiento de vehículos . . . . .	6
2.3.1 Mantenimiento general . . . . .	6
2.3.2 Vehículo eléctrico . . . . .	7
2.3.3 Vehículo de combustión interna . . . . .	7
2.4 Comparación de torque en motores de vehículos . . . . .	8
2.4.1 Motor de combustión interna . . . . .	8
2.4.2 Motor eléctrico . . . . .	8
2.5 Caja de velocidades en conversiones . . . . .	9
2.5.1 Caja manual de múltiples velocidades . . . . .	9
2.5.2 Caja de una velocidad . . . . .	10
2.5.3 Caja automática . . . . .	10
2.6 Vehículo eléctrico con caja de velocidades . . . . .	11

<b>3</b>	<b>Comparación de motores eléctricos</b>	<b>13</b>
3.1	Motores eléctricos usados en vehículos eléctricos . . . . .	13
3.1.1	Motores DC . . . . .	13
3.1.2	Motores de inducción . . . . .	13
3.1.3	Motores de imanes permanentes . . . . .	14
3.1.4	Motores de reluctancia variable . . . . .	14
3.1.5	Motores síncronos con anillos colectores . . . . .	14
3.2	Comparación de motores eléctricos . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Piezas a retirar del vehículo de combustión interna</b>	<b>19</b>
4.1	Motor de combustión interna . . . . .	19
4.2	Tanque de combustible . . . . .	20
4.3	Radiador . . . . .	20
4.4	Sistema de escape . . . . .	21
4.5	Alternador . . . . .	22
4.6	Motor de arranque . . . . .	22
4.7	Filtro de aire . . . . .	23
4.8	Recipiente del líquido refrigerante . . . . .	24
4.9	Otras piezas a considerar . . . . .	24
4.9.1	Aire acondicionado . . . . .	24
4.9.2	Dirección hidráulica . . . . .	24
4.9.3	Sistema de suspensión . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Piezas a incorporar en el vehículo</b>	<b>25</b>
5.1	Motor eléctrico . . . . .	25
5.2	Placa adaptadora . . . . .	26
5.3	Acople mecánico . . . . .	26
5.4	Espaciador . . . . .	27
5.5	Tornillos . . . . .	28
5.6	Soporte del motor . . . . .	28
5.7	Bomba de vacío . . . . .	28
5.8	Controlador . . . . .	29
5.9	Acelerador . . . . .	29
5.10	Baterías . . . . .	30
5.11	Soporte de baterías . . . . .	30
5.12	Cargador de baterías . . . . .	30
5.13	Convertidor DC-DC . . . . .	31
5.14	Contactador principal . . . . .	31
5.15	Fusible de alta tensión . . . . .	32
5.16	Shunt . . . . .	32
5.17	Multímetro . . . . .	33
5.18	Interruptor de inercia . . . . .	33
5.19	Disyuntor . . . . .	33

---

5.20	Conector de alimentación . . . . .	33
5.21	Cable para circuito de alta tensión . . . . .	34
5.22	Cable para circuito de baja tensión . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Procedimiento de conversión</b>	<b>35</b>
6.1	Preparación previa del vehículo . . . . .	35
6.2	Incorporación de componentes nuevos . . . . .	37
6.3	Equipo y Herramientas . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Propuesta de vehículos para proyecto piloto de conversión</b>	<b>45</b>
7.1	Cálculo teórico de autonomía . . . . .	48
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Cálculos de potencia y energía</b>	<b>53</b>



# Índice de figuras

2.1	Gráfica de torque en función de la velocidad para un motor de combustión	8
2.2	Gráfica de torque en función de la velocidad para un motor eléctrico . . . .	9
4.1	Motor de combustión . . . . .	20
4.2	Radiador . . . . .	21
4.3	Sistema de escape . . . . .	21
4.4	Alternador . . . . .	22
4.5	Motor de arranque . . . . .	23
4.6	Filtro de aire . . . . .	23
5.1	Motor eléctrico . . . . .	25
5.2	Placa de unión motor-transmisión . . . . .	26
5.3	Acople mecánico . . . . .	27
5.4	Espaciador . . . . .	27
5.5	Tornillo . . . . .	28
5.6	Acelerador . . . . .	29
5.7	Banco de baterías del vehículo Nissan Leaf . . . . .	30
5.8	Contactador . . . . .	31
5.9	Shunt . . . . .	32
6.1	Piezas para colocar el acople en el motor . . . . .	37
6.2	Acople colocado en el motor . . . . .	37
6.3	Espaciador y placa de unión . . . . .	38
6.4	Espaciador y placa de unión . . . . .	38
6.5	Colocación del volante de inercia . . . . .	39
6.6	Ensamble del motor eléctrico . . . . .	39
6.7	Distancia "d" en una vista lateral del ensamble del motor . . . . .	40
6.8	Circuito de alta tensión . . . . .	41
6.9	Circuito de arranque . . . . .	41
A.1	Diagrama de cuerpo libre de un automóvil . . . . .	53



# Índice de tablas

3.1	Tipos de máquinas eléctricas para aplicaciones automotrices . . . . .	15
3.2	Motores principales que se encuentran disponibles comercialmente . . . . .	16
7.1	Importaciones de sedanes por marca . . . . .	46
7.2	Importaciones de sedanes por modelo . . . . .	46
7.3	Modelos con transmisión mecánica, divididos por año del modelo. . . . .	47
7.4	Especificaciones técnicas de los modelos seleccionados . . . . .	47
7.5	Parámetros para el cálculo de autonomía . . . . .	48
7.6	Cálculo de autonomía para los modelos seleccionados . . . . .	48



# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente, los automóviles constituyen un medio de transporte fundamental para las personas, las cuales se trasladan hacia distintos destinos de forma rápida y cómoda. Dentro de los automóviles presentes en Costa Rica, una gran mayoría utilizan combustibles fósiles como fuente de energía, lo que conlleva a una serie de desventajas.

Los vehículos de combustión interna generan grandes cantidades de contaminación al medio ambiente, requieren un mantenimiento continuo para estar en buenas condiciones además de una inversión considerable en combustible. Una alternativa a los vehículos de combustión interna son los vehículos eléctricos, sin embargo, estos actualmente representan una inversión económica importante. Una opción económica es realizar una conversión de vehículos de combustión a vehículos eléctricos, la cual permitiría reducir la contaminación, con una inversión económica menor y aprovechando un vehículo existente. En Costa Rica, la mayoría de la energía eléctrica se produce por medio de energías renovables, por lo que se estaría potenciando la energía limpia. También el costo del mantenimiento y el costo por kilómetro recorrido del vehículo se verían reducidos.

Para el presente proyecto se consideran únicamente automóviles tipo sedán con caja de cambios manual y con un peso menor o igual a 1600 kg, debido a que se adaptan de mejor manera a la incorporación de un motor eléctrico, al requerir una menor cantidad de energía para su movimiento.

Para transformar vehículos de combustión interna en eléctricos se requiere inicialmente identificar una serie de partes mecánicas que deben eliminarse del vehículo original, dentro de las cuales se encontrarán principalmente las relacionadas con el proceso de combustión. Además es necesario incorporar partes nuevas que permitirán al vehículo el movimiento por medio de un motor eléctrico. La selección de las partes nuevas dependerá de características específicas, como la potencia, la velocidad máxima requerida, autonomía, la inversión económica, entre otras.

En este proyecto se requiere identificar y caracterizar las partes mecánicas tanto las que van a ser sustituidas como las que se van a incorporar. Además será necesario indiciar un procedimiento de conversión y las herramientas requeridas para sustituir las piezas

originales e incorporar las piezas nuevas. Este funcionará como guía para cuando sea necesario realizar una conversión en físico, además de que verifica la conversión.

En Costa Rica existe gran variedad de automóviles tipo sedán, por lo que se deben determinar los modelos más comunes. Se estudian las características técnicas de los mismos para determinar en cuáles puede resultar más viable realizar la conversión a vehículos eléctricos. A partir de esto se pretende determinar la viabilidad técnica y económica de iniciar actividades empresariales relacionadas con esta transformación.

Este proyecto tiene como objetivo analizar la viabilidad de la transformación mecánica de vehículos de combustión interna tipo sedán a vehículos eléctricos. Para esto es necesario determinar las partes mecánicas de un vehículo de combustión interna que deben ser sustituidas para el proceso de conversión. Además se deben determinar las partes mecánicas que deben ser incluidas en el vehículo de combustión interna para convertirlo en uno eléctrico. Se debe identificar un procedimiento de conversión de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos.

Se deberán encontrar los modelos de vehículos tipo sedán más comunes en Costa Rica, para analizar sus características técnicas y determinar los que se adapten mejor al proceso de conversión.

En el siguiente capítulo se presentan aspectos generales de los vehículos de combustión interna y eléctricos. En el capítulo 3 se analizan los motores eléctricos que se utilizan en vehículos eléctricos. En el capítulo 4 se presentan las piezas que deben ser retiradas de un vehículo de combustión interna. En el capítulo 5 se indican las piezas que se deben agregar al vehículo para poder convertirlo en eléctrico. En el capítulo 6 se presenta un procedimiento general para realizar la conversión, además de las herramientas y equipo necesario para realizarlo. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan los vehículos tipo sedán más comunes en Costa Rica y el orden de viabilidad para convertirlos en eléctricos.

# Capítulo 2

## Aspectos generales de vehículos eléctricos y de combustión interna

### 2.1 Sistemas de un vehículo de combustión interna

Un vehículo de combustión interna está compuesto por diferentes sistemas: eléctrico, de refrigeración, de combustible, de frenos, de dirección, de escape, de suspensión y de potencia.

#### 2.1.1 Sistema eléctrico

Está compuesto por la batería de 12 V, el alternador, el arrancador, luces, sistemas de instrumentación, sistemas electrónicos, entre otros.

#### 2.1.2 Sistema de refrigeración

Se encarga de refrigerar al motor de combustión. Está compuesto por el radiador, la bomba, las mangueras y el recipiente del líquido refrigerante. El radiador es el encargado de enfriar el líquido refrigerante por medio de la disipación de calor. La bomba se encarga de impulsar el líquido refrigerante por las mangueras y por la parte interna del motor de combustión. El recipiente del líquido refrigerante almacena el líquido caliente que sale del motor y lo conduce nuevamente al radiador para ser enfriado.

#### 2.1.3 Sistema de combustible

Está compuesto por el tanque de combustible, la bomba de combustible y las mangueras. El tanque de combustible almacena la gasolina del vehículo. La bomba de combustible envía la gasolina hacia el motor de combustión por medio de mangueras.

### **2.1.4 Sistema de frenos**

Es el sistema encargado de reducir la velocidad del vehículo o detenerlo completamente. Existe un sistema de frenos para el vehículo en marcha y otro para cuando el vehículo está estacionado. En los automóviles generalmente se utilizan frenos de disco en las ruedas delanteras y frenos de tambor en las ruedas traseras.

### **2.1.5 Sistema de dirección**

Es el sistema encargado de dirigir la dirección del vehículo. Está compuesto por el volante, árbol de dirección y el mecanismo de dirección. Los sistemas de dirección pueden ser mecánicos, asistidos hidráulicamente o asistidos eléctricamente.

### **2.1.6 Sistema de escape**

Es el sistema encargado de expulsar al exterior los gases producidos por el proceso de combustión. Está compuesto por el múltiple de escape, el catalizador, el silenciador y los tubos de conexión. El múltiple de escape se encarga de recoger todos los gases expulsados por el motor, el catalizador transforma estos gases en elementos menos contaminantes, mientras que el silenciador se encarga de reducir el ruido producido por los gases.

