

**FoDAMI****15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021**

Metodología para la sustitución de un motor de combustión interna por un motor eléctrico para la conversión de un vehículo impulsado por motor de combustión interna (VIMCI) en un vehículo de tracción eléctrica impulsado con baterías de Litio (VTEIL).

Ing. Gaston Pary¹, Ing. Tomas Martiarena¹

¹UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
Calle 48 esq. 117, La Plata, Argentina
gaston.pary@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La aparición de los vehículos impulsados por motores eléctricos se remonta a mediados del siglo XIX, siendo incluso anteriores a los automóviles equipados con motores de combustión interna alternativos (MCIA).

Los MCIA modernos han sido el método de propulsión dominante por más de 100 años, componiendo casi la totalidad de los sistemas de transporte de pasajeros y cargas.

En la actualidad existen desarrollos de vehículos eléctricos de diversas automotrices con prestaciones similares a los equipados con MCIA. Sin embargo, el poder adquisitivo de la media poblacional de nuestro país es insuficiente para adquirir esa tecnología, por lo que es de esperar que un porcentaje de los vehículos utilizados actualmente sean convertidos a tracción eléctrica con un costo menor.

En el presente trabajo, se efectuó el montaje de un motor eléctrico sobre dos vehículos que fueron anteriormente impulsados por MCIA. Dichos motores se encontraban montados en los respectivos vehículos con diferentes orientaciones (longitudinal y transversal), por lo que la disposición de los componentes en cada vano motor debió ser diferente.

Se realizó un relevamiento dimensional de ambas cajas de velocidades, como así también de los soportes de motor originales con el objetivo de reutilizarlos en el montaje del nuevo sistema de propulsión. Se confeccionó un diseño preliminar de dos soluciones acoplar el motor y los sistemas de transmisión como así también las estructuras de montaje de los conjuntos en los vehículos, contemplando los esfuerzos a los que estarán sometidas. Luego de etapas de refinamiento, en las que se debieron encontrar soluciones a diversas problemáticas, se obtuvo el diseño final garantizando el correcto funcionamiento del impulsor y sistema de transmisión, como así también posibilitar la ubicación de baterías y sistemas auxiliares para lograr la distribución de pesos deseada. Finalmente, se realizó la construcción del diseño óptimo y el montaje en los vehículos.

Palabras clave: Vehículo, eléctrico, litio, diseño.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca en un programa de desarrollo de las tecnologías de control de baterías de litio en vehículos terrestres. La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata se encuentra trabajando en la temática desde fines de 2009. En aquel entonces, con colaboración con la CIC, se desarrolló una motocicleta eléctrica, a la cual se le reemplazaron las baterías originales de plomo ácido por baterías de Litio.

Este programa, denominado UNILITIO, ha contado con la colaboración de distintos laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la UNLP como CTA, IAME, GEMA. A la fecha de esta publicación el programa cuenta con varios desarrollos que se mencionan a continuación:

2009 - Moto eléctrica con baterías de Litio: El ing. Garaventa realizó el desarrollo del sistema de carga y el montaje de las baterías en una moto de marca "Lucky Lion"

2012 - Triciclo eléctrico con baterías de Litio: El ing. Garaventa, confecciona el sistema de tracción eléctrica y el pack de batería. El ing. Menghini realiza la construcción de la estructura y suspensión. En esta tarea participa el ing. Martiarena como alumno (tesis de grado), asistiendo en el diseño CAD. Este triciclo cubre la distancia La Plata – Mar del Plata con una sola carga de baterías, circulando por la RN 2 en el año 2012.

2016 - Eco-bus: Se adquieren 2 minibuses para realizar un circuito por el bosque de la ciudad de La Plata. Se reemplazan las baterías de plomo ácido originales por baterías de Litio.

Actualmente se encuentra en desarrollo la construcción de un minibus eléctrico para fortalecer la flota de minibuses que opera en el bosque de la ciudad de La Plata.