### **2.1.7 Sistema de suspensión**

Es el sistema que se encarga de absorber los golpes generados por las irregularidades del terreno. Está compuesto por resortes y amortiguadores.

### **2.1.8 Sistema de potencia**

Está conformado por el motor de combustión interna, el embrague, la caja de velocidades, el diferencial y las barras de transmisión. El motor de combustión interna transforma la energía química del combustible en energía mecánica, lo que genera la rotación del cigüeñal del motor. El embrague regula la transferencia del movimiento rotacional entre el motor y la caja de velocidades. La caja de velocidades se encarga de variar el torque y la velocidad de salida por medio de distintas combinaciones de engranes. La potencia mecánica es transmitida al diferencial, el cual se encarga de distribuirla entre las ruedas motrices por medio de los semiejes. En la configuración de tracción delantera el motor se encuentra en sentido transversal, acoplado junto con la caja de velocidades, el embrague y el diferencial.

## **2.2 Sistemas de un vehículo eléctrico**

El vehículo eléctrico presenta algunos sistemas similares a un vehículo de combustión interna, como el sistema de suspensión, el sistema de dirección o el sistema de frenado general. Sin embargo, también presenta sistemas distintos que se detallan a continuación.

### **2.2.1 Sistema de potencia**

Está compuesto por un motor eléctrico, una caja reductora, un diferencial y ejes de transmisión. El motor eléctrico convierte la energía de las baterías en movimiento rotacional. La caja reductora aumenta el torque generado por el motor reduciendo la velocidad de rotación. El diferencial se encarga de distribuir la potencia a las ruedas por medio de los ejes de transmisión. El vehículo puede presentar tracción delantera, tracción trasera o total. El vehículo eléctrico puede tener varios motores de tracción distribuidos, de forma que se elimina la necesidad del diferencial.

### **2.2.2 Sistema de almacenamiento de energía**

Este sistema está compuesto por las baterías, el cargador de baterías y el sistema de monitoreo de baterías. En las baterías se almacena la energía eléctrica que utiliza el vehículo para su funcionamiento. El cargador se utiliza para recargar las baterías cuando éstas se descargan. El sistema de monitoreo de baterías se encarga de controlar los niveles de tensión y temperatura de todas las celdas que forman el banco de baterías, además de nivelar sus tensiones y evitar sobrecargas.

### **2.2.3 Sistema eléctrico auxiliar**

El sistema eléctrico auxiliar corresponde a todos los dispositivos del vehículo que funcionan con 12 V, como las luces, el radio, los limpia parabrisas, entre otros.

### **2.2.4 Sistema de control**

Este sistema es el encargado de regular la potencia que se suministra al motor eléctrico. Está compuesto por el controlador y un inversor. El inversor se encarga de convertir la corriente directa de las baterías en corriente alterna para poder alimentar al motor. El controlador se encarga de regular la velocidad del vehículo por medio de la lectura del pedal de aceleración, así como controlar el funcionamiento del frenado regenerativo.

### 2.2.5 Sistema de frenado regenerativo

Los vehículos eléctricos con motores de corriente alterna incorporan un sistema de frenado regenerativo que les permite recargar las baterías, así como ayudar a reducir la velocidad del automóvil. Esto permite conservar en mejor estado el sistema de frenado convencional, ya que se reduce su uso.

## 2.3 Mantenimiento de vehículos

### 2.3.1 Mantenimiento general

Un vehículo requiere un mantenimiento continuo de los sistemas que lo componen para funcionar correctamente. Los vehículos eléctricos y los de combustión interna requieren mantenimientos similares en algunas piezas.

Los neumáticos del vehículo se van desgastando con el uso que se les da. Tanto un vehículo eléctrico como uno de combustión interna utiliza neumáticos, por lo que prácticamente requieren el mismo mantenimiento.

Las escobillas para limpiar el parabrisas también se encuentran presentes en ambos tipos de vehículos por lo que requieren ser cambiadas cuando alcanzan su vida útil.

El sistema de frenos también está presente en ambos tipos de vehículos. Se requiere realizar cambios de las pastillas de freno cuando se desgastan así como el cambio del líquido de frenos. Los vehículos eléctricos tienen la ventaja de utilizar frenado regenerativo que reduce el uso del sistema de frenos convencional por lo que este se desgasta en menor medida.

Las luces de los vehículos también están propensas a fallar por lo que se requieren sustituir cuando se dañan. Están presentes tanto en vehículos de combustión interna como en vehículos eléctricos.

El líquido refrigerante se requiere revisar de forma continua principalmente en los vehículos de combustión interna, debido a que el radiador debe enfriar de forma adecuada el motor de combustión. Algunos vehículos eléctricos incluyen sistemas de enfriamiento por líquido para mantener las baterías en la temperatura adecuada, por lo que también requerirían cierto mantenimiento.

### 2.3.2 Vehículo eléctrico

Un vehículo eléctrico requiere, además del mantenimiento general, el mantenimiento de las baterías. Las baterías deben estar en un buen estado para que el vehículo pueda funcionar de forma correcta y pueda desarrollar la autonomía para la que fue diseñado. Sin embargo, cuando las baterías cumplen su vida útil o se dañan, deben ser sustituidas, lo que conlleva a una inversión importante de dinero.

### 2.3.3 Vehículo de combustión interna

Los vehículos de combustión interna requieren una mayor cantidad de mantenimiento con respecto a un vehículo eléctrico.

El aceite del motor debe cambiarse periódicamente para que el motor de combustión funcione adecuadamente. El aceite lubrica todas las piezas que componen el motor y debido a que está expuesto a altas temperaturas, tiene un desgaste considerable. El filtro de aceite también debe ser reemplazado, debido a que debe mantenerse en buenas condiciones para poder filtrar el aceite del motor adecuadamente. Se recomienda cambiar el filtro y el aceite a la misma vez.

El sistema de escape, compuesto por la mufra, el catalizador, el silenciador, el múltiple de escape y demás conductos intermedios requieren de mantenimiento para garantizar su correcto funcionamiento. Además estos componentes se encuentran en la parte inferior del vehículo, por lo que están expuestos a daños de forma más fácil.

Los vehículos de gasolina utilizan bujías en el proceso de combustión que se deben sustituir cada cierto tiempo. La batería de arranque también se debe reemplazar cuando cumple su vida útil.

El filtro de aire elimina las impurezas del aire antes de que este entre al motor. El filtro del aire tiende a saturarse luego de cierto tiempo, por lo que debe sustituirse para que el motor funcione correctamente. El filtro de gasolina elimina las impurezas que se encuentran en el combustible y que pueden afectar el proceso de combustión. Este filtro también tiene una vida útil, y debe sustituirse cuando esta se cumple.

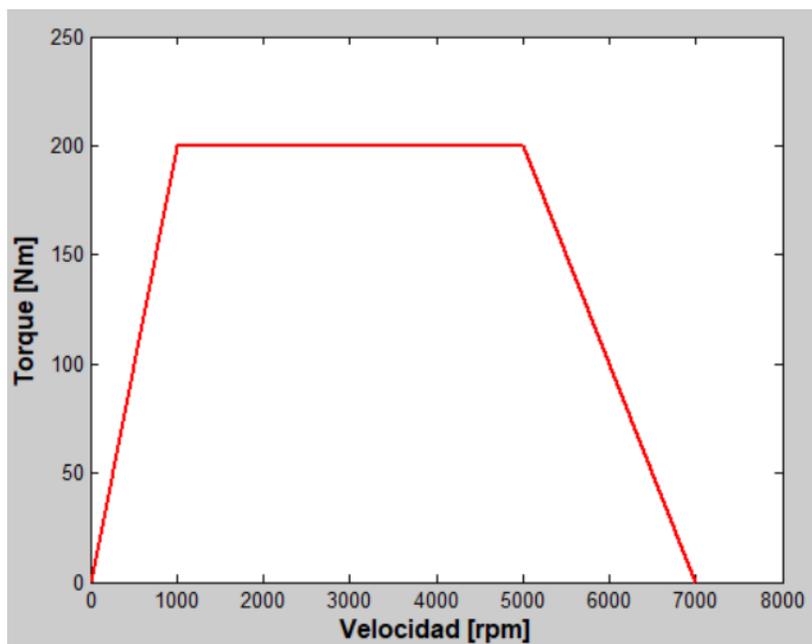
El motor de combustión interna utiliza poleas para transmitir potencia a diversos componentes como el alternador, bomba hidráulica, compresor de aire acondicionado, entre otros. Estas poleas se desgastan debido a su uso continuo por que deben reemplazarse cada cierto tiempo.

En vehículos estándar se utiliza un embrague que conecta la caja de cambios con el motor de combustión. Este embrague conecta estos dos componentes por medio de fricción, por lo que se desgasta con el uso. Esto implica que debe sustituirse cuando sea necesario.

## 2.4 Comparación de torque en motores de vehículos

### 2.4.1 Motor de combustión interna

En la Fig.2.1 se presenta una gráfica con la tendencia general del torque en función de la velocidad. Se puede apreciar que en bajas velocidades, el motor de combustión posee un torque limitado. Por esta razón los vehículos de combustión interna poseen un embrague, el cual les permite desconectarse del resto de la transmisión cuando el vehículo se detiene. Además se aprecia que el rango de velocidades es limitado, por lo que se requieren distintas marchas para alcanzar el rango de velocidades requeridas por el vehículo.

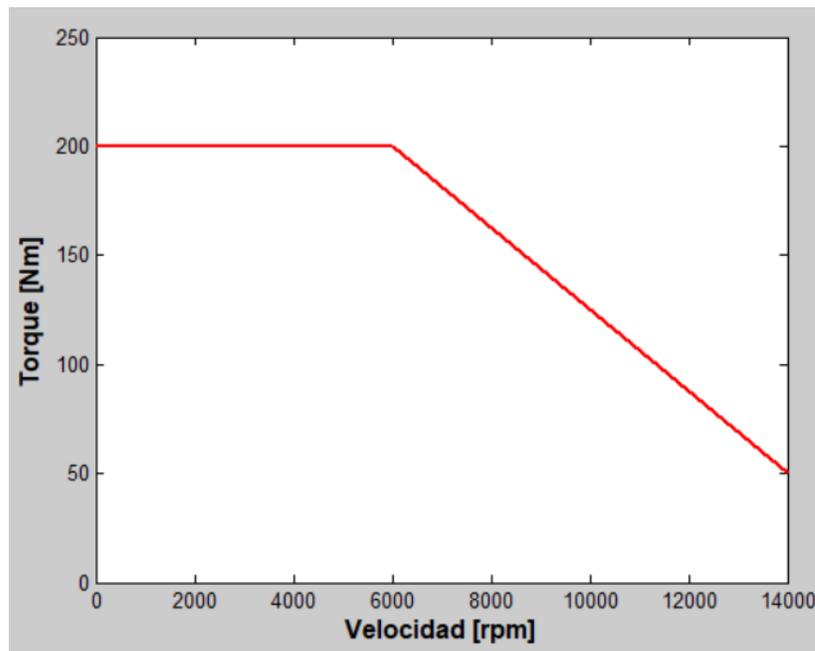


Fuente: propia. Matlab.

**Figura 2.1:** Gráfica de torque en función de la velocidad para un motor de combustión

### 2.4.2 Motor eléctrico

En la Fig.2.2 se presenta una gráfica con la tendencia general del torque en función de la velocidad. Se puede observar que el motor eléctrico genera el torque máximo desde el arranque y lo mantiene durante un rango considerable de velocidades. Esto le permite a los vehículos eléctricos tener aceleraciones altas en velocidades bajas. Además presenta un rango de velocidades bastante alto, que dependiendo del motor, puede ser aún mayor al mostrado en la Fig.2.2. Debido a estas características, un motor eléctrico puede impulsar a un vehículo en el rango de velocidades requeridas utilizando únicamente una relación de engranes adecuada.



Fuente: propia. Matlab.

**Figura 2.2:** Gráfica de torque en función de la velocidad para un motor eléctrico

## 2.5 Caja de velocidades en conversiones

### 2.5.1 Caja manual de múltiples velocidades

En una conversión de vehículo se recomienda mantener la caja de velocidades manual por las siguientes razones:

- Es la forma más simple de realizarlo debido a que la caja de velocidades encaja perfectamente con todos los demás componentes de vehículo. Solo debe realizarse el acople del motor eléctrico con la caja de velocidades.
- Se ahorra la inversión económica que se requeriría para reemplazar la caja de velocidades.
- Permite realizar cambios de marcha para adaptarse a las condiciones de conducción requeridas, ya sea de mayor torque o velocidad.
- Permite utilizar motores eléctricos que no alcanzan rangos de velocidades altos, ya que las marchas varían la velocidad de salida del vehículo.

### 2.5.2 Caja de una velocidad

Los vehículos eléctricos producidos por compañías poseen cajas reductoras de una velocidad. En una conversión se puede intentar realizar lo mismo para obtener los siguientes beneficios:

- Permite ahorrar espacio debido a que es más compacta.
- Se puede seleccionar la relación de engranes que se ajuste de la mejor manera con el motor eléctrico, para obtener el torque y la velocidad máxima deseada.
- Se reduce el peso de tener una caja de velocidades completa.
- Se lograría un modo de conducción similar a un vehículo eléctrico de fábrica.

A pesar de que posee ventajas interesantes, puede llevar a complicaciones importantes como el acoplamiento mecánico con el vehículo original y la inclusión del diferencial. Además se requiere de una inversión económica considerable para realizar este cambio.

### 2.5.3 Caja automática

Los vehículos de combustión interna también pueden incluir una caja de velocidades automática. Sin embargo, en conversiones de vehículos no es recomendable utilizarlas aunque si es posible. Las cajas automáticas presentan las siguientes desventajas:

- Poseen una eficiencia menor comparadas con una caja manual.
- Debido a la presencia de un embrague hidráulico generan calor adicional que debe ser disipado.
- Requieren estar girando continuamente para alimentar el sistema hidráulico que las controla, por lo que genera un consumo de energía extra cuando el vehículo está detenido.
- Las cajas automáticas están diseñadas para empezar a trabajar cuando el motor sobrepasa cierta cantidad de revoluciones, es decir, no trabajan a bajas velocidades debido a que el motor de combustión interna no genera suficiente torque. Como se observó en la sección 2.4, los motores eléctricos generan torque máximo desde cero revoluciones, por lo que se estaría desaprovechando esta característica durante el rango inicial de revoluciones del motor.

## 2.6 Vehículo eléctrico con caja de velocidades

En las conversiones de vehículos eléctricos generalmente se conserva la caja de velocidades manual que posee el automóvil. Sin embargo, esto no implica que el vehículo convertido se conduzca igual al vehículo original. Como se observó en la sección 2.4, los torques de un motor eléctrico y un motor de combustión presentan características diferentes. En un vehículo convertido, la palanca de cambios se coloca generalmente en segunda o tercera velocidad y se conduce utilizando únicamente el acelerador y el freno. Los cambios de marcha se realizan solo en condiciones que lo ameritan, por ejemplo en casos de subidas considerables donde se requiera un gran torque del motor se puede utilizar la primer marcha, o en momentos donde se desee alcanzar velocidades más altas se puede colocar cuarta o quinta marcha. No se requiere hacer un cambio continuo de marchas como se realiza en un vehículo de combustión.

En una conversión se puede optar por mantener o eliminar el embrague. En general, se recomienda mantener el embrague para poder realizar los cambios de marcha de forma más sencilla. En los casos donde se mantiene el embrague, este solo se debe presionar cuando se requiere realizar un cambio de marcha. El motor eléctrico puede detenerse totalmente cuando el vehículo se detiene, por lo que no hay que presionar el embrague como se realiza con un vehículo de combustión.



# Capítulo 3

## Comparación de motores eléctricos

En la esta sección se presentan los distintos tipos de motores eléctricos presentes en vehículos eléctricos. Se procede a realizar una comparación entre los mismos para determinar el tipo de motor más viable a incorporar dentro del vehículo eléctrico. Se toman en cuenta tanto aspectos funcionales como de disponibilidad comercial.

### 3.1 Motores eléctricos usados en vehículos eléctricos

#### 3.1.1 Motores DC

Estos motores consisten de un estator con campo magnético estacionario y un rotor devanado con un sistema de conmutación por escobillas. En vehículos se utiliza principalmente en la configuración serie, debido a que poseen un alto torque de arranque. Son buenos candidatos para aplicaciones de baja potencia [10]. Presentan como ventajas un costo económico bajo, confiabilidad y un control simple y robusto. Como desventajas presentan baja densidad de potencia, baja eficiencia y requieren mantenimiento debido al desgaste de las escobillas [7].

#### 3.1.2 Motores de inducción

Estos motores consisten de un estator con campo magnético trifásico y un rotor de jaula de ardilla. El campo magnético trifásico gira alrededor del rotor induciendo corrientes en el mismo, lo que genera el movimiento del rotor. Presentan ventajas como construcción sencilla, precio adecuado, poco mantenimiento, son robustos y confiables [7]. Como desventajas presentan reducción de eficiencia en velocidades bajas y reducción de potencia en velocidades altas [3]. Este tipo de motores se utilizan en vehículos como el Tesla Model S y el Toyota Rav4 EV.

### 3.1.3 Motores de imanes permanentes

Estos motores consisten de un estator con una serie de bobinas y un rotor formado por imanes permanentes que generan una magnetización constante del mismo. Son la principal competencia de los motores de inducción [10]. Presentan ventajas como alta densidad de potencia, alta eficiencia y eliminación de las pérdidas por corrientes de excitación por lo que requiere menos enfriamiento [7]. Como desventajas presentan la necesidad de un control complejo y un costo económico elevado debido al uso de tierras raras para fabricar los imanes [3]. Además pueden desmagnetizarse debido al calor [10]. Dentro de esta categoría se encuentran los motores brushless DC (BLDC) y los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM). Los motores BLDC requieren señales rectangulares para producir torque constante mientras que los PMSM utilizan señales sinusoidales. La distribución de las bobinas del estator de ambos motores también cambia. En los BLDC se utilizan bobinas concentradas, mientras que en los PMSM las bobinas se encuentran distribuidas uniformemente. Nissan Leaf y BMW i3 son ejemplos de vehículos comerciales con este tipo de motores.

### 3.1.4 Motores de reluctancia variable

Estos motores consisten de un estator con una serie de bobinas y un rotor formado por acero laminado en forma de polos salientes. Tienen gran potencial para ser utilizados en vehículos eléctricos [2]. Como ventajas presentan una alta eficiencia en un rango extenso de velocidades, estabilidad térmica, pérdidas en el rotor reducidas, bajo mantenimiento y bajos costos de operación [3]. Presentan desventajas como torque rizado, ruido, vibraciones y torque limitado en bajas velocidades [7].

### 3.1.5 Motores síncronos con anillos colectores

Estos motores consisten de un estator con campo magnético trifásico y un rotor formado por bobinas de corriente directa, alimentadas por medio de anillos colectores deslizantes. Presentan ventajas como la posibilidad de regular el flujo magnético, alta eficiencia, alto torque de arranque y control simple [7]. Como desventaja poseen menor densidad de potencia. Este tipo de motores son utilizados por la marca Renault en sus vehículos eléctricos.

## 3.2 Comparación de motores eléctricos

En la conversión de vehículos eléctricos se debe escoger entre un sistema de corriente directa o un sistema de corriente alterna. De los 5 tipos de motores presentados anteriormente, solamente el motor DC funciona con corriente directa. El motor DC en configuración serie posee un alto torque de arranque lo que lo hace muy útil en vehículos. Además requiere de

un controlador sencillo para regular la velocidad. Sin embargo, comparado con motores de corriente alterna, tiene una eficiencia menor, un mayor peso y requiere de un mayor mantenimiento debido a la presencia de escobillas para alimentar los devanados del rotor. Por estas razones, los motores de corriente alterna adquieren una relevancia mayor a la hora de realizar una conversión de vehículo eléctrico, a pesar de que los motores DC puedan ser una opción aceptable.

En la Tabla.3.1 se realiza una comparación de los principales motores eléctricos que se pueden utilizar en vehículos. Se comparan los motores de inducción (IM), los motores de reluctancia variable (SRM), los motores síncronos de imanes permanentes (BLAC) y los motores brushless DC (BLDC). Se utilizan los parámetros de eficiencia, densidad de potencia, tiempo promedio para fallar (TPPF), tiempo promedio para reparar (TPPR), reparabilidad, tolerancia a fallas, ruido, volumen, complejidad, y costo. El factor  $Kp$  indica la importancia de cada parámetro del motor en su utilización en vehículos eléctricos.

**Tabla 3.1:** Tipos de máquinas eléctricas para aplicaciones automotrices [3]

Parámetro	$Kp$	Tipo de Motor			
		IM	SRM	BLAC	BLDC
Eficiencia	1,0	8	8,5	9,5	10
Densidad de potencia	0,8	7	7,5	10	10
TPPF	1,0	9	9,5	10	10
TPPR	1,0	10	10	9,5	9,5
Reparabilidad	1,0	10	10	9	9
Tolerancia a fallas	1,0	8	8	10	9
Ruido	0,8	9	8	10	10
Volumen	0,7	8	8	9,5	10
Complejidad	0,8	10	10	8	8
Costo	1,0	10	10	8	7,5
Total		89,0	89,5	93,5	93
Total ( $Kp$ )		81,0	82,0	85,1	84,9
Valor relativo		0,95	0,96	1,00	0,99

*Nota: el rango de estimación de los parámetros es de 1 a 10, donde 10 representa la mejor opción.*

En los diferentes parámetros de comparación, se pueden observar valoraciones bastante similares dentro de los cuatro tipos de motores. Cada motor posee parámetros en los que sobresale levemente sobre los otros, aunque no de manera sobresaliente. Por ejemplo, los motores de imanes permanentes poseen eficiencia y densidad de potencia mayor comparado con los otros dos tipos. Sin embargo, el motor de inducción y el motor de reluctancia variable poseen una complejidad y un costo económico menor con respecto a los motores de imanes permanentes. De esta tabla se deduce que los motores de imanes permanentes son los más indicados para ser utilizados en vehículos eléctricos. Sin embargo los otros tipos de motores eléctricos poseen características adecuadas para utilizarse

en automóviles. Esto se confirma con la variedad de motores utilizados por las compañías que fabrican vehículos eléctricos, a pesar de que existe una ligera mayoría de motores de imanes permanentes.

Como se determinó anteriormente, los 4 tipos de motores comparados son opciones viables para utilizar en un vehículo eléctrico desde el punto de vista funcional. Se procede a analizar otros aspectos como la disponibilidad comercial y el precio para determinar cuál puede ser más viable.