La decisión de investigar sobre esta tecnología tiene que ver con lo estratégico del recurso con el que cuenta la Argentina. El 75% de las reservas conocidas de Litio del mundo se encuentran en una zona comprendida entre Argentina, Bolivia y Chile. Las baterías de Litio son mundialmente conocidas por su alta capacidad y su bajo peso, es decir, su alta densidad energética. Si la creencia de que el mundo avanza hacia el auto eléctrico es cierta, es lógico pensar que el Litio se convertirá en un recurso estratégico y no solo para Argentina, Chile o Bolivia.

El objetivo de este trabajo es el diseño y proyecto de los componentes necesarios para montar un motor eléctrico en un vehículo de gran producción, Volkswagen Gol Trend, con la finalidad de su conversión para ser impulsado por energía eléctrica. A su vez, se realizó un trabajo similar sobre un vehículo de la misma marca, pero de un modelo anterior, Volkswagen Gol

Power. Se presentará el análisis llevado a cabo durante ambos procesos, indicando las diferencias mínimas entre ambos proyectos.

2. PROYECTO DE COMPONENTES

2.1 Búsqueda de información

Antes de iniciar el proceso de diseño se realizó un relevamiento regional, nacional y mundial de los desarrollos existentes sobre la misma temática. Esto fue de gran utilidad para ampliar el entendimiento del problema técnico, incorporando las enseñanzas de otros proyectos, delinear los limitantes y las áreas más problemáticas. A nivel regional existen conversiones a tracción eléctrica desarrollados por Universidades Nacionales, pero ninguno incorporaba el almacenamiento de energía en baterías de Litio.

2.2 Desmontaje de sistemas originales

Previo a comenzar el desarme del vehículo original se realizó la medición de su peso total, por eje y por laterales, con la finalidad de ser comparada su distribución de pesos original con la lograda una vez que la conversión es finalizada.

Con el fin de evaluar los anclajes originales, como así también el espacio disponible para el montaje del motor eléctrico y sus accesorios se desmontó el motor de combustión interna original y sus periféricos.

Se conservó el sistema de transmisión original, ya que el montaje del motor eléctrico se realizó sobre la caja de cambios original de cada vehículo.

2.3 Medición y diseño

Gracias al aporte del Ing. Menghini (UIDET GEMA del Departamento de Aeronáutica), fue posible la verificación dimensional de diferentes componentes y su ubicación en el compartimiento del motor.

La verificación se realizó a partir de la utilización de un instrumento de medición, llamado brazo faro. Esta herramienta permite medir y registrar posición de puntos en el espacio, y a partir de dichos puntos generar planos. También es capaz de registrar circunferencias a partir del registro de determinada cantidad de puntos sobre el contorno de esta.

Se realizó la medición del perímetro de la carcasa de la caja de velocidades respecto del centro de la directa, dimensiones fundamentales para la sujeción del motor, como así también de la vinculación de este con el sistema de transmisión. A su vez, se determinó la distancia en los

tres ejes cartesianos entre el plano de la caja de velocidades anteriormente descrito y el anclaje original del motor de combustión interna, con la finalidad de reutilizar el mismo como soporte del nuevo conjunto. Otra dimensión de importancia relevada en esta instancia fue la separación entre el eje del motor y la directa del sistema de transmisión, a partir de la cual se determinó la longitud total del acople utilizado para la transmisión de movimiento.

En la Figura 1 se presenta una de las mediciones anteriormente detalladas, realizadas con el brazo faro.



Figura1 Relevamiento dimensional de la caja de velocidades del Volkswagen Gol Power.

Finalizado el relevamiento dimensional se continuó con el diseño de cada uno de los componentes.