Se procede a revisar distintas páginas web de venta de partes para conversiones de vehículos eléctricos. Algunas de las páginas revisadas son las siguientes:

- <http://www.evwest.com>
- <http://www.electricmotorsport.com>
- <http://www.ev-propulsion.com>
- <http://www.electrircarpartscompany.com>

En las páginas web anteriores principalmente se encuentran motores de inducción, además de algunos motores DC y síncronos de imanes permanentes. En la Tabla.3.2 se presentan los 2 motores principales disponibles actualmente que podrían funcionar en un vehículo sedán de 1600 kg.

**Tabla 3.2:** Motores principales que se encuentran disponibles comercialmente

Parámetro	HPEVS AC-50	NetGain Hyper9
Tipo de motor	Inducción	Imanes permanentes
Potencia nominal	30 kW	35 kW
Potencia pico	53 kW	83 kW
Tensión nominal	96V	100 V
RPM nominal	5000 rpm	3300 rpm
RPM pico	8000 rpm	8000 rpm
Torque máximo	163 Nm	235 Nm
Peso	52 kg	54 kg
Eficiencia máxima	88%	94%
Frenado regenerativo	Si	Si
Controlador	Curtis 1238-7601	SME AC-X1
Precio	\$ 3950	\$ 4150

Los motores trifásicos de inducción HPEVS son los que se encuentran en mayor medida y con una amplia variedad de especificaciones tanto de potencia como de tensión de alimentación. El motor HPEVS AC-50 presenta los requerimientos necesarios para utilizarse dentro de una conversión de vehículo, posee la potencia nominal necesaria para mantener

constante una velocidad determinada de un sedán. Además se ha utilizado en distintas conversiones de vehículos como por ejemplo en [16]. El motor Hyper9 de Netgain es una opción bastante interesante en cuanto a especificaciones, ya que supera al motor de inducción comparado en la mayoría de estas, con tan solo un aumento económico de \$200. Además, al tener una potencia pico mayor, permite al vehículo acelerar de una forma más rápida. Sin embargo, es un motor que apenas está ingresando al mercado, por lo que todavía no tiene un historial de uso que lo respalde. Tomando en cuenta la funcionalidad y la disponibilidad en el mercado se determina que actualmente los motores de inducción trifásicos son la opción más viable para incorporar dentro de un vehículo eléctrico.



# Capítulo 4

## Piezas a retirar del vehículo de combustión interna

En la esta sección se presentan las piezas que deben ser retiradas del vehículo de combustión interna para poder realizar la conversión a vehículo eléctrico. A cada pieza se le asigna código arbitrario como identificador, se realiza una descripción de la misma y se justifica por qué debe retirarse.

### 4.1 Motor de combustión interna

Código de pieza: R01

Según González, "el motor de combustión interna es una máquina térmica capaz de transformar la energía térmica almacenada en un fluido combustible en energía mecánica, proporcionando un trabajo" [9]. El motor de combustión interna genera el trabajo necesario para realizar el movimiento del vehículo. En la Fig.4.1 se muestra un ejemplo gráfico de un motor de combustión.

Esta pieza deber ser retirada debido a que se realizará una transformación a un vehículo eléctrico. Ya no se utilizará gasolina como fuente de energía, por lo que este tipo de motor no resulta útil. Se requiere un motor que transforme la energía eléctrica en mecánica, lo que corresponde a un motor eléctrico.



BMW S65 4.0L V8 Engine Model ©Hatsukari715, CC0 1.0

**Figura 4.1:** Motor de combustión

## 4.2 Tanque de combustible

Código de pieza: R02

El tanque de combustible del vehículo tiene la función de almacenar la gasolina con la que se alimenta el motor de combustión. También será necesario retirar la bomba de gasolina, que generalmente se encuentra dentro del tanque y las mangueras que transportan el combustible hasta el motor.

Debido a que el automóvil final funcionará con electricidad ya no es necesario almacenar ningún combustible, por lo cual esta pieza debe ser retirada del vehículo.

## 4.3 Radiador

Código de pieza: R03

”Es el elemento donde se produce el enfriamiento o la evacuación del calor, del agua calentada en el bloque” [1]. El radiador se encarga de disipar el calor producido por el proceso de combustión dentro del motor. En la Fig.4.2 se presenta un ejemplo de radiador.

Al eliminar el motor de combustión, no hay un líquido refrigerante que deba ser enfriado, por lo que este elemento deja de ser necesario.



Automobile radiator ©Bill Wrigley, CC0 1.0

**Figura 4.2:** Radiador

## 4.4 Sistema de escape

Código de pieza: R04

El sistema de escape es el encargado de transportar los gases de la combustión hacia el exterior del vehículo. Está conformado por una serie de tubos, además del catalizador y del silenciador. "El catalizador tiene como misión disminuir los elementos polucionantes contenidos en los gases de escape de un vehículo" [1]. El catalizador descompone el monóxido de carbono e hidrocarburos en dióxido de carbono y agua. Por otra parte el silenciador se encarga de reducir el ruido producido por el choque de los gases quemados con el aire exterior [1].

El sistema de escape no es necesario en un vehículo eléctrico debido a que no se producen gases de combustión. En la Fig.4.3 se muestra un sistema de escape.



Exhaust system, CC0 1.0

**Figura 4.3:** Sistema de escape

## 4.5 Alternador

Código de pieza: R05

El alternador es el dispositivo encargado de generar la corriente eléctrica que recarga la batería de un vehículo de combustión. El alternador se acopla por medio de una polea al motor de combustión y utiliza su giro para generar electricidad. En la Fig.4.4 se presenta un ejemplo de un alternador.

El alternador se retira del automóvil debido a que el vehículo eléctrico posee un banco de baterías con las cuales se puede alimentar los componentes auxiliares a 12 V por medio de un convertidor DC-DC.



Water cooled alternator ©Chris Bede, CC BY 2.0

**Figura 4.4:** Alternador

## 4.6 Motor de arranque

Código de pieza: R06

El motor de arranque es un motor eléctrico pequeño que se encarga de hacer girar el motor de combustión en el proceso de arranque, ayudándolo a romper la inercia para que los pistones puedan mantener el movimiento. En la Fig.4.5 se presenta un motor de arranque.

En un vehículo eléctrico no se requiere motor de arranque debido a que el motor eléctrico principal posee el torque suficiente para vencer la inercia inicial y empezar el movimiento.



Automobile starter motor ©Willdre, CC BY-SA 3.0

**Figura 4.5:** Motor de arranque

## 4.7 Filtro de aire

Código de pieza: R07

El filtro de aire es el encargado de eliminar las impurezas presentes en el aire que ingresa al motor de combustión. En la Fig.4.6 se presenta un filtro de aire cilíndrico. Además se debe retirar el colector del filtro del aire y los ductos que transportan el aire desde el exterior hasta el motor.

El filtro de aire se debe remover debido a que un motor eléctrico no requiere de aire filtrado para funcionar.



Air filter, Opel Astra ©Donar Reiskoffer, CC BY-SA 3.0

**Figura 4.6:** Filtro de aire

## 4.8 Recipiente del líquido refrigerante

Código de pieza: R08

Este recipiente es el encargado de almacenar el líquido refrigerante con el cual se controla la temperatura del motor. Junto con el recipiente se deben remover las mangueras que transportan el líquido hacia el motor.

En el vehículo eléctrico no es necesario utilizar refrigerante, por lo que se debe retirar este componente.

## 4.9 Otras piezas a considerar

### 4.9.1 Aire acondicionado

El compresor del aire acondicionado está accionado por las poleas del motor de combustión. En la conversión se puede optar por quitar el aire acondicionado. Si se quiere mantener el aire acondicionado se puede incluir un compresor eléctrico en el vehículo o conectar por medio de una polea el compresor original al motor eléctrico de tracción.

### 4.9.2 Dirección hidráulica

En los vehículos con dirección hidráulica la bomba hidráulica que alimenta la dirección es accionada por el motor de combustión. En caso de querer mantener la dirección hidráulica se puede optar por colocar una bomba eléctrica o por conectar el compresor de la dirección hidráulica al motor eléctrico de tracción por medio de una polea.

### 4.9.3 Sistema de suspensión

En caso de que el peso agregado al vehículo al final de la conversión exceda el máximo, se debe optar por reforzar el sistema de suspensión para que trabaje adecuadamente.

# Capítulo 5

## Piezas a incorporar en el vehículo

En la esta sección se presentan las piezas que se deben incorporar al vehículo para poder convertirlo en eléctrico. De cada pieza se explica la función, se presenta la justificación para incorporarla y se muestra la ilustración correspondiente. A las partes se les asignan un códigos arbitrarios para identificarlas posteriormente.

### 5.1 Motor eléctrico

Código de pieza: A01

El motor eléctrico es el dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. De esta forma, toma la energía de las baterías para producir el movimiento rotatorio que impulsa las ruedas del vehículo. Existen dos tipos principales de motores eléctricos: los motores de corriente directa y los motores de corriente alterna. Los motores más comunes utilizados en vehículos eléctricos son los motores DC, motores de imanes permanentes y los motores trifásicos de inducción. En la Fig.5.1 se presenta un motor trifásico de inducción comercial.



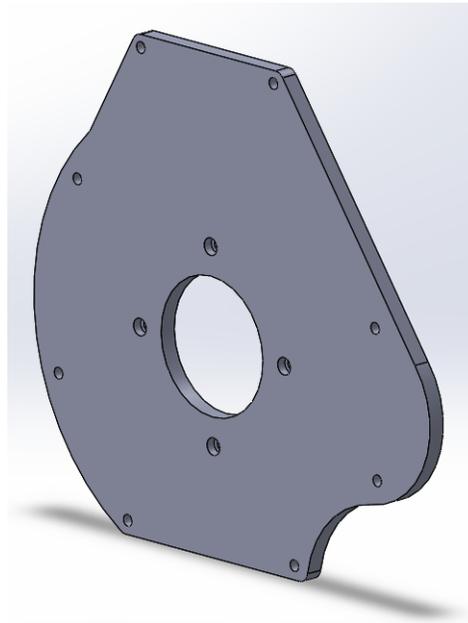
Europort 2009 ©S.J. de Waard, CC BY 2.5

**Figura 5.1:** Motor eléctrico

## 5.2 Placa adaptadora

Código de pieza: A02

La placa de unión permite el acople entre el motor eléctrico y la carcasa de la caja de velocidades. Esta placa es necesaria debido a que el motor de combustión tiene una forma distinta al motor eléctrico y por lo tanto los puntos de sujeción se encuentran ubicados en sectores diferentes. En la Fig.5.2 se presenta un ejemplo de una placa adaptadora modelada en CAD.



Fuente: propia. SolidWorks.

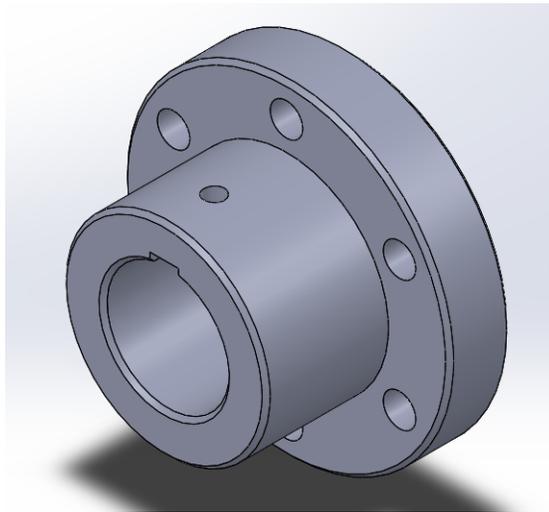
**Figura 5.2:** Placa de unión motor-transmisión

## 5.3 Acople mecánico

Código de pieza: A03

El motor de combustión interna tiene en un extremo del cigüeñal un volante de inercia sobre el cual se acopla el sistema de embrague. El motor eléctrico no posee este sistema por lo cual se debe incorporar este acople que es el encargado de unir el eje del motor y el volante de inercia original del vehículo.

En la Fig.5.3 se muestra un ejemplo de acople modelado en CAD, el cual posee un chavetero para sujetar el eje del motor y en el otro extremo posee una estructura de brida sobre la cual se sujeta el volante de inercia.



Fuente: propia. SolidWorks.

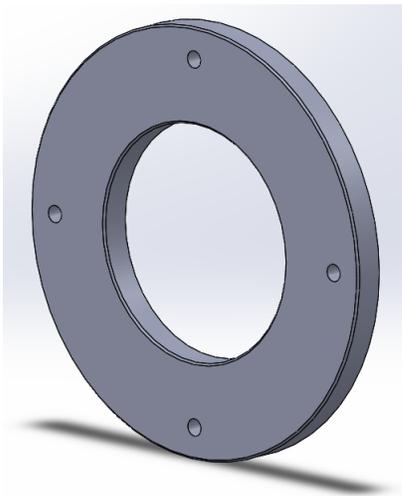
**Figura 5.3:** Acople mecánico

## 5.4 Espaciador

Código de pieza: A04

El espaciador se coloca entre el motor eléctrico y la placa de unión de forma que el volante de inercia permanezca en la misma posición en la que se encontraba al estar conectado al motor de combustión. La posición del volante de inercia debe mantenerse igual para que el sistema de embrague funcione de manera correcta.

En la Fig.5.4 se muestra un espaciador cilíndrico modelado en CAD. El espaciador posee un agujero central por donde pasa el eje del motor y agujeros pequeños para sujetarlo con tornillos.



Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 5.4:** Espaciador

## 5.5 Tornillos

Código de pieza: A05

Los tornillos tienen la función de sujetar el motor eléctrico junto con el espaciador y la placa de unión. La cantidad de tornillos y sus especificaciones dependen del motor seleccionado y del espesor de las placas a unir.

En la Fig.5.5 se puede apreciar un ejemplo de tornillo que podrían ser utilizados.



Bolts ©Obviusly, CC BY-SA 4.0

**Figura 5.5:** Tornillo

## 5.6 Soporte del motor

Código de pieza: A06

El motor se sujeta de la parte frontal con la caja de velocidades, sin embargo requiere de un segundo soporte que le brinde mayor estabilidad. Este soporte puede ser un soporte central o un soporte trasero. Este soporte adicional deberá fijarse al chasis del vehículo.

## 5.7 Bomba de vacío

Código de pieza: A07

El sistema de frenos accionado por pedal requiere de vacío para funcionar adecuadamente, ya que reducen el esfuerzo realizado por el usuario para accionarlos. En un vehículo de combustión, el motor de combustión interna es el que genera el vacío necesario para accionar los frenos. En un vehículo eléctrico se requiere instalar una bomba de vacío eléctrica que genere el vacío correspondiente para que los frenos funcionen adecuadamente.

## 5.8 Controlador

Código de pieza: A08

El controlador es un dispositivo electrónico encargado de suministrar la potencia al motor eléctrico según la aceleración escogida por el usuario. Existen controladores para motores de corriente directa y para corriente alterna. Los controladores de corriente directa utilizan la modulación PWM para variar la potencia entregada al motor. Los controladores de corriente alterna poseen un inversor trifásico que varía la frecuencia y la amplitud de la tensión aplicada al motor de inducción, con lo cual se varía la velocidad del mismo. Es importante mencionar que el controlador debe seleccionarse según la potencia del motor eléctrico que se quiere alimentar.

## 5.9 Acelerador

Código de pieza: A09

El acelerador es dispositivo mediante el cual el usuario controla la aceleración del vehículo. Este debe tener un potenciómetro interno con el cual el controlador pueda hacer mediciones y estimar la potencia que debe suministrar al motor eléctrico. En el caso de que el vehículo de combustión interna posea acelerador con potenciómetro, entonces se puede utilizar el acelerador original.

En la Fig.5.6 se muestra un pedal de aceleración comercial el cual posee un potenciómetro en su interior.



EDC accelerator pedal assembly ©Panoha, CC BY-SA 3.0

**Figura 5.6:** Acelerador

## 5.10 Baterías

Código de pieza: A10

En un vehículo eléctrico las baterías constituyen la fuente de energía principal. Son necesarias para alimentar todos los componentes eléctricos del automóvil además del motor de tracción. Debido a que las baterías individuales poseen tensiones bajas, estas se conectan en serie para alcanzar las tensiones requeridas. En vehículos eléctricos se utilizan principalmente baterías de iones de litio.

En la Fig.5.7 se presenta un banco de baterías de iones de litio utilizado en el Nissan Leaf.



Battery-pack of the Nissan Leaf. ©Gereon Meyer, CC BY-SA 4.0

**Figura 5.7:** Banco de baterías del vehículo Nissan Leaf

## 5.11 Soporte de baterías

Código de pieza: A11

El soporte de baterías tiene la función de mantener fijas las baterías en una posición determinada. Este soporte puede ser en forma de caja o en forma de rejilla. Su forma dependerá del tipo y tamaño de baterías seleccionado para el vehículo eléctrico.

## 5.12 Cargador de baterías

Código de pieza: A12

El cargador de baterías tiene la función de recargar las baterías cuando estas se descargan. Se requiere un cargador dentro del vehículo para poder recargar las baterías en los lugares donde sea necesario, siempre y cuando se tenga un tomacorriente disponible.

## 5.13 Convertidor DC-DC

Código de pieza: A13

El convertidor DC-DC es el dispositivo encargado de transformar la tensión del banco de baterías a 12 V para poder cargar la batería auxiliar del vehículo. En un vehículo de combustión interna, la batería auxiliar se carga por medio del alternador, sin embargo el vehículo eléctrico no utiliza alternador,, por lo que se recurre a un convertidor DC-DC para está función. De esta forma se pueden alimentar todos los dispositivos del automóvil que requieren 12V.

## 5.14 Contactor principal

Código de pieza: A14

El contactor es un interruptor controlado electromagnéticamente. Este se encarga de permitir o no el paso de corriente desde el banco de baterías hasta el controlador. El contactor funciona además como un interruptor de seguridad, ya que puede desactivar la alimentación principal en condiciones específicas.

En la Fig.5.8 se presenta un contactor utilizado en conversiones de vehículos eléctricos.



Contactor ©Leonardo G., CC SA 1.0

**Figura 5.8:** Contactor

## 5.15 Fusible de alta tensión

Código de pieza: A15

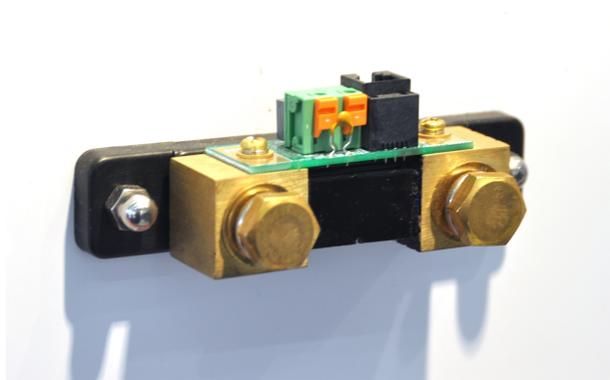
El fusible de alta tensión es el dispositivo de seguridad que protege los componentes eléctricos en casos de sobrecargas de corriente. Este dispositivo debe ser incorporado en el vehículo eléctrico para protegerlo de fallas o sobrecargas eléctricas, ya sea en el proceso de carga de las baterías así como en el funcionamiento normal del mismo.

## 5.16 Shunt

Código de pieza: A16

El shunt es un dispositivo que se coloca en serie con el circuito donde se desea medir la corriente, en este caso, en la salida de las baterías. El shunt se encarga de hacer una derivación de la corriente principal, permitiendo la medición de la misma por medio de un amperímetro convencional. Este dispositivo se requiere debido a que las intensidades de corriente que circulan de las baterías son relativamente grandes, lo que dificulta su medición.

En la Fig.5.9 se muestra un shunt utilizado en vehículos eléctricos.



SHUNT - 500A 50mV - VICTRON TYPE ©S.J. de Waard, CC BY-SA 3.0

**Figura 5.9:** Shunt

## 5.17 Multímetro

Código de pieza: A17

El multímetro es el encargado de medir la corriente y la tensión que proveen las baterías al circuito. Es un componente necesario para controlar el consumo de corriente por parte del vehículo así como para monitorear el nivel de tensión que poseen las baterías conforme se van utilizando.

## 5.18 Interruptor de inercia

Código de pieza: A18

El interruptor de inercia es un dispositivo que detecta colisiones del vehículo y se desconecta si son de una intensidad determinada. Este interruptor es necesario como medida de seguridad para cortar el flujo de corriente de las baterías hacia el controlador cuando se produzcan accidentes de tránsito.

## 5.19 Disyuntor

Código de pieza: A19

El disyuntor es el dispositivo encargado de proteger al circuito de sobrecargas eléctricas. En caso que la corriente se eleve por encima de lo normal, el disyuntor se dispara, cortando el flujo eléctrico. Este es un dispositivo de seguridad necesario para evitar daños en componentes debido a sobrecorrientes.

## 5.20 Conector de alimentación

Código de pieza: A20

El conector de alimentación es la interfaz que permite conectar la alimentación eléctrica hacia el vehículo para recargar las baterías. Existen diversos tipos de conectores de alimentación, los cuales responden a diferentes estándares. Algunos de los principales conectores son: CHAdeMO, Sae Combo CCS, SAE J1772, Nema 515, entre otros.

## 5.21 Cable para circuito de alta tensión

Código de pieza: A21

El cable de alta tensión es el que transporta la corriente entre las baterías, el controlador y el motor. Generalmente se utiliza calibre AWG 2/0 para este tipo de conexiones ya que se requiere transportar grandes cantidades de corriente.

## 5.22 Cable para circuito de baja tensión

Código de pieza: A22

El cable de baja tensión se utiliza para interconectar los dispositivos eléctricos que consumen 12 V o menos. Generalmente se utiliza calibre AWG 12 o 14 para este tipo de conexiones.

# Capítulo 6

## Procedimiento de conversión

En la esta sección se presenta un procedimiento general para realizar la conversión de un vehículo de combustión interna a un vehículo eléctrico. Primero se indica el procedimiento para retirar las piezas del vehículo de combustión que no van a ser utilizadas. Luego se presenta el procedimiento para incorporar las piezas nuevas que se requieren en un vehículo eléctrico. También se indican las herramientas y el equipo necesario para realizar las operaciones. En algunos modelos de vehículos, puede que se requieran pasos adicionales de procedimiento.

### 6.1 Preparación previa del vehículo

Se debe de medir la distancia existente entre el chasis del vehículo y el suelo, tanto en la parte delantera como en la trasera.

Se debe vaciar el tanque de combustible para evitar riesgos de incendios o explosiones. Esta tarea se puede realizar de varias formas. Una de ellas es buscar en la parte inferior del tanque el tornillo que sirve para drenar la gasolina. Otra opción es utilizar la bomba de combustible propia del vehículo para sacar la gasolina fuera del tanque. Se debe contar con un recipiente para almacenar la gasolina extraída.