2.3.1 Acople motor eléctrico con caja de velocidades

Para ambos vehículos se diseñó un sistema similar, con la diferencia de la geometría del perímetro de la carcasa de embrague de la caja de velocidades. Debido a esta diferencia los agujeros de fijación y ubicación del centro de la directa difieren entre ambos modelos. El acoplamiento diseñado consiste en una placa de Acero AISI 1020, que vincula los anclajes del motor eléctrico con la caja de velocidades. El diseño de este componente es fundamental y se requiere de gran precisión en las mediciones realizadas, de modo que se garantice la perfecta alineación entre los ejes a vincular. En ejemplo del acoplamiento diseñado se muestra en la Figura 2.

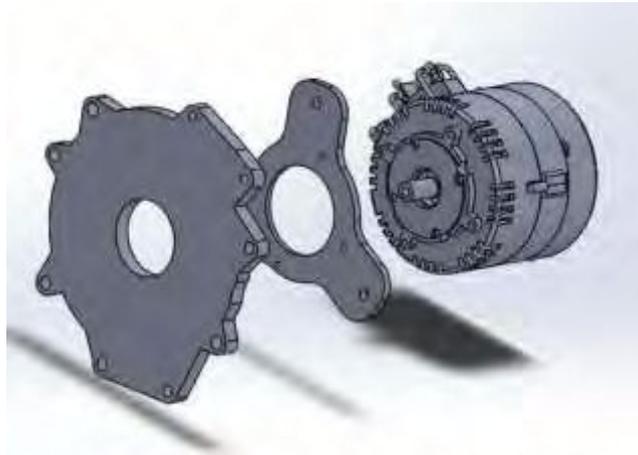


Figura 2 Diseño de montaje de motor eléctrico en caja de velocidades de Volkswagen Gol Trend

2.3.2 Soporte del conjunto motor eléctrico-caja de velocidades

Como se mencionó en un apartado anterior, se diseñaron para ambos casos soportes a ser montados en los soportes de motor originales. La diferencia entre ambos vehículos para el diseño de este componente radica en la disposición de su motor y sistema de transmisión original. En el automóvil Gol Power el motor de combustión interna está dispuesto de manera longitudinal, mientras que en el Gol Trend se ubica transversalmente. En la Figura 3 se presentan los soportes diseñados para el Volkswagen Gol Power.

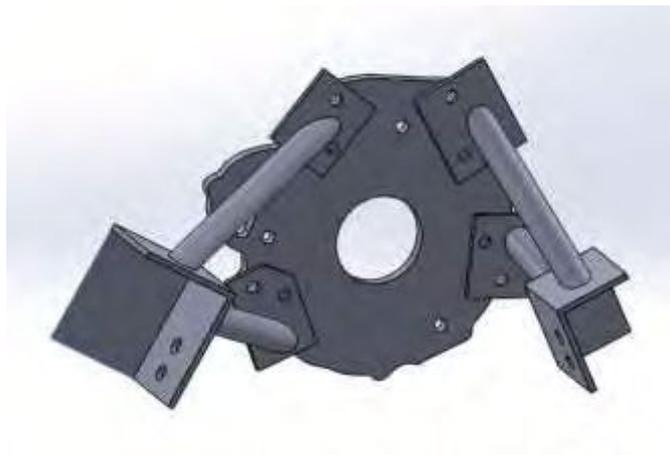


Figura 3 Soportes diseñados para vincular motor eléctrico y caja de velocidades a la carrocería.

2.3.3 Acople de transmisión de motor a caja de velocidades

Para esta vinculación se utilizó como base un acoplamiento elástico, con la finalidad de absorber posibles impactos durante el arranque. Los acoples comerciales presentan cubos simétricos con agujeros H7. Sin embargo, para este proyecto se rediseñó el acople para que uno de sus cubos posea el estriado correspondiente para ser montado en la directa de la caja de velocidades. Las directas de ambas cajas de velocidades estaban maquinadas con el mismo estriado, por lo que no hay diferencias en los acoples para ambos vehículos. En la Figura 4 se muestra uno de los acoples comerciales tomados como base para el acoplamiento.



Figura 4 Acople elástico Serie Loejoy Tiplo L

2.4 Fabricación de piezas

Una vez identificadas las piezas que serán necesarias incorporar, se procedió a la fabricación de estas.

2.4.1 Acople motor eléctrico con caja de velocidades

Este acople está compuesto por dos elementos, como se presentó en la Figura 2, una placa y una brida de sujeción. La placa en su perímetro respeta la misma geometría que la caja de velocidades. Posee orificios coincidentes con los de la caja de velocidades, para generar una unión abulonada. Esta placa tiene la función de garantizar la alineación axial entre los ejes de motor y caja de velocidades. En su centro se realizó un agujero de diámetro 50% mayor al diámetro exterior de los cubos del acoplamiento de transmisión, para un montaje sencillo del mismo.

Así como la medición, el proceso de corte debe ser lo suficientemente preciso para garantizar la correcta vinculación de los componentes. Por esta razón, la tecnología de corte utilizada fue corte por chorro de agua (*Waterjet*). El espesor de esta placa es de 5/16 pulgadas. Sin

embargo, este espesor no es suficiente para lograr la separación deseada entre los planos frontales de los ejes. Para lograr esa separación se diseñó la brida con el espesor correspondiente.

La brida de sujeción de motor permite extraer el motor con facilidad, dado que se vincula con la placa de fijación por medio de tres espárragos de fácil acceso. Este esquema permite mayor mantenibilidad, reduciendo los tiempos necesarios de reparación en caso de falla del motor. Sin esta brida, la alineación y ajuste del motor serían una tarea prácticamente imposible de llevar a cabo. El espesor de la brida para ambos casos es de 5/8 de pulgadas.

En la Figura 5 se muestra el montaje de la placa y brida que componen la vinculación estática entre motor eléctrico y caja de velocidades.

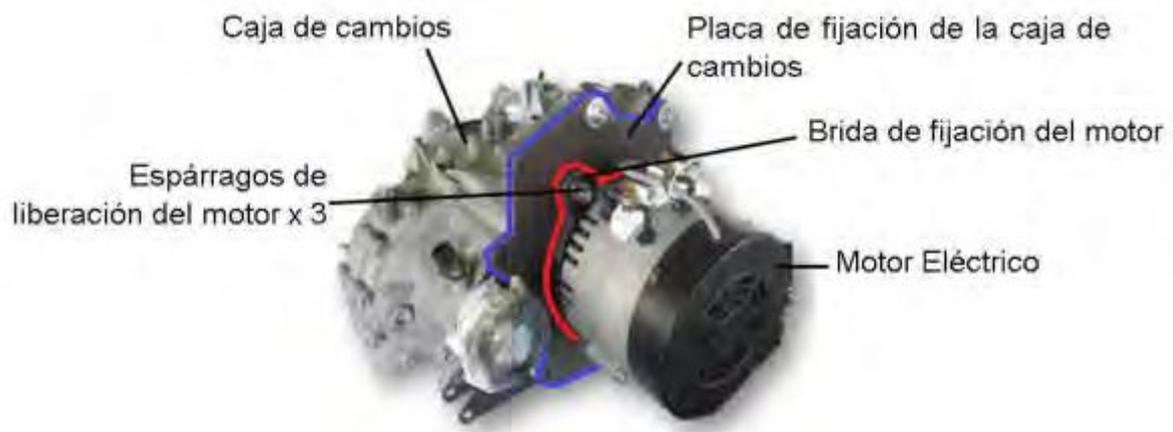


Figura 5 Acople entre motor eléctrico y caja de velocidades para Volkswagen Gol Trend.

2.4.2 Soporte del conjunto motor eléctrico-caja de velocidades

Una vez vinculados los motores eléctricos a las correspondientes cajas de velocidades se realizó el montaje del conjunto en el vehículo, verificando la correcta nivelación del conjunto y corroborando las mediciones realizadas previamente. Una vez realizada dicha verificación, se fabricaron los soportes del conjunto hasta los soportes de motor originales.

A continuación, se muestran los soportes de motor fabricados para cada vehículo (Figura 6-7).

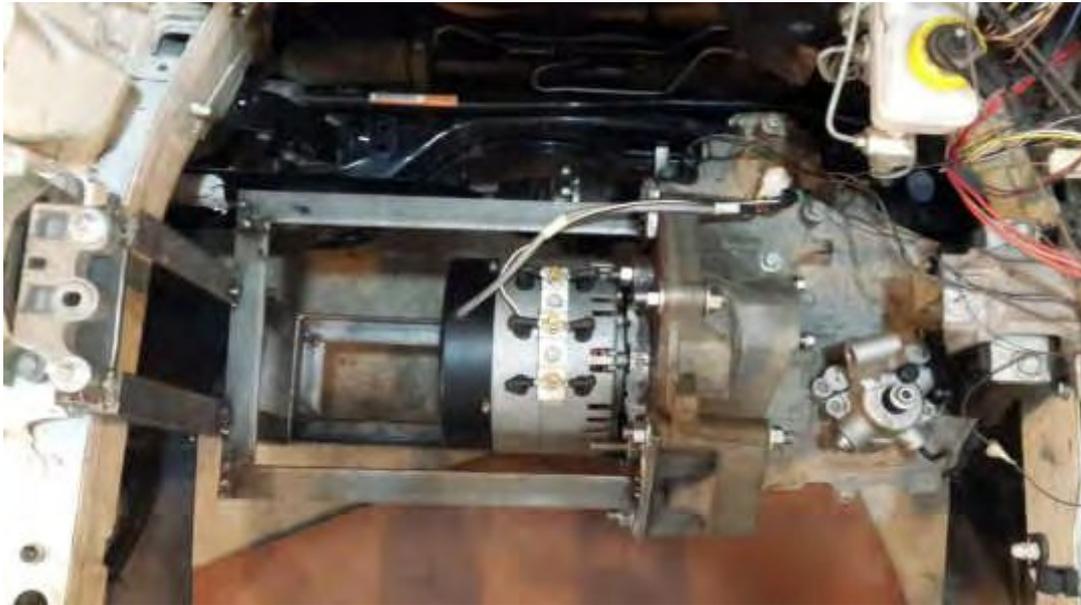


Figura 6 Soporte de motor eléctrico para Volkswagen Gol Trend.



Figura 7 Soporte de motor eléctrico para Volkswagen Gol Power

2.4.3 Acople de transmisión de motor a caja de velocidades

Se adquirió un acople comercial y se mecanizó uno de sus cubos para realizar el montaje, mediante un ajuste con apriete, de un buje con el estriado interno correspondiente a la vinculación con la directa de la caja de velocidades. En las Figura 8-9 se presentan vistas anterior y posterior del acople finalizado, respectivamente.

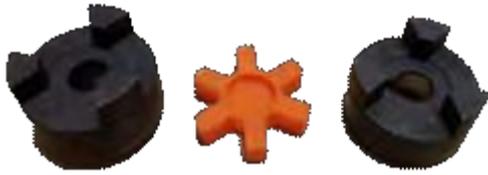


Figura 8 Vista anterior del acople.



Figura 9 Vista posterior del acople.

2.4.4 Caja de baterías y soportes

Habiendo concretado el montaje del nuevo sistema de propulsión, se logró relevar el espacio remanente disponible para el montaje de los conjuntos de baterías que alimentan el nuevo motor. Es necesario disponer de elementos que brinden soporte y protección a las baterías. Las baterías están compuestas por 26 celdas dimensión conocida. Estas celdas pueden ser divididas en grupos, siempre y cuando la cantidad de celdas de cada grupo sumen un número par. Esto es para simplificar el control de carga y descarga y. La cantidad de grupos debe ser mínima para disminuir la cantidad de estructuras independientes. Otro condicionamiento que existe es el espacio disponible dentro vano motor de cada vehículo. Se proyectó instalar las baterías en el compartimiento de motor ya que, de ese modo, se conservó la distribución de pesos original del vehículo. Teniendo todo esto en consideración, se dispuso el agrupamiento de las celdas en dos conjuntos de trece unidades para el modelo Gol Trend y cuatro conjuntos de seis unidades para el modelo Gol Power.

La distribución y montaje final de los conjuntos de baterías para cada modelo de vehículo se presenta en las Figura 10--11

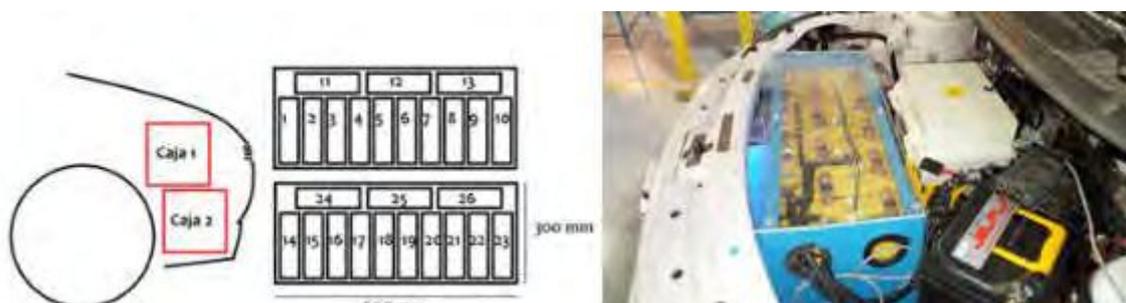


Figura 10: Esquema de disposición de cajas, batería y agrupamiento de estas en Gol Trend.

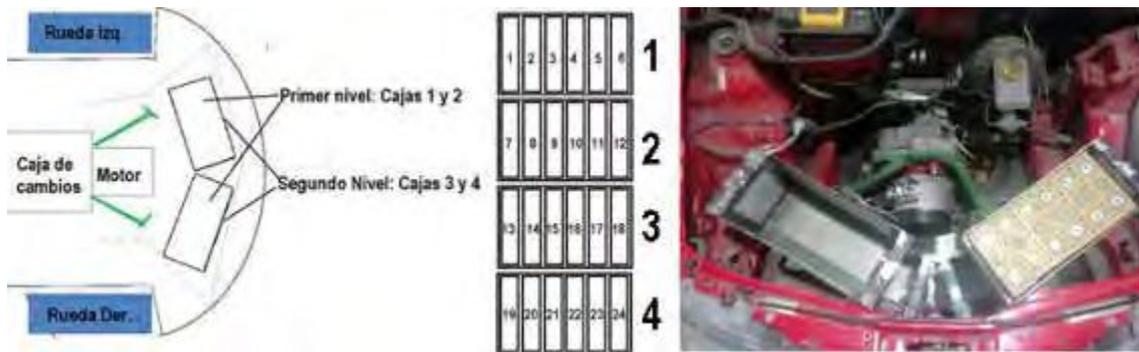


Figura 11 Esquema de disposición de cajas, batería y agrupamiento de estas en Gol Power.

3. ENSAMBLE DEL CONJUNTO

El ensamblaje final comenzó con el montaje de los componentes detallados anteriormente, posicionando el nuevo sistema de impulsión del automóvil. Posteriormente, se procedió al montaje en el vano motor del controlador del motor eléctrico, cargador de baterías y un módulo de monitoreo de carga individual de celdas. Luego, se montó un sensor de velocidad en uno de los semiejes, un sensor de intensidad de corriente de baterías y una modificación en la pedalera original que consistió en el reemplazo del pedal de acelerador original por uno que se vincula con el controlador del motor, como así también el montaje de un sensor en el pedal de freno utilizado para regeneración durante el frenado.

El montaje de las baterías se realizó en última instancia. Las baterías suman en su conjunto un total de 83 V (100 A nominales, C), que pueden llegar a ser letales en caso de que exista una descarga a tierra a través del cuerpo humano.

Se le instaló al vehículo un puerto de carga donde antes existía la entrada de fluido al tanque de combustible. Este puerto se conecta a la instalación domiciliar de 220 V (Fase + Neutro + Tierra) para abastecer el cargador de las baterías, montado en el vano motor. La terna de cables que transporta la electricidad entre estos dos puntos se colocó individualmente dentro de aislantes transparentes de PVC y se ubicaron dentro de los perfiles longitudinales de la carrocería. De este modo se garantiza doble aislación.

4. ETAPA DE PRUEBAS

4.1 Pruebas en el laboratorio

Antes de hacer rodar el vehículo por las calles es prioritario controlar el funcionamiento de todos los sistemas e identificar y subsanar las fallas en un entorno controlado. Por este motivo, se realizaron numerosos ensayos en el Departamento de Mecánica previo a su utilización en

carretera. Uno de los ensayos realizados es la carga y descarga de baterías haciendo rodar el vehículo en vacío, esto es, con sus cuatro ruedas en el aire. Posteriormente se verificó el comportamiento de los sistemas de acoplamiento entre motor eléctrico y caja de velocidades diseñados, para distintas cargas aplicadas. En esta etapa también se realizó la determinación del nuevo peso del vehículo y su distribución, a fin de compararla con la distribución original y analizar posibles cambios en las geometrías de suspensión como consecuencia de la conversión. Para el caso del Volkswagen Gol Trend, su peso se vio incrementado en 30 kg respecto del original de 905 kg. Cabe destacar que, las baterías de Litio incorporadas tienen un peso de 90 kg, mientras que un pack de equivalente capacidad de baterías Plomo-Acido pesa 340 kg. A su vez, el pack de baterías plomo-ácido ocupan un volumen 50% mayor que sus equivalentes de Litio, por lo que deberían ser montadas en la parte trasera del vehículo, afectando no sólo el peso total sino también la distribución de pesos.

4.2 Pruebas en carretera

Las pruebas se realizaron en un segmento de la Ruta Provincial 54 que discurre entre la Ruta Provincial 11 y el municipio de Bavio. Se utilizó una porción de este recorrido de 6 km, el cual se recorrió en ambos sentidos ininterrumpidamente hasta agotar la carga de la batería. El vehículo se desplazó a una velocidad promedio de 60 km/h, durante 72 km, con tres ocupantes y los componentes mecánicos diseñados cumplieron su función sin inconvenientes.

5. CONCLUSIONES

Se realizó la conversión de un vehículo a partir del diseño y fabricación de diversos componentes para el montaje y correcto funcionamiento de la nueva tecnología. El primero prototipo fue funcional ante ensayos del vehículo prototipo en carretera. Posteriormente, se realizó un diseño similar, utilizando como punto de partida el diseño de los componentes del primer desarrollo e introduciendo las modificaciones requeridas para su montaje en un vehículo de características diferentes.

6. REFERENCIAS

Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 2007

Austin Hughes, Electric Motors and Drives, 2006

Domínguez S., Ferrer R. Esteban J, Elementos Amovibles De La Carrocería, p. 6 y 7, 2008

Piglia M., Autos, rutas y turismo, El Automóvil Club Argentino y el Estado, p. 53-85, 2014

Moreno J., Tipos y componentes de carrocería, 2010

Lasheras, Técnicas de conducción deportiva. Parte 2: frenar, 2015

Infante J.A., Comportamiento dinámico del automóvil

Berrocal L.O., Resistencia de materiales, 2007

Jason C. Brown, A. John Robertson, Stan T. Serpento, Motor vehicle structures, concepts and fundamentals, 2002

Beer, Johnston, Cornwell, Mecánica vectorial para ingenieros Novena edición, 2010

Francisco Aparicio, Carlos Vera, Vicente Díaz, Teoría de los vehículos automotores, 2016

Help Solidworks, Nonlinear Static Analysis Overview, 2017
http://help.solidworks.com/2017/english/solidworks/cworks/c_nonlinear_static_analysis_overview.htm