Se debe desconectar la batería del vehículo para evitar hacer cortocircuitos.

Se debe drenar el líquido refrigerante del radiador. Para esto se busca en la parte inferior, la tapa que permite drenar el líquido. Posteriormente se debe proceder a quitar el radiador junto con las mangueras que están asociadas al mismo así como el recipiente del líquido refrigerante.

Se procede a quitar el capó del vehículo para facilitar las labores. Es importante marcar de alguna forma el lugar exacto donde se encuentra atornillado el capó, para poder volverlo a poner en el mismo sitio posteriormente y no tener complicaciones.

Se debe desconectar el filtro del aire del motor y remover todas las carcasas y conductos

relacionadas con el mismo.

Se deben desconectar todas las mangueras y cables que se conectan al motor de combustión. Es importante etiquetar las mangueras y cables que se desconectan para saber a que sistema pertenecen y poder volver a conectar posteriormente las que sean necesarias.

Se deben retirar las mangueras que comunican el tanque de gasolina con el motor de combustión. Además se debe retirar la conexión del sistema de escape con el motor de combustión.

Se debe retirar el motor de arranque. Además se deben desconectar las poleas de accesorios del motor de combustión, posteriormente liberar el compresor de aire acondicionado y el compresor de la dirección hidráulica. Por el momento no desconectar las mangueras relacionadas con estos dos sistemas. Retirar también el alternador.

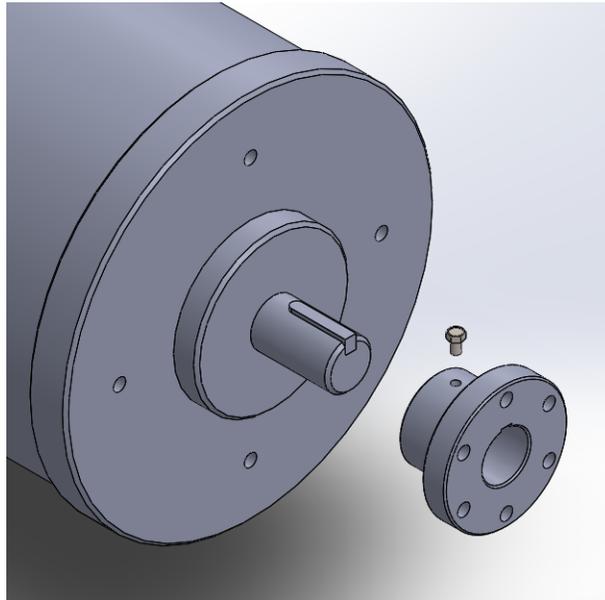
Por medio de una grúa para motores, se debe soportar el peso del motor de combustión. Por debajo del vehículo se debe colocar un gato hidráulico que soporte la caja de velocidades. Posteriormente se retiran los soportes del motor y los tornillos que unen la caja de velocidades con el mismo. Se procede a sacar el motor de combustión con ayuda de la grúa. Se debe medir la distancia existente entre el volante de inercia y la cara frontal del motor. El volante de inercia, los tornillos que lo sujetan y el embrague deben conservarse.

Posteriormente se retira el tanque de gasolina, para esto se procede a quitar los tornillos que lo sostienen del chasis del vehículo. También se retira el sistema de escape, que está compuesto por el silenciador, el catalizador y los conductos que lo comunican.

Realizar una limpieza del vehículo en general, removiendo principalmente los restos de aceite que se encuentren en el compartimento del motor.

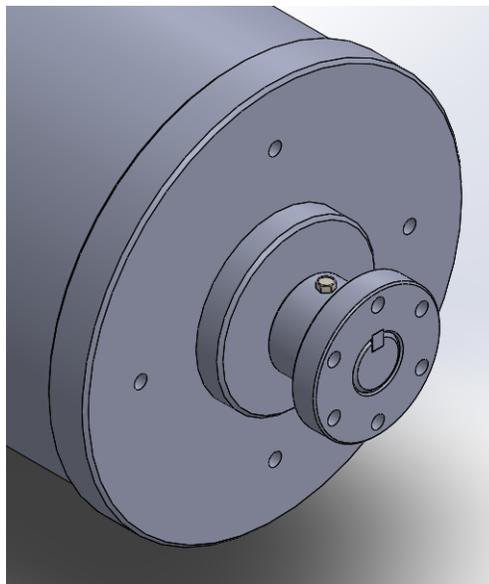
## 6.2 Incorporación de componentes nuevos

Colocar el acople eje-volante de inercia al eje del motor eléctrico. Colocar la cuña y el tornillo necesario para mantenerlo fijo. En la Fig.6.1 se muestran los componentes a utilizar y en la Fig.6.2 se presenta la unión luego de realizarla. Se debe verificar que la cara externa del acople quede lo más vertical posible, utilizar el reloj comparador para este fin.



Fuente: propia. SolidWorks.

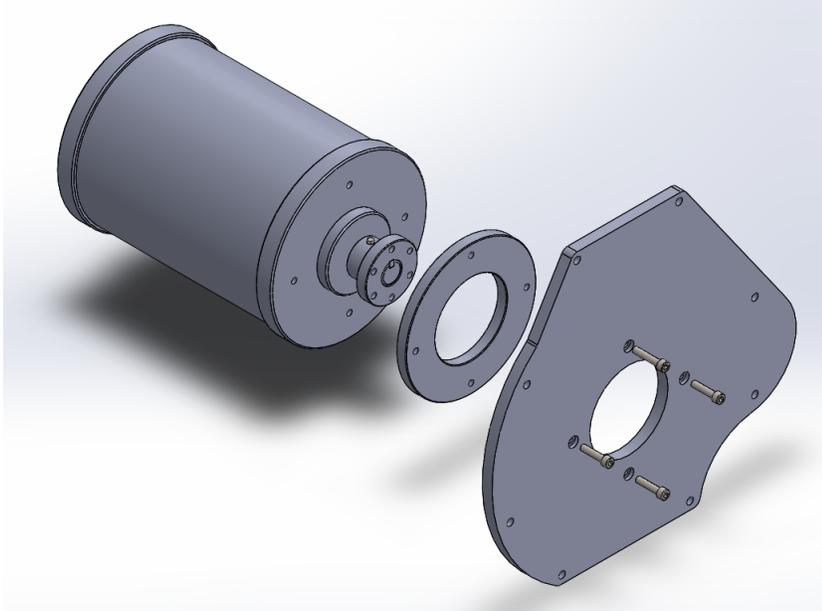
**Figura 6.1:** Piezas para colocar el acople en el motor



Fuente: propia. SolidWorks.

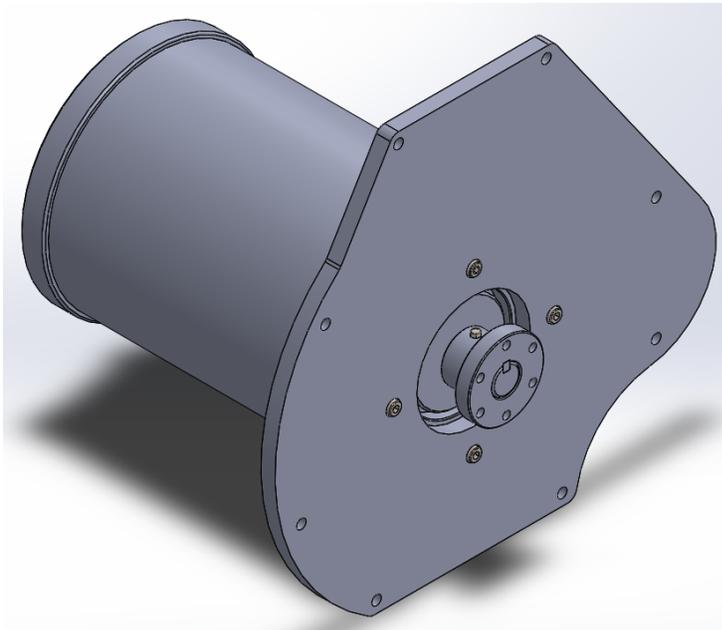
**Figura 6.2:** Acople colocado en el motor

Atornillar el espaciador y la placa de unión al motor eléctrico. En la Fig.6.3 se muestran las piezas a colocar y en la Fig.6.4 se muestra la unión del espaciador, la placa y el motor eléctrico, realizada por medio de cuatro tornillos.



Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 6.3:** Espaciador y placa de unión

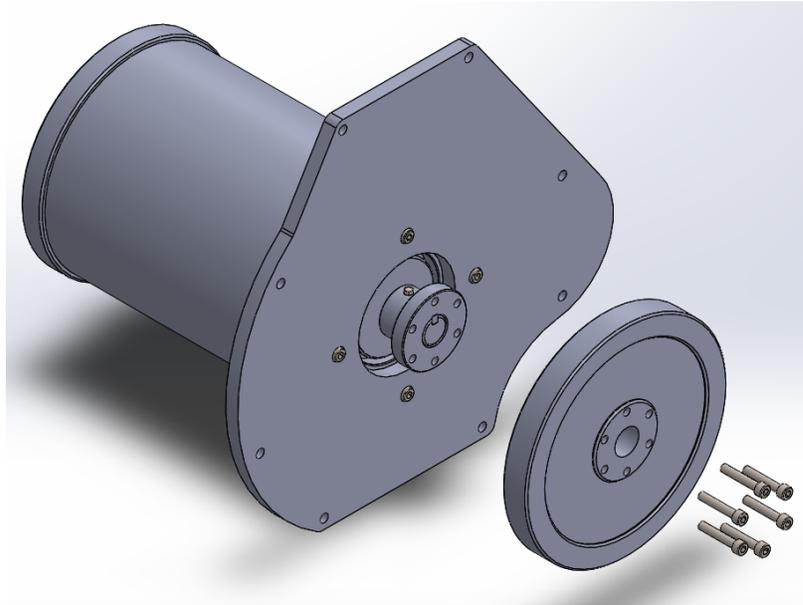


Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 6.4:** Espaciador y placa de unión

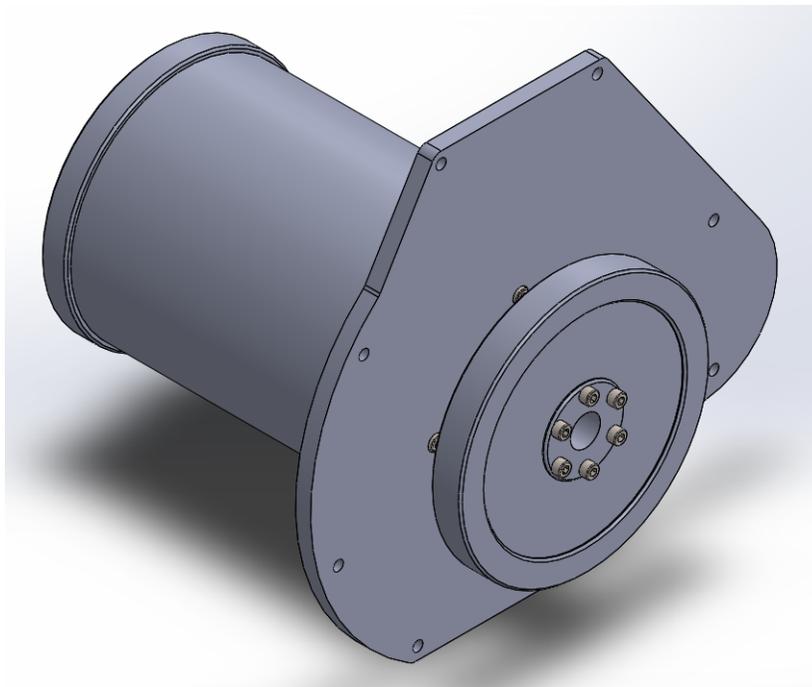
Atornillar el volante de inercia al acople. En la Fig.6.5 se muestra el conjunto anterior junto con el volante de inercia y los tornillos a utilizar. En la Fig.6.6 se presenta el

ensamble final del conjunto de piezas mencionadas anteriormente. Se debe verificar la verticalidad del volante de inercia con el reloj comparador, en caso de ser necesario, reajustar los tornillos.



Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 6.5:** Colocación del volante de inercia

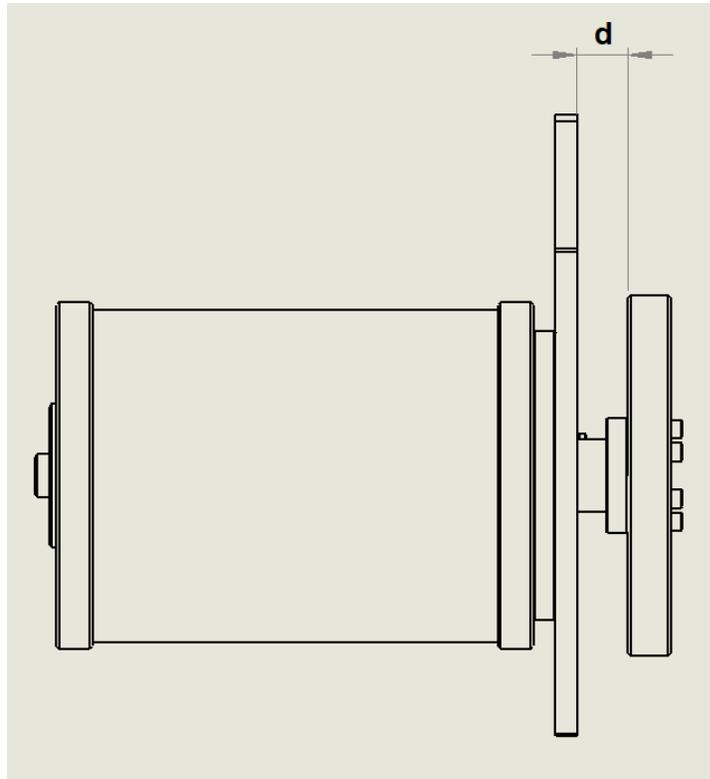


Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 6.6:** Ensamble del motor eléctrico

Verificar que la distancia entre el volante de inercia y la placa de unión sea la misma que

existía entre el motor de combustión y el volante de inercia. Si la distancia no es la misma, se puede variar el espesor del espaciador o la profundidad donde se coloca el acople en eje del motor. En la Fig.6.7 se presenta una vista lateral del ensamble del motor, con la distancia "d" que se debe verificar.



Fuente: propia. SolidWorks.

**Figura 6.7:** Distancia "d" en una vista lateral del ensamble del motor

Revisar el estado del embrague para verificar que no haya un desgaste muy alto. En caso de ser necesario sustituirlo.

Atornillar la cubierta del embrague, junto con sus elementos internos, al volante de inercia.

Atornillar la placa de unión a la caja de velocidades. Poner a funcionar el motor junto con la caja de velocidades y comprobar que no existan vibraciones.

Colocar el soporte trasero o medio del motor eléctrico y atornillarlo en el soporte correspondiente.

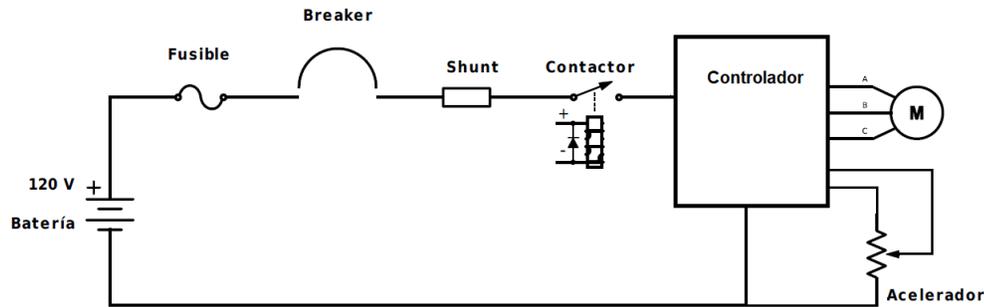
Instalar la bomba de vacío. Conectar las mangueras del sistema de frenos con las salidas de la bomba de vacío.

Colocar las baterías a utilizar y los soportes correspondientes.

Colocar el controlador junto con el soporte. Revisar el manual de instalación del controlador a utilizar para cumplir con los requerimientos específicos que sean necesarios.

Realizar el cableado de alta tensión con cable calibre AWG 2/0. Realizar las conexiones

entre el motor, el controlador y las baterías. Colocar el contactor principal, el disyuntor, el shunt y el fusible de protección dentro del circuito. La referencia o tierra de este circuito debe quedar flotante, es decir, no se conecta al chasis del vehículo para evitar daños en caso de cortocircuito. En la Fig.6.8 se muestra un diagrama de este circuito. El contactor se activa por medio del circuito de arranque, que se presentará más adelante.

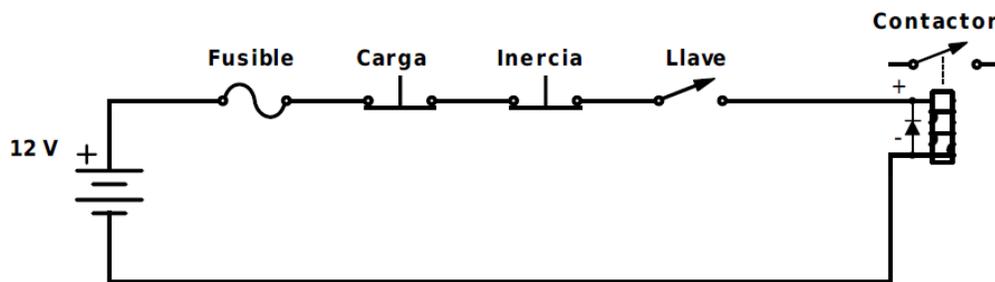


Fuente: propia. Scheme-it online.

**Figura 6.8:** Circuito de alta tensión

Revisar el pedal de aceleración del vehículo original para verificar si se puede reutilizar o si requiere cambiarse. En caso de ser necesario, instalar el nuevo pedal de aceleración. Conectar los cables del sensor de aceleración al controlador.

Realizar el circuito de arranque del vehículo con cable calibre 12. Conectar en serie el interruptor de encendido (llave), el interruptor de inercia, el fusible correspondiente, el relé de carga, la bobina del contactor principal y la batería auxiliar de 12 V. Conectar la referencia del circuito al chasis del vehículo. Conectar la bomba de vacío a la batería de 12 V. En la Fig.6.9 se presenta el diagrama de este circuito. Puede observarse que al girar la llave del vehículo se activa el contactor y por lo tanto se enciende el mismo. En caso de que el relé de carga o el interruptor de inercia se activen, se desconecta la alimentación del controlador.



Fuente: propia. Scheme-it online.

**Figura 6.9:** Circuito de arranque

Instalar los instrumentos de medición (amperímetro, voltímetro). Realizar el cableado para los instrumentos de medición utilizando cable calibre AWG 18.

Instalar el convertidor DC-DC. Realizar el cableado de alimentación de alta tensión y la conexión en paralelo con la batería auxiliar.

Instalar el cargador de baterías dentro del vehículo. Realizar las conexiones hacia el banco de baterías. Instalar la entrada de alimentación a utilizar y realizar las conexiones hacia el cargador. Conectar también el relé de desconexión de proceso de carga. Conectar el chasis del vehículo a la tierra del conector AC para evitar choques eléctricos.

Realizar las configuraciones necesarias del controlador. Definir los rangos de operación del acelerador y la velocidad máxima del vehículo.

Realizar pruebas de los distintos sistemas del vehículo eléctrico. Primeramente verificar con un voltímetro los niveles de tensión de los circuitos. Luego activar el interruptor de encendido sin presionar el acelerador. Verificar que el motor no gire. Poner primera marcha y acelerar el vehículo levemente. Verificar que el vehículo se mueva y lo haga en la dirección correcta. Depurar los posibles errores que puedan encontrarse en el proceso de pruebas.

## 6.3 Equipo y Herramientas

En la siguiente lista se presentan herramientas y equipo necesario para llevar a cabo el procedimiento de conversión del vehículo.

- Peladora de cable
- Cortadora de cable
- Multímetro
- Cautín
- Tape
- Pistola de impacto
- Esmeril
- Atornillador de trinquete de aire comprimido de 3/8"
- Taladro y brocas
- Destornilladores
- Llaves inglesas
- Llaves allen
- Cubos y llaves Torx

- Martillo
- Mazo de baquelita
- Fresadora
- Torno
- Cierra de cinta
- Amoladora de banco
- Máquina de soldar MIG
- Prensa hidráulica
- Grúa para motores
- Gato hidráulico
- Reloj comparador
- Alicates para grapa a resorte
- Torquímetro
- Recipientes para recoger líquidos
- Cinta métrica



## Capítulo 7

# Propuesta de vehículos para proyecto piloto de conversión

Para determinar la composición de la flotilla de vehículos de Costa Rica se utiliza como referencia las importaciones de automóviles desde el año 2010. Se obtiene la información de las importaciones del sistema Tecnología de la Información para el Control Aduanero (TICA), a través de la Dirección General de Aduanas de Costa Rica. De ahí se encuentra que se han importado un total de 87903 sedanes desde el 1 de enero del 2010 hasta el 11 de octubre del 2017 (se consideran vehículos nuevos y usados de no más de 6 años de antigüedad en el momento de importación). En la Tabla.7.1 se presenta la cantidad de sedanes importados de las marcas principales.

**Tabla 7.1:** Importaciones de sedanes por marca

Marca	Cantidad
Toyota	20405
Hyundai	18466
Nissan	15605
Suzuki	7297
Kia	5311
Honda	4155
Chevrolet	2769
Mitsubishi	2559
Mazda	1464
Volkswaguen	1427
BMW	1157
Mercedez Benz	1068
Audi	1007
Citroen	790
BYD	700
Fiat	442
Faw	415
Peugeot	347

En la Tabla.7.2 se presentan las cantidades de los modelos principales de las importaciones de sedanes desde el 2010.

**Tabla 7.2:** Importaciones de sedanes por modelo

Modelo	Cantidad
Toyota Yaris	10945
Hyundai Accent	9982
Nissan Tiida	7818
Toyota Corolla	5968
Nissan Versa	4232
Suzuki Swift	4036
Hyundai Elantra	3689
Kia Rio	3113
Nissan Sentra	2739
Suzuki Ciaz	2590
Honda Civic	2161
Hyundai Grand i10	1888
Kia Cerato	1760

En la Tabla.7.3 se presentan los tres modelos de sedanes con mayor número de importaciones, ordenados por el número de vehículos que poseen transmisión mecánica. Además se detalla la cantidad de vehículos importados según el año del modelo.

**Tabla 7.3:** Modelos con transmisión mecánica, divididos por año del modelo.

Modelo	T. Mecánica	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
Nissan Tiida	6404	81	741	505	680	636	850	1157	1444	305
Toyota Yaris	6243	0	851	851	473	1218	686	782	572	258
Hyundai Accent	5095	0	887	449	349	910	662	1360	246	106

De la Tabla.7.3 se determina que los modelos con transmisión mecánica que poseen mayor cantidad de importaciones desde el 2010 son Nissan Tiida 2011, Toyota Yaris 2014 y Hyundai Accent 2012. Se procede a revisar las especificaciones técnicas de los modelos anteriores para determinar si son viables para una conversión.

En la Tabla.7.4 se presentan especificaciones técnicas de los modelos Nissan Tiida 2011, Toyota Yaris 2014 y Hyundai Accent 2012.

**Tabla 7.4:** Especificaciones técnicas de los modelos seleccionados

Especificación	Tiida 2011	Yaris 2014	Accent 2012
Potencia Motor (HP)	125	84 / 109	107 / 122
Torque Motor (Nm)	173	121/ 142	136 / 156
Peso Neto (kg)	1190 / 1224	1050	1035
Peso Bruto (kg)	1580 / 1614	1490	1560
Capacidad de Carga (kg)	390	450	525
Tracción	Delantera	Delantera	Delantera
Dirección	Asistida electrónica	Asistida electrónica	Asistida electrónica
Freno	Servofreno	Servofreno	Servofreno

El peso neto del Nissan Tiida 2011 es el mayor de los tres modelos a comparar, lo cual hace que se requiera más energía para su movimiento. Esto se refleja en que también posee un motor con más potencia y torque. En cuanto a capacidad de carga el Hyundai Accent es el que presenta las mejores condiciones, algo que beneficia para poder colocar todas las piezas de la conversión. Los tres modelos presentan tracción delantera y sistema de servofreno, lo cual hace necesario incorporar una bomba de vacío durante la conversión. En cuanto a la dirección, al ser asistida electrónicamente, se puede utilizar sin cambios en la conversión, ahorrando así las complicaciones que podrían surgir de una dirección hidráulica.

El Nissan Tiida es el vehículo que presenta mayor cantidad de importaciones durante el período seleccionado, lo que lo hace más atractivo desde un punto de vista comercial. El Hyundai accent presenta las mejores características técnicas para la conversión, pero es el que posee la menor cantidad de importaciones. Finalmente, el Toyota Yaris presenta una cantidad de importaciones bastante similar al Nissan Tiida y presenta características

técnicas aceptables, por lo cual, si se busca un equilibrio entre características comerciales y técnicas podría ser el vehículo más viable para realizar conversiones.

## 7.1 Cálculo teórico de autonomía

En esta sección se procede al cálculo teórico de la autonomía para los modelos seleccionados. En la Tabla.7.5 se muestran los parámetros a utilizar para realizar los cálculos. Se asume que todos estos parámetros son iguales para los 3 modelos.

**Tabla 7.5:** Parámetros para el cálculo de autonomía

Parámetro	Valor
Velocidad	80 km/h
$\rho$ [12]	1,2 kg/m <sup>3</sup>
A	2 m <sup>2</sup>
$C_{rr}$ [6]	0,02
$C_d$	0,3
Energía de la batería	10 kWh

En la Tabla.7.6 se presenta el cálculo de autonomía para los modelos seleccionados utilizando las ecuaciones del apéndice A y los parámetros anteriores. Se asume que el peso de los vehículos luego de la conversión es igual al peso neto inicial. Al peso neto de los vehículos se les añade 75 kg para considerar el peso del conductor.

**Tabla 7.6:** Cálculo de autonomía para los modelos seleccionados

Cálculo	Yaris 2014	Accent 2012	Tiida 2011
Masa (kg)	1125	1110	1265
Potencia requerida (W)	8856	8790	9466
Energía/km (Wh/km)	110,7	109,9	118,3
Autonomía (km)	90,3	91	84,5

De la tabla anterior se puede observar que el Toyota Yaris y el Hyundai Accent presentan autonomías teóricas de aproximadamente 90 km debido a que sus masas son similares. El Nissan Tiida posee 84,5 km de autonomía debido a que su masa es mayor. Esta autonomía es teórica debido a que se asume que el vehículo transita a una velocidad constante de 80 km/h sobre una superficie plana. Además no se han considerado las pérdidas de la transmisión mecánica, la eficiencia del motor eléctrico y se ha asumido que se puede utilizar la totalidad de la energía de las baterías. El valor de autonomía obtenido se adapta bien a los recorridos que podrían hacer vehículos dentro de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, donde las distancias no son muy grandes. Para obtener una autonomía mayor se deben considerar baterías con una energía superior a los 10 kWh que se consideraron en estos cálculos.

# Capítulo 8

## Conclusiones

Se logra determinar la viabilidad técnica de la transformación mecánica de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos debido a que se identifican las partes mecánicas que deben ser retiradas y las partes que deben ser incorporadas, así como el procedimiento para realizar dicha conversión.

Se indica un procedimiento general de conversión, donde la mayor complejidad del mismo se encuentra en el acople del motor eléctrico al vehículo, esto debido a la necesidad de piezas específicas así como el requerimiento de una alineación correcta del motor junto con la caja de velocidades para garantizar el buen funcionamiento.

Se determina que los motores de imanes permanentes son los más factibles para incorporar en un vehículo eléctrico debido a su alta eficiencia y alta densidad de potencia, sin embargo, los motores eléctricos de inducción son una opción viable para incorporar en la conversión debido a su disponibilidad en el mercado.

Se logra determinar que los vehículos tipo sedán presentes en Costa Rica con mayor viabilidad para la conversión son en orden: Toyota Yaris, Hyundai Accent y Nissan Tiida. Estos vehículos presentan una autonomía teórica de aproximadamente 90 km.



# Bibliografía

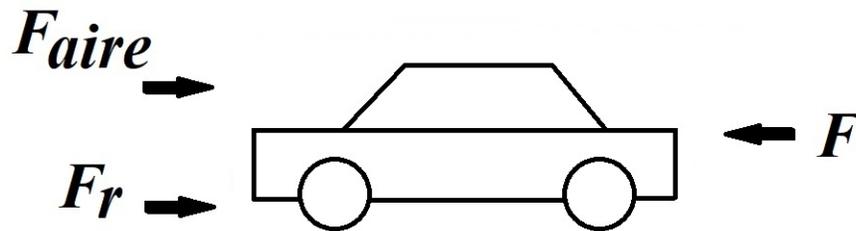
- [1] Manuel Arias. *Manual de automóviles*. Dossat 2000 S.L., España, 55 edition, 2004.
- [2] Adrian Baltatanu and Leonard Marin Florea. Comparison of Electric Motors Used for Electric Vehicles Propulsion. In *International Conference of Scientific Paper*, 2013.
- [3] Igor Bolvashenkov, Jorg Kammermann, and Hans Georg Herzog. Methodology for selecting electric traction motors and its application to vehicle propulsion systems. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2016*, (c):1214–1219, 2016.
- [4] Bob Brant and Seth Leitman. *Build your own electric vehicle*. McGraw-Hill, 2 edition, 2009.
- [5] C Chan and K Chau. *Modern electric vehicle technology*. Oxford University Press, 2001.
- [6] Wuwei Chen, Hansong Xiao, Qidong Wang, Linfeng Zhao, and Maofei Zhu. *Integrated vehicle dynamics and control*. John Wiley & Sons Inc., Singapore, 2016.
- [7] Juan De Santiago, Hans Bernhoff, Boel Ekergård, Sandra Eriksson, Senad Ferhatovic, Rafael Waters, and Mats Leijon. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(2):475–484, 2012.
- [8] M Embrandiri, D Isa, and R Arehli. Performance of an electric vehicle conversion at the University of Nottingham, Malaysia. *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*, pages 35–45, 2011. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857092137500048>.
- [9] David González. *Motores Termicos y sus Sistemas Auxiliares*. Paraninfo, España, 2 edition, 2012.
- [10] N. Hashemnia and B. Asaei. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, (c):1–5, 2008.

- 
- [11] Qi Huang, Jian Li, and Yong Chen. *Urban Transport and Hybrid Vehicles, Chap9: Control of Electric Vehicle*. Number September. 2010.
- [12] Young Hugh and Roger Freedman. *Física Universitaria Vol.1*. Pearson, México, 12 edition, 2009.
- [13] Sunarto Kaleg, Abdul Hapid, and M. Redho Kurnia. Electric vehicle conversion based on distance, speed and cost requirements. *Energy Procedia*, 68:446–454, 2015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.276>.
- [14] Jay W Schultz and Steve Huard. Comparing AC Induction with Permanent Magnet motors in hybrid vehicles and the impact on the value proposition © Copyright 2013 to the present , Parker Hannifin Corporation. pages 1–15, 2013.
- [15] Emil Sokolov. Comparative study of electric car traction motors. In *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, pages 348–353. IEEE, jun 2017. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/7955461/>.
- [16] M. Vrazic, D. Vuljaj, A. Pavasovic, and H. Paukovic. Study of a vehicle conversion from internal combustion engine to electric drive. *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*, pages 1544–1548, 2014.

# Apéndice A

## Cálculos de potencia y energía

Para que un vehículo pueda mantener una velocidad constante, la fuerza impulsora debe ser igual a la fuerza de resistencia a la rodadura sumada con la fuerza de arrastre del aire. En la Fig.A.1 se muestra el diagrama de cuerpo libre de un automóvil que circula a una velocidad constante.



Fuente: propia. Microsoft Paint.

**Figura A.1:** Diagrama de cuerpo libre de un automóvil

Del diagrama de cuerpo libre anterior y aplicando la primera ley de Newton se obtiene la ecuación (A.1).

$$F = F_r + F_{aire} \quad (\text{A.1})$$

donde:

$F$ : fuerza requerida para mantener la velocidad constante del vehículo [N].

$F_r$ : fuerza de resistencia a la rodadura [N].

$F_{aire}$ : fuerza de arrastre del aire [N].

La fuerza de resistencia a la rodadura está dada por la ecuación (A.2).

$$F_r = mgC_{rr} \quad (\text{A.2})$$

donde:

$m$ : masa del vehículo [kg].

$g$ : gravedad de la Tierra [m/s<sup>2</sup>].

$C_{rr}$ : coeficiente de rodadura.

La fuerza de arrastre del aire está dada por la ecuación (A.3).

$$F_{aire} = \frac{1}{2}\rho AC_d v^2 \quad (A.3)$$

donde:

$\rho$ : densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>].

$A$ : área transversal proyectada del vehículo [m<sup>2</sup>].

$C_d$ : coeficiente de arrastre del vehículo.

$v$ : velocidad del vehículo [m/s]

La potencia [W] requerida por el vehículo para mantener la velocidad constante está dada por la ecuación (A.4).

$$P = Fv \quad (A.4)$$

Para determinar la cantidad de energía que consume el vehículo por kilómetro a determinada velocidad se utiliza la ecuación (A.5).

$$E_k = \frac{P}{v} \quad (A.5)$$

donde:

$E_k$ : Energía consumida por km [Wh/km].

$P$ : potencia requerida por el vehículo [W]

$v$ : velocidad del vehículo [km/h]

Para determinar la autonomía teórica del vehículo se utiliza la ecuación (A.6).

$$R = \frac{E_b}{E_k} \quad (A.6)$$

donde:

$R$ : Autonomía teórica [km].

$E_b$ : Energía de la batería [Wh